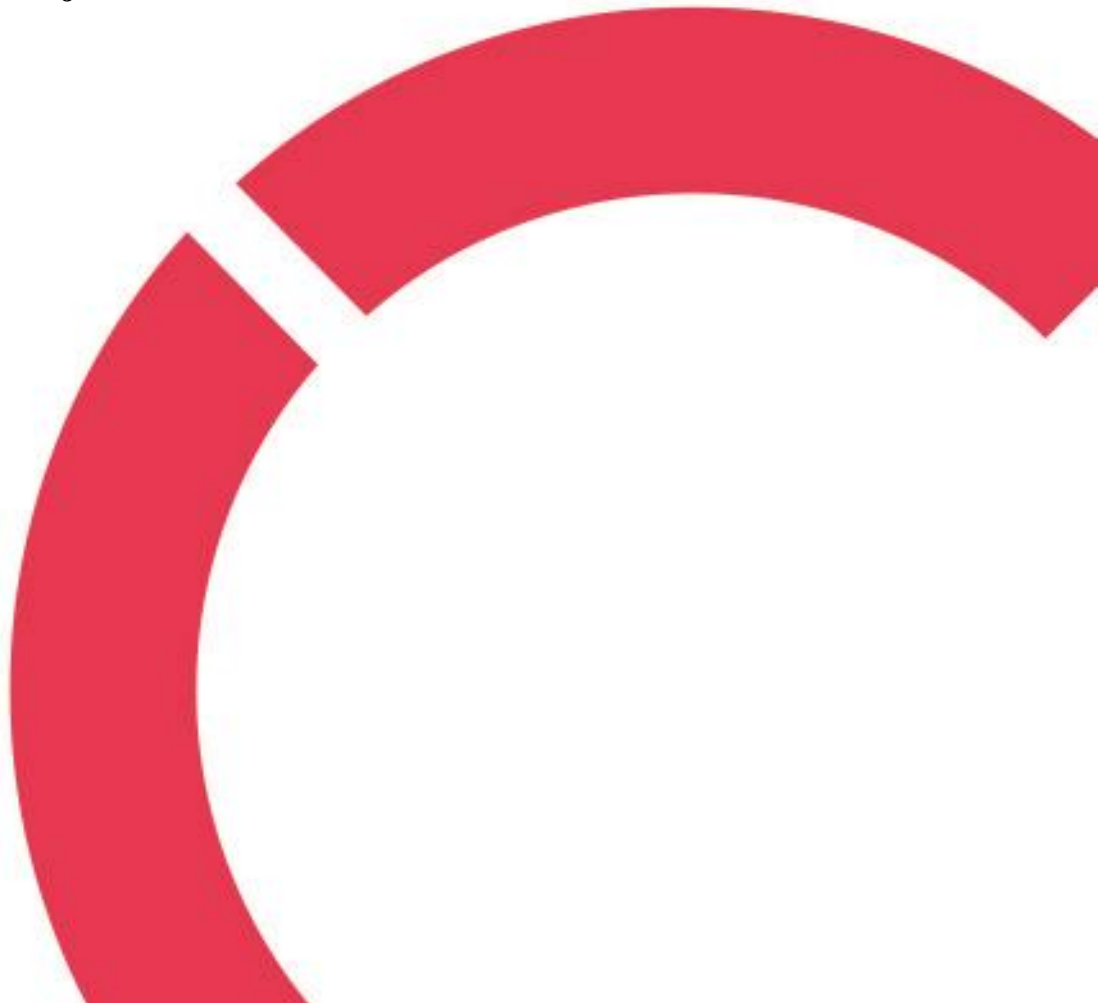


**Jimi Jokela**

**TAAJUUSMUUTTAJAN LISÄÄMINEN VUOTOKAASUPUHALTI-  
MELLE**

**Opinnäytetyö  
CENTRIA-AMMATTIKORKEAKOULU  
Insinööri (AMK) Sähkö- ja automaatiotekniikka  
Elokuu 2023**



<b>Centria-ammattikorkeakoulu</b>	<b>Aika</b> Elokuu 2023	<b>Tekijä/tekijät</b> Jimi Jokela
<b>Koulutus</b> Sähkö- ja automaatiotekniikka		<input checked="" type="checkbox"/> AMK <input type="checkbox"/> YAMK
<b>Työn nimi</b> TAAJUUSMUUTTAJAN LISÄÄMINEN VUOTOKAASUPUHALTIMELLE		
<b>Työn ohjaaja</b> Aki Suokko		<b>Sivumäärä</b> 44
<b>Työelämäohjaaja</b> Jani Rutanen		
<p>Opinnäytetyö tehtiin Yara Suomi Oy:n Kokkolan kaliumsulfaattitehtaalle. Kaliumsulfaattitehtaan toiminta alkoi vuonna 1962 natriumsulfaattitehtaan. Kaliumsulfaattia on valmistettu tehtaalla vuodesta 1976 asti.</p> <p>Tämän opinnäytetyön tavoitteena oli selvittää tehtaan vuotokaasupuhaltimen energiankulutus sekä energiansäästömahdollisuudet. Nykyisessä toteutuksessa moottori on suorakytketty, jolloin sen tehoa ei voida säätää. Jos puhaltimen moottori olisi taajuusmuuttajaohjattu, voitaisiin sen tehoa hallita ja täten säästää energiaa.</p> <p>Energiankäytön optimointi on jatkuvaa työtä. Yara Suomi on sitoutunut Elinkeinoelämän keskusliiton energiatehokkuusohjelmaan. Toimenpideohjelman tavoitteena on 7,5 %:n energiansäästö vuoteen 2025 mennessä verraten vuoteen 2015.</p> <p>Selvitys tapahtui tutustumalla järjestelmään, minkä jälkeen arvioitiin kustannuksia taajuusmuuttajan asennuksesta. Tämän jälkeen tarkasteltiin laskujen avulla, kuinka paljon taajuusmuuttajakäytöllä vähennettäisiin moottorin sähkönkulutusta.</p> <p>Opinnäytetyön teoriaosuudessa tutustuttiin ensin tehtaaseen, nykyiseen vuotokaasujärjestelmään sekä AC-käyttöjen komponenttien teoriaan. Energiankulutusta tutkittiin ensin teoriassa sekä mittaamalla puhaltimen teho. Työn tulokset ja johtopäätökset käsitellään viimeisessä luvussa.</p>		
<b>Asiasanat</b> Energiankulutus, energiansäästö, energiatehokkuus, kannattavuuslaskenta, kustannuslaskenta, taajuusmuuttaja		

## ABSTRACT

<b>Centria University of Applied Sciences</b>	<b>Date</b> August 2023	<b>Author</b> Jimi Jokela
<b>Degree programme</b> Electrical and automation engineering		
<b>Name of thesis</b> ADDING A FREQUENCY CONVERTOR TO A LEAKAGE GAS FAN		
<b>Centria supervisor</b> Aki Suokko	<b>Pages</b> 44	
<b>Instructor representing commissioning institution or company</b> Jani Rutanen		
<p>This thesis was made for Yara Suomi Oy, Kokkola potassium sulphate plant. Production at the site started in 1962 and the product then was natrium sulphate. The production of potassium sulphate started in 1976.</p> <p>The objective of this thesis was to study energy consumption on a leakage gas fan system and the possibility to add a frequency convertor into the system. If this could be adapted, operators could adjust power of the motor and thus save energy.</p> <p>The optimization of energy usage is continuous work. Yara Suomi is committed to Energy efficiency agreements program. The target of this agreement is to consume 7,5 % less energy in 2025 than in 2015.</p> <p>The work started with introduction of the system. After that, an estimate was made for frequency convertor and installation work. Cost-effectiveness was calculated with estimates of how much the power of the motor could be dropped.</p> <p>The theory section of the thesis starts with an introduction of the plant and the current leakage gas system. Energy consumption was studied with theory and by measuring the power of the fans in operation. The results and conclusions of the work are discussed in the last chapter.</p>		

### Key words

Calculation of costs, energy consumption, energy efficiency, energy saving, frequency convertor, profitability calculation

## **KÄSITTEIDEN MÄÄRITTELY**

### **IE-luokka**

IE = International efficiency. Standardoitu hyötysuhdeluokitus moottoreille. Korkeampi numero tarkoittaa parempaa hyötysuhdetta.

### **I/O**

Input / outputmoduuli. (tulo/lähtömoduuli). Komponentti, joka vastaanottaa ja lähettää signaalitietoja.

### **HCl**

Kloorivetykaasu, jota muodostuu kaliumsuolan ja rikkihapon yhdistyessä kuumassa uunissa

### **KCl**

Kaliumkloridi, kaliumista ja kloorista koostuva kiteinen aine. Toinen raaka-aine kaliumsulfaatin valmistuksessa

### **SiC**

Piikarbidi, piin ja hiilen muodostama keraaminen yhdiste. Käytetään uunin katon pinnoituksessa.

**TIIVISTELMÄ**  
**ABSTRACT**  
**KÄSITTEIDEN MÄÄRITTELY**  
**SISÄLLYS**

<b>1 JOHDANTO.....</b>	<b>1</b>
<b>2 YARA INTERNATIONAL .....</b>	<b>2</b>
2.1 Yara Suomen historia.....	3
2.2 Yara Suomi .....	4
2.2.1 Kokkolan tehtaat .....	4
<b>3 KALIUMSULFAATTITEHTAAN PROSESSI.....</b>	<b>5</b>
<b>4 VUOTOKAASU .....</b>	<b>6</b>
4.1 Vuotokaasupuhallin.....	7
<b>5 AC-KÄYTTÖ .....</b>	<b>12</b>
5.1 Taajuusmuuttajan toimintaperiaate.....	17
5.1.1 Tasasuuntaus.....	18
5.1.2 Välipiiri .....	20
5.1.3 Vaihtosuuntaus .....	20
5.2 Taajuusmuuttajan ohjaus .....	24
5.3 Taajuusmuuttajan komponentit .....	26
<b>6 TAAJUUSMUUTTAJAKÄYTÖN KYTKENTÄ .....</b>	<b>28</b>
<b>7 VUOTOKAASUPUHALTIMEN ENERGIANKULUTUS JA UUDET AJOTAVAT .....</b>	<b>30</b>
<b>8 YHTEENVETO .....</b>	<b>38</b>
<b>LÄHTEET .....</b>	<b>38</b>

**KUVIOT**

KUVIO 1. Vuotokaasupuhaltimen puhallinkäyrä mitoitustilanteessa.....	11
KUVIO 2. Puoliaaltotasaus.....	18
KUVIO 3. Kolmivaiheinen siltakytkentä.....	19
KUVIO 4. Kolmivaiheisen siltakytkennän muodostama tasajännite.....	19
KUVIO 5. Vaihtosuuntaajan mallinnus kytkinmallilla.....	20
KUVIO 7. Välipiirillinen taajuusmuutaja.....	22
KUVIO 8, Diodin piirrosmerkki.....	26
KUVIO 9, Tyristorin piirrosmerkki.....	26
KUVIO 10. IGBT-transistorin piirrosmerkki.....	27
KUVIO 11. Sähkön kokonaishinta yritysasiakkaille, joiden vuosikulutus on >70 000 MWh.....	32
KUVIO 12. Puhallinkäyrä 1000 rpm:n kierrosnopeudella.....	35
KUVIO 13. Puhallinkäyrä 600 rpm:n kierrosnopeudella.....	36

## KUVAT

KUVA 1. Yaran toimipisteet.....	2
KUVA 2. Uunin hoitoluukku.....	6
KUVA 3. Elinkaarilaskenta.....	7
KUVA 4. Radiaalipuhaltimen pääkomponentit.....	9
KUVA 5. Kaasun kulkusuunta radiaalipuhaltimessa.....	10
KUVA 5. Oikosulkumoottorin rakenne.....	12
KUVA 6. ABB 3GBP312230-ADL moottorin sähköiset tiedot.....	14
KUVA 7. Sääötapoja.....	15
KUVA 8. Tehopuolijohteiden sijoittelu piirilevyllä.....	23
KUVA 9. ABB ACS880 taajuusmuuttaja.....	25
KUVA 10. Suoraan verkkoon kytketyn sähkömoottorikäytön piirikaavio.....	28
KUVA 11. Taajuusmuuttajan käyttö moottorilähdössä.....	29
KUVA 12. Vuotokaasupuhaltimen konekortti.....	31

## 1 JOHDANTO

Opinnäytetyön aihetta miettiessäni päätin jo varhaisessa vaiheessa, että aihe käsittelisi energiaa ja energiatehokkuutta. Energiatehokkuus on nykypäivän teollisuudessa erittäin tärkeää tehtaille ja energiatehokkuuteen panostetaan paljon. Opinnäytetyön toimeksiantajana toimi Yara Suomi Oy. Opinnäytetyö kohdistui Yara Suomen Kokkolan kaliumsulfaattitehtaaseen. Keskustelimme sulfaattitehtaan toimihenkilöiden kesken ja kerroin, minkälaista opinnäytetyötä haluaisin tehdä, ja energiatehokkuuden parantaminen oli meidän kaikkien mielestä hyvä aihepiiri. Yara Suomi on sitoutunut Elinkeinoelämän keskusliiton energiatehokkuusohjelmaan. Toimenpideohjelman tavoitteena on 7,5 % energiansäästö vuoteen 2025 mennessä verraten vuoteen 2015. (Energiatehokkuussopimukset 2023) Ehdotuksia opinnäytetyön aiheeksi tuli monia, mutta lopulta päädyimme vuotokaasupuhaltimen moottorin taajuusmuuttajan lisäämiseen.

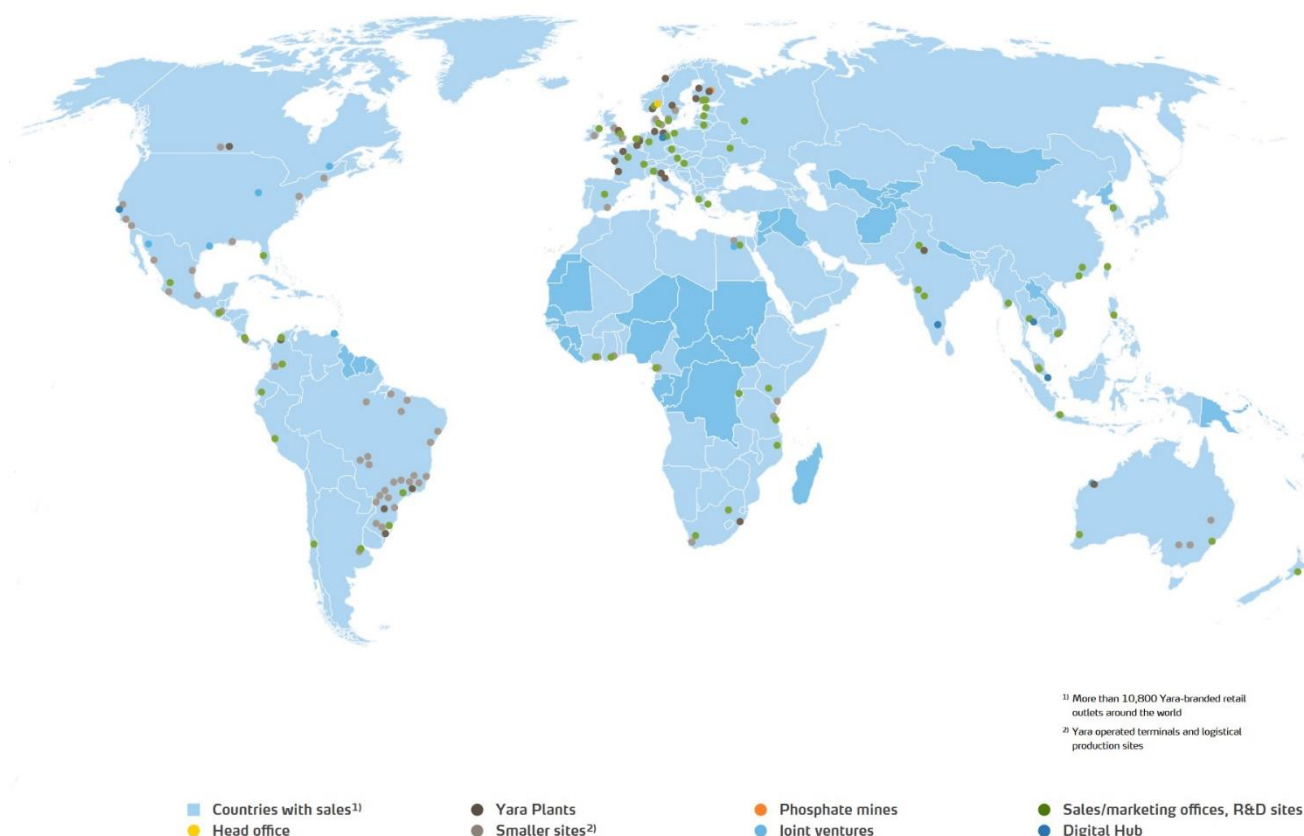
Vuotokaasupuhaltimen moottorina on 132 kW:n IE3-hyötysuhdeluokan moottori suorakytkettynä. Jos tämä moottori saataisiin kytkettyä taajuusmuuttajan taakse, voisivat operaattorit säätää sen tehoa etsien optimaalisen tehoalueen puhaltimelle. Todennäköisesti moottoria voidaan käyttää pienemmällä teholla ja tämän kautta saavutetaan jatkuvia säästöjä. Vuotokaasupuhallin on käytössä 24 tuntia vuorokaudessa koko vuoden ajan, joten pienelläkin tehonsäädöllä saavutetaan iso säästö sähkönkulutuksessa.

Opinnäytetyö alkaa lyhyellä tutustumisella Yara-konserniin sekä Yara Suomen historiaan, jonka jälkeen käsitellään Yara Suomen toimintaa nykypäivänä ja tämän jälkeen Yara Kokkolan tehtaiden toimintaa tarkemmin. Paneudumme kaliumsulfaattitehtaan toimintaan sekä prosessiin. Tehdasesittelyn jälkeen seuraa teoriaosuus sähkömoottoreista ja taajuusmuuttajista. Teoriaosuuden jälkeen siirrymme käsittelemään vuotokaasupuhallinta ja sen toimintaa.

## 2 YARA INTERNATIONAL

Yara on maailmanlaajuisesti toimiva yritys, jonka päätuotteita ovat kivennäislannoitteet, teollisuuskemikaalit ja ympäristönsuojelulaitteiden toimitus. Sam Eyde ja Kristian Birkeland perustivat yrityksen vuonna 1905, ja yrityksen nimi oli tuolloin Norsk Hydro. Norsk Hydro hyödynsi Norjan vesivoimavaroja tuottaakseen kivennäislannoitteita. (Yara Suomi 2023b.)

Nykyään Yara International työllistää maailmanlaajuisesti noin 17,500 työntekijää ja toimii 60 maassa. Yrityksen toimitusjohtaja on Svein Tore Holsether. Yaran kokonaistuotanto vuonna 2022 oli 31,6 miljoonaa tonnia, josta kivennäislannoitteiden osuus oli 22,7 miljoonaa tonnia, teollisuuskemikaalien 7,2 miljoonaa tonnia ja ammoniakkin 1,8 miljoonaa tonnia. Liikevaihto vuonna 2022 oli 24.1 miljardia dollaria ja käyttökate 5,0 miljardia dollaria. Yara on listattuna Oslon pörssiin (YAR). (Yara 2023.)



KUVA 1. Yaran toimipisteet (Yara 2022 annual report)

## 2.1 Yara Suomen historia

Yara Suomen tarina alkoi 1920-luvulla. Vuonna 1920 perustettiin valtion omistama Kemira, jonka toiminta alkoi Rikkihappotehtaan ja Superfosfaattitehtaan perustamisella. Tehtaat tuottivat väkilannoitteita, joilla Suomi sai nostettua satomäärää ja tuotettua ruokaa kansalle. Ensimmäiset tehtaat perustettiin Lappeenrantaan ja Kotkaan. Vuonna 1945 Kokkolaan perustettiin rikkihappotehdas. Rikkihappo- ja superfosfaattitehtaiden nimi vaihtui Rikkihappo Oy:ksi vuonna 1960. Vuonna 1962 Kokkolan tehtaiden rikkihappotuotantoa kasvatettiin ja aloitettiin natriumsulfaatin sekä kalsiumkloridin tuotanto. Kokkolan tehtaiden investointi oli yhtiön suurin investointi siihen mennessä. Kokkolassa tapahtuvan rikkihappotuotannon kasvun myötä loppui sen valmistus Lappeenrannassa. Rikkihappo Oy:n nimi muutettiin Kemira Oy:ksi vuonna 1972. (Kemira 2023.)

1970-luvun loppupuolella lannoiteliiketoiminta ja kemianteollisuus erotettiin toisistaan ja lannoiteliiketoiminta jatkoi nimellä Kemira Agro. 1990-luvun aikana Kemira Agro laajentui perustaen uusia tehtaita Baltiaan, Puolaan ja Unkariin. Kemira Agro kasvoi samalla myös yritysostoilla Lähi-idässä ja Aasiassa. Vuonna 2004 Kemira Agro irrotettiin Kemira Oyj:stä ja nimi vaihdettiin Kemira GrowHow:ksi. Kemira GrowHow listautui pörssiin, josta Yara International osti Kemira Growhow osakekannan vuonna 2007. (Yara Suomi 2023b.)

Toukokuussa 2007 Yara osti Suomen valtion osuuden Kemira GrowHow:n osakkeista. Ostohetkellä Suomen valtio omisti 30,05 prosenttia GrowHow:n osakekannasta. Valtion osuudeksi kaupasta tuli 207 miljoonaa euroa. Samalla Yara teki julkisen ostotarjouksen loppuistakin osakkeista. Julkinen osake- tarjous oli 12,12 euroa osakkeelta, joka on sama hinta kuin mitä Yara maksoi Suomen valtiolle. Kemira GrowHow:n osakekannan kokonaishinnaksi muodostui 671,8 miljoonaa euroa. Ennen Yaran tekemää ostotarjousta osakekannan arvo laskettuna edellisen päivän päätöskurssilla oli 530,3 miljoonaa euroa. Ostotarjouksessa oli täten 30,7 prosentin premio. Vuonna 2007 Kemira GrowHow työllisti keskimäärin 2500 henkilöä ja tuotantolaitoksia oli kahdeksassa maassa. (Kauppalehti 2007.)

## 2.2 Yara Suomi

Suomessa Yaralla on tuotantolaitoksia kolmessa eri kaupungissa. Tuotantolaitokset sijaitsevat Uudesakaupungissa, Siilinjärvellä ja Kokkolassa. Siilinjärvellä on myös Suomen ja koko Länsi-Euroopan ainoa fosfaattikaivos. Yaralla on tämän lisäksi Vihdissä Kotkaniemen tutkimusasema, jossa tutkitaan lannoitteiden tehoa pellolla. Tutkimusaseman tarkoitus on auttaa lannoitevalikoiman ja lannoitusmenetelmien kehitystyötä. (Yara Suomi toimipaikat 2023.)

Uudenkaupungin tehtaiden päätuotteita ovat lannoitteet ja typpihappo. Siilinjärven tehtaiden päätuotteita ovat lannoitteet ja fosforihappo. Siilinjärven fosfaattikaivoksesta apatiittimalmista saatava fosfori jalostetaan lannoitteeksi. Siilinjärveltä louhittava apatiitti on yksi maailman puhtaimpia apatiitteja. (Yara Suomi toimipaikat 2023.) Yara on investoinut vuosien varrella noin 800 miljoonaa euroa Suomen toimintoihin. Nykyään Yara Suomi työllistää noin 900 henkilöä ja välillisesti jopa yli 4000 henkilöä. (Yara Suomi 2023a)

### 2.2.1 Kokkolan tehtaat

Kokkolassa Yaralla on kaliumsulfaatti- ja rehufosfaattitehdas sekä terminaalitoimintaa, jossa varastoidaan ja toimitetaan ammoniakkia ja fosforihappoa. Kokkolassa Yaralla työskentelee noin 85 työntekijää. Kaliumsulfaattitehtaan toiminta alkoi vuonna 1962 ja rehufosfaatin tuotanto vuonna 1993, kun lannoitetuotanto lopetettiin. (Yara Suomi Kokkola 2023.)

Rehufosfaatteja käytetään eläinrehujen raaka-aineina. Rehufosfaatin tuotantokapasiteetti on 200 000 tonnia vuodessa. Lisäksi rehutehtaan sivutuotteena muodostuu hiilidioksidia, jota toimitetaan myös Kokkolan suurteollisuusalueella toimivalle Woikoskelle nesteytettäväksi. (Yara Suomi Kokkolan tehtaat 2023.)

Kaliumsulfaattia käytetään lannoitteiden raaka-aineena sekä yksittäin lannoitteena. Kaliumsulfaattitehtaan tuotantokapasiteetti on 220 000 tonnia vuodessa. Sivutuotteena kaliumsulfaattitehtaalla syntyy suolahappoa noin 80 000 tonnia vuodessa. (Yara Suomi Kokkolan tehtaat 2023.)

### 3 KALIUMSULFAATTITEHTAAN PROSESSI

Kaliumsulfaattitehtaan prosessi perustuu Mannheim-prosessiin. Kokkolan sulfaattitehtaalla on käytössä 16 kappaletta mannheim-uuneja. Tuotteen valmistus vaatii pitkän reaktioajan ja korkean lämpötilan. Reaktioaika tuotteelle uunissa on noin 4 h ja uunin sisälämpötila on noin 560–570 °C. Prosessissa muodostuu myös kloorivetykaasua (HCl), joka imetään omaan putkistoon, jäähdytetään ja imeytetään veteen 33-prosenttiseksi suolahapoksi. (SOP 4).

Prosessin pääraaka-aineita ovat kaliumkloridi (KCl) sekä väkevä, 98,8-prosenttinen rikkihappo (H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>). Kaliumkloridi ja rikkihappo syötetään Mannheim-uuniin. Uunissa sekoittimet pyöriessään sekoittavat aineet toisiinsa ja siirtävät tuotetta hitaasti ulkokehälle. Uunista kaliumsulfaatti putoaa jäähdytys- ja jauhatusrumpuihin. Rummuissa kaliumsulfaatti jäähdytetään merivesivaipan avulla ja jauheetaan hienommaksi. (SOP 4,10).

Mannheim-uunien lämmityksessä käytetään raskasta polttoöljyä tai maakaasua. Aikaisemmin kaikki uunit on lämmitetty raskaalla polttoöljyllä, mutta viime vuosina on uuneja modernisoitu ja muutettu maakaasukäyttöisiksi. Tällä hetkellä maakaasulämmitteisiä uuneja on kolme. Uunin reaktiotilaa lämmitetään piikarbidista (SiC) valmistetun kattoholvin läpi johtumalla. Kattoholvin lämpötila on noin 850 astetta. Kuumia savukaasuja johdetaan reaktiotilan alle lattiaholveihin, josta siirtyy myös lämpöä reaktiotilaan. Reaktiotilaan lämpöä siirtyy kattoholvin kautta noin 90 % ja lattian kautta noin 10 %. Näin saadaan uunin reaktiotilan lämpötilaksi 560–580 astetta. (SOP 11).

Kun tuote on tullut uunin ja jäähdytys- ja jauhatusrummun läpi, kuljetetaan se ensin kokoajakuljettimilla tehtaan keskelle josta toinen kuljetin siirtää tuotteen jälkikäsittelyyn. Jälkikäsittely riippuu siitä, mitä lopputuotelaatua ajetaan. Kokkolan kaliumsulfaattitehtaalla valmistetaan kolmea eri kaliumsulfaattilaatua. Tuotelaadut ovat standardi kalsiumsulfaatti (SOPstd), neutraloitu kalsiumsulfaatti (SOPne) ja vesiliukoinen kalsiumsulfaatti (SOPws). (SOP 5).

## 4 VUOTOKAASU

Vuotokaasulla tarkoitetaan HCl-kaasua, jota pääsee uunista ulos, kun uunin luukku avataan. Tämä kaasu imetään uunin hoitoluukun päältä omaan putkistoonsa, jotta operaattorien on turvallista hoitaa uunia. Vuotokaasupuhaltimella siis parannetaan tehdashallin ilmaa, eikä tätä ilmaa käsitellä kuten uunin sisältä omaan putkistoonsa imettävää HCl-kaasua, josta muodostetaan suolahappoa. Kuvassa 2 näemme operaattorin uuninhoitokierroksella. Uunien hoito on tärkeä osa prosessia. Kierroksella varmistetaan silmämääräisesti, että uunin sisällä on kaikki kunnossa, ja tarvittaessa hajotetaan kovettuneita paakkuja, joita voi muodostua uunin sisälle.



KUVA 2. Uunin hoitoluukku. (Yara Kokkolan tehtaat)

Uunin hoitoluukun päällä on vuotokaasuputkisto sekä huuva. Kun uunin luukku avataan, aukeaa samalla mekaanisella vivulla vuotokaasuputkessa oleva läppäventtiili. Näin alipaine eli "imu" pääsee venttiilin läpi ja vuotokaasut imetään pois, jolloin operaattorin on turvallista työskennellä.

## 4.1 Vuotokaasupuhallin

Vuotokaasupuhaltimen moottorina on käytössä ABB:n valmistama 132 kW, 400 V IE3-luokan sähkömoottori. Ennen taajuusmuuttajakäytön laskuja tarkastellaan, kannattaako moottori vaihtaa IE4-luokan moottoriksi pelkästään sähkökulutuksen takia. Apuna tässä käytin ABB:n laskuria (ABB elinkaarilaskuri). Laskuriin syötin lähtötiedoiksi moottorin käyttöajan, joka on 8760 h vuodessa. Lisäksi sähköenergian hintana käytin laskurin tarjoamaa oletusta 0,10 € / kWh. Huoltokustannuksia ei oteta huomioon, koska niiden oletetaan olevan sama molemmissa moottoreissa. Vertailuna nykyiselle moottorille käytettiin kohteeseen sopivaa, laskurin tarjoamaa ABB:n moottoria, joka on IE4-luokituksella. Moottorin käyttöikä laskurissa oli asetettu 20 vuoteen, joka on luultavasti hieman liikaa jatkuvassa käytössä, mutta tässä laskennassa keskityttiin pelkästään energiansäästöön, koska hintatietoja uudelle moottorille ei ollut helposti saatavilla.

### Cost of ownership

Cost of ownership
Cost of running
Cost of not running

Type:  ▼  
Select a motor from your motor list

Type:  ▼  
Select a motor from your motor list or enter data [manually](#)

**Calculate your cost of ownership by comparing motors**

Output: <input type="text" value="132"/> kW	vs	Output: <input type="text" value="132"/> kW
Efficiency (DOL): <input type="text" value="95.6"/> %		Efficiency (DOL): <input type="text" value="96.4"/> %
Price: <input type="text" value="0"/> EUR		Price: <input type="text" value="0"/> EUR

COMPARISON SETTINGS
Save result to export list ADD

<sup>1</sup> DOL motor efficiency converter to motor efficiency with VSD supply when compared to a VSD motor

**Economy**

Life cycle savings  
**20 075 EUR**

Payback period  
**0 Months**

**Environment**

Reduction of greenhouse gases  
**5 019 kg/year ≈ 0.7 car**

**Energy**

Reduction of greenhouse gases  
**10 038 kWh/year ≈ 2.9 electric cars**

KUVA 3. Elinkaarilaskenta (ABB elinkaarilaskuri).

Kuvasta 3 näemme, että vanhan moottorin hyötysuhde on 95,6 % ja uuden moottorin hyötysuhde on 96,4 %. Tästä hyötysuhteen erosta on siis kyse, kun siirrymme IE3-luokan moottorista IE4-luokan moottoriin. Laskurin vastaus energiansäästöstä on 10 038 kWh vuodessa, joka vastaa 5019 kg CO<sub>2</sub>-

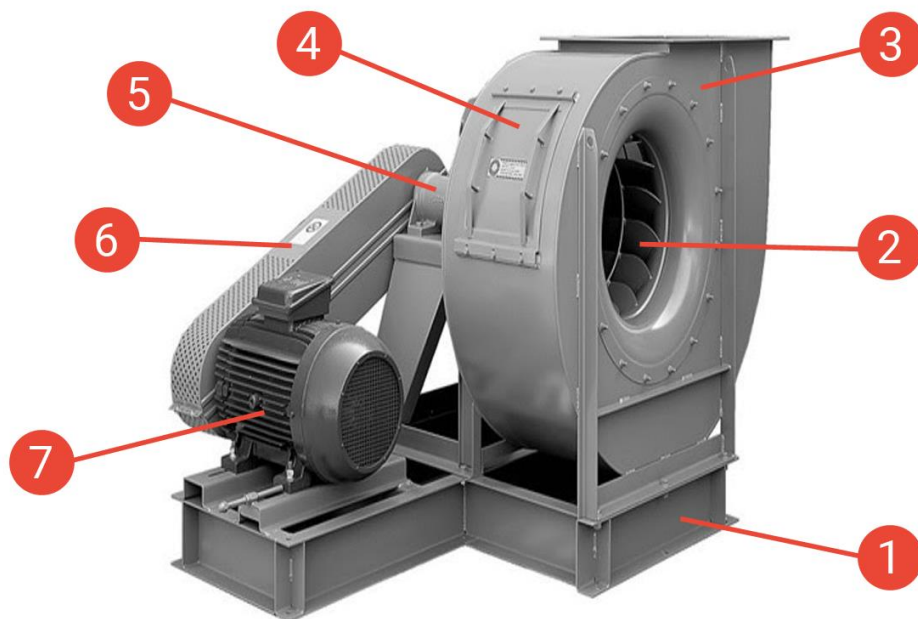
päästöjä. Koska moottorin ikä oli asetettu 20 vuoteen, jakamalla elinkaarisäästöt saamme vuosittaiseksi säästökseen noin 1000 €. 1000 €:n vuosisäästöllä IE3-luokan moottorin vaihto IE4-luokan moottoriin ei vielä ole järkevää. Kuitenkin 1.7.2023 voimaan astuva, alla oleva säännös määrää, että 75 kW:n – 200 kW:n kokoisten moottorien täytyy olla IE4-luokituksella. (SEW IE-guide)

Regulation: Ecodesign Regulation (EU) 2019/1781 & (EU) 2021/341

Standard: EN 60034-30 and EN 60034-2-1

Alle 75 kW:n ja yli 200 kW:n moottori voi siis olla IE3-luokan moottori. Vuotokaasupuhaltimen moottorin teho on 132 kW, joten vaihdos IE4-luokan moottoriksi tulee eteen joka tapauksessa.

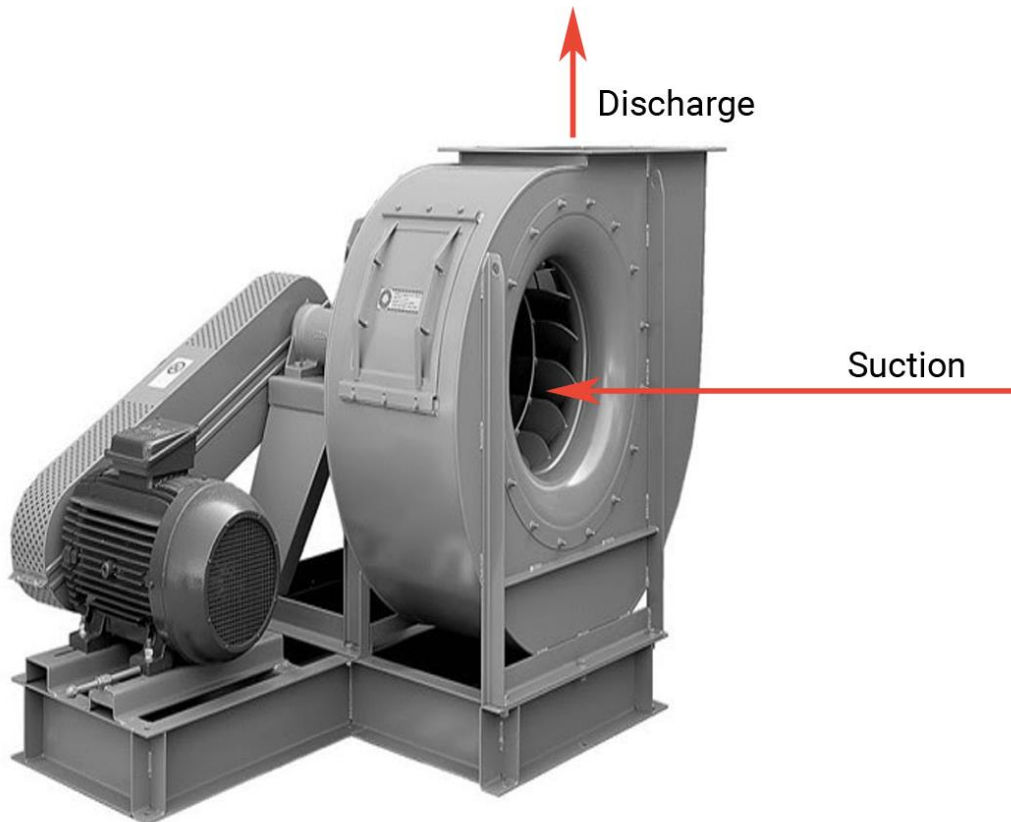
Vuotokaasupuhallin on uusittu vuonna 2020. Uusi puhallinkokonaisuus on Kojan toimittama Ecofan-sarjan radiaalipuhallin. Kuvassa 4 on esitettyä radiaalipuhaltimen pääkomponentit.



KUVA 4. Radiaalipuhaltimen pääkomponentit. (Power-MI blog 2023)

Kuvassa näkyvät 1. puhaltimen jalusta, 2. siipipyörä, 3. puhaltimen runko / kaapu, 4. tarkastusluukku, 5. puhaltimen laakeriyksikkö, 6. hihnakäytön kotelo ja 7. sähkömoottori

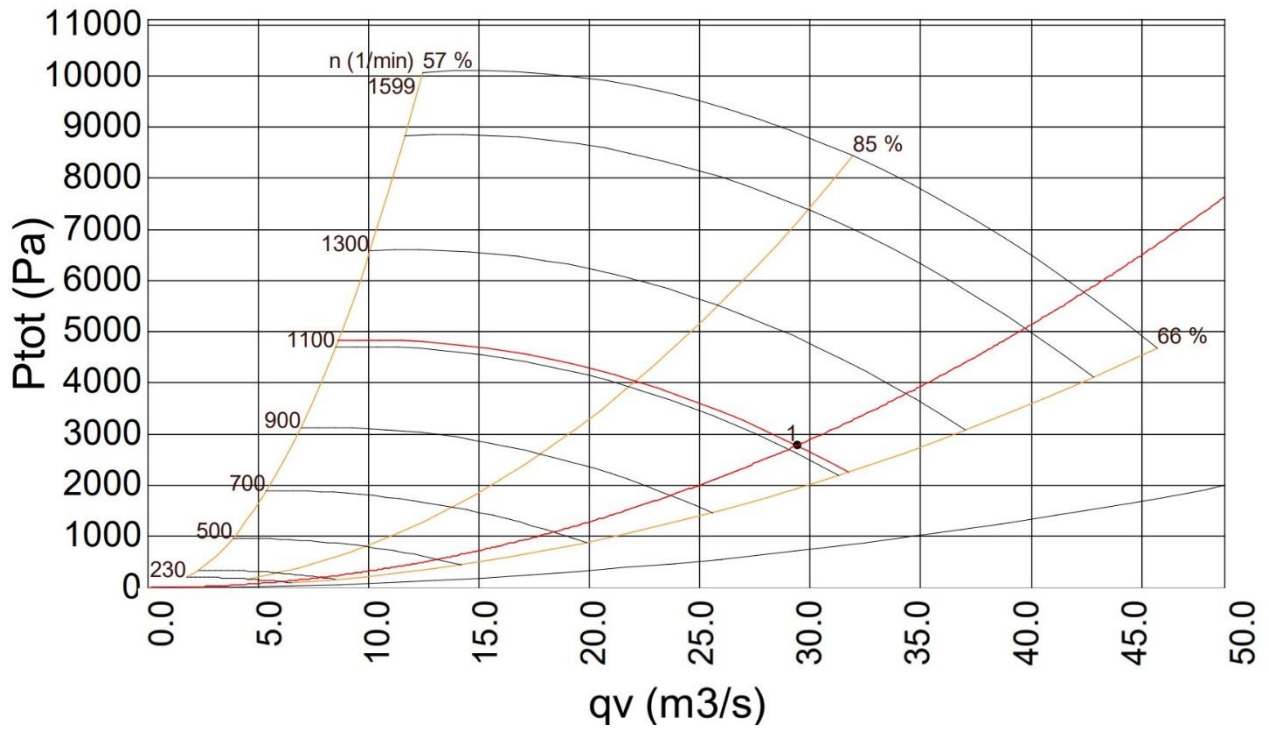
Radiaalipuhaltimen kaasun kulkusuunta näkyy kuvassa 5. Vuotokaasupuhaltimella puhaltimen imu- puolelle tulee tehtaalta lasikuidusta valmistettu vuotokaasujen kokoajaputki ja puhaltimen poistopuo- leen on kytketty vuotokaasupesuri, jossa kaasut pestään ennen savupiippuun yhdistymistä.



KUVA 5. Kaasun kulkusuunta radiaalipuhaltimessa. (Power-MI blog 2023)

Puhaltimen nimellinen pyörimisnopeus on 1115 rpm ja maksimi pyörimisnopeus on 1200 rpm. Puhaltimen moottorin pyörimisnopeus on 1488 rpm, joten puhaltimen pyörimisnopeus on säädetty hihnapyörien avulla oikeaksi. Moottorin akseli pyörii 1488 rpm ja siihen kytketty hihnapyörä on kooltaan 375 mm. Puhaltimen akseliin kiinnitetty hihnapyörä on kooltaan 500 mm. Väliytysuhde on täten  $(375 \text{ mm} / (500 \text{ mm})) = 0,75$ . Moottorin pyörimisnopeus 1488 rpm kerrottuna väliytysuhdeella 0.75 tuottaa puhaltimen pyörimisnopeudeksi 1116 rpm. Näin on saatu pienennettyä moottorin tuottama pyörimisnopeus puhaltimelle sopivaksi ilman taajuusmuuttajaa.

Kuviossa 1 on vuotokaasupuhaltimen puhallinkäyrä mitoitusilanteessa. Mitoitusilanteessa puhallin on pyörinyt nimellinopeudellaan 1115 rpm. Tällä kierrosnopeudella tilavuusvirta  $q_v$  on 29,42 m<sup>3</sup>/s ja kokonaispaine 2777 Pa. Kuvasta voidaan myös lukea puhaltimen hyötysuhde, joka on hieman yli 70 %. Huomioitavaa on myös, että puhaltimen hyötysuhde pysyy melko samana kierrosluvun laskiessa.

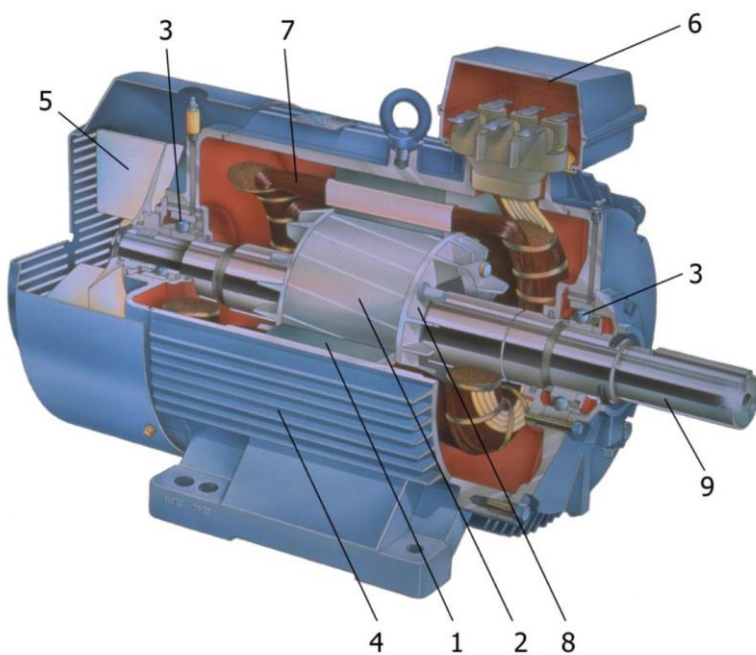


Kuvio 1. Vuotokaasupuhaltimen puhallinkäyrä mitoitusilanteessa.

## 5 AC-KÄYTTÖ

Oikosulkumoottori on teollisuuden yleisin sähkömoottori. Oikosulkumoottorilla on useita ominaisuuksia, jotka ovat tehneet siitä tärkeän teollisuuden prosesseissa. Näistä ominaisuuksista tärkeimpiä ovat:

- Yksinkertainen ja kestävä rakenne, jonka ansiosta oikosulkumoottorit ovat edullisia ja toimintavarmoja
- Erinomainen hyötysuhde ja pienet huoltokustannukset. Oikosulkumoottorissa laakerit ovat käytännössä ainoat kuluvat osat
- Soveltuu useisiin kohteisiin ja kestää vaativiakin olosuhteita (ABB:n TTT-käsikirja 2000–07).



KUVA 5. Oikosulkumoottorin rakenne. Salenius Vili 2023.

1. Staattori	2. Roottori	3. Laakerit
4. Staattorin runko	5. Tuuletin	6. Liitântäkotelo
7. Staattorikäänitys	8. Roottorikäänitys	9. Akseli

Oikosulkumoottorin roottorissa olevaa käämitystä leikkaa pyörivän staattorikentän vuoviivat. Näin roottorisauvoihin indusoituu lähdejännite. Oikosulkumoottorin roottori kohtaa pyörivän staattorikentän, kun roottorikäämitys on sisäisesti oikosuljettu. Indusoituva jännite aiheuttaa käämitykseen virtoja, jotka synnyttävät oman magneettikenttensä. Tämä syntyvä magneettikenttä pyörii samassa tahdissa staattorikentän kanssa ja saa roottorin pyörimään. (Hietalahti, Säädetyt sähkömoottorikäytöt. s. 55–56)

Roottorin pyörimisnopeuden kasvaessa staattorikentän ja roottorisauvojen välinen leikkausnopeus pienenee. Tästä seuraa roottorikäämin lähdejännitteen sekä virran pieneneminen, jolloin myös moottorin vääntömomentti pienenee. Pyörimisnopeus jatkaa kasvamistaan, kunnes koneen sähköinen vääntömomentti ja sitä kuormittava vastamomentti ovat yhtä suuret. Tyhjäkäynnillä pyörivän oikosulkumoottorin staattoriin indusoituva jännite kumoaa ulkoisen jännitteen. Roottorin pyörimisnopeus on aina pienempi kuin staattorikentän pyörimisnopeus. Jos roottorin pyörimisnopeus saavuttaisi staattorikentän pyörimisnopeuden, roottoriin ei syntyisi lähdejännitettä, eikä vääntömomenttia. Tätä pyörimisnopeuden eroa kutsutaan jättämäksi. Jättämä lasketaan kaavalla:

$$s = \frac{n_s - n}{n_s} * 100\% \quad (2)$$

jossa:

$s$  = jättämä

$n_s$  = staattorikentän pyörimisnopeus

$n$  = roottorin pyörimisnopeus

Electrical Data:

Conn	Temp Class	Freq	Voltage	Power	Speed	Current	Power Factor	Efficiency	Torque	IS/IN
Y	--	50 Hz	690 V	132.00 kW	1488 r/min	134.00 A	0.860	95.60 %	847.00 N-m	6.70
D	--	50 Hz	400 V	132.00 kW	1488 r/min	231.00 A	0.860	95.60 %	847.00 N-m	6.70
D	--	50 Hz	415 V	132.00 kW	1489 r/min	225.00 A	0.850	95.60 %	846.00 N-m	7.20

KUVASTA 6. ABB 3GBP312230-ADL moottorin sähköiset tiedot

Kuvasta 6 näemme, että moottorin ilmoitettu pyörimisnopeus on 1488 r/min. Tällä nopeudella tarkoitetaan roottorin pyörimisnopeutta.

Staattorikentän pyörimisnopeus  $n_s$  on 1500 r/min:

$$n_s = 60 * f / p \quad (3)$$

jossa:

f = verkon taajuus

p = napapariluku (4/2=2)

Moottorin absoluuttinen jättämä on tällöin:

$$\Delta n = n_s - n \quad (4)$$

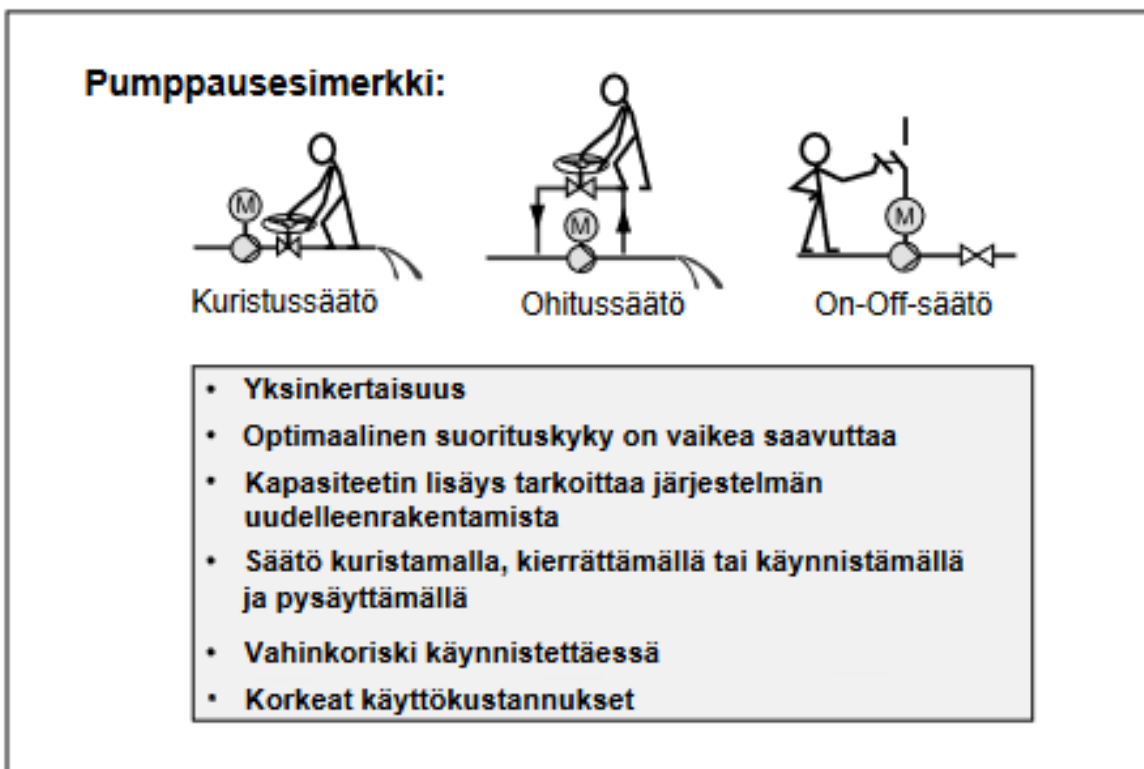
$$\Delta n = 1500 \text{ r/min} - 1488 \text{ r/min} = 12 \text{ r/min}$$

Moottorin suhteellinen jättämä kaavan 2 mukaan on:

$$s = (1500 - 1488) \text{ r/min} / 1500 \text{ r/min} = 0,008 = 0,8 \%$$

Vielä 1980-luvulla oikosulkumoottoreiden käyttöä teollisuudessa rajoitti pyörimisnopeuden hallinnan vaikeus. Oikosulkumoottorien pyörimisnopeutta ei voi säätää tarkasti ja tehokkaasti ilman taajuusmuuttajaa. (ABB tekninen opas nro 4)

Yleisesti käytössä on säätötapoja, jotka eivät kuitenkaan ole optimaalisia sähkönkulutuksen tai prosessintarkkuuden kannalta. Esimerkkejä näistä säätötavoista ovat kuristussäätö, ohitussäätö ja on-off säätö.



KUVA 7. Säätötapoja (ABB tekninen opas nro 4)

Kuvassa 7 on esitetty säätötapoja pumppauskäytössä, mutta esimerkit ja säätötavat pätevät myös puhallinkäyttöön. Ensimmäisessä ja toisessa kuvassa moottori käy jatkuvasti, mutta aineen virtausta hallitaan venttiiliä kuristamalla ja ohitussäädössä avaamalla ohitusventtiiliä. Molemmat säätötavat ovat yksinkertaisia ja edullisia rakentaa, mutta säätötapa kuluttaa turhaan energiaa ja ovat säätämisen kannalta epätarkkoja. Kolmannessa kuvassa moottori ei käy jatkuvasti, mutta jatkuva pois ja päälle kytkentä lisää sähköisen ja mekaanisen vahingon riskiä sekä tuottaa epästabiilin prosessin.

Taloudellisempi ja tarkempi säätötapa on taajuusmuuttajasäätö. Taajuusmuuttajalla saadaan säädettyä moottorin pyörimisnopeutta sen taajuutta muuttamalla. Moottorin teoreettinen tahtinopeus määräytyy sen napapariluvun ja syöttävän verkon taajuuden mukaan:

$$n_s = 60 \frac{f}{p} \quad (5)$$

jossa:

$n_s$  = teoreettinen tahtinopeus

$f$  = syöttävän verkon taajuus

$p$  = moottorin napapariluku

Ennen taajuusmuuttajakäyttöä oikosulkumoottorien pyörimisnopeutta on säädetty muuttamalla niiden napaparilukua, käyttämällä vaihteistoja tai mekaanisia jarruja. Taajuusmuuttajalla moottorin pyörimisnopeutta muuttamalla saavutetaan energiansäästöjä, koska tällöin moottorin nopeutta ei säädetä esimerkiksi jarrua käyttämällä. Taajuusmuuttajakäytössä etuna on myös pienemmän käynnistysvirran käyttäminen, jolloin moottori käynnistyy rauhallisemmin, eikä täten aiheuta yhtä paljoa mekaanista rasitusta. (Sähkönet, Taajuusmuuttajat 2023)

## 5.1 Taajuusmuuttajan toimintaperiaate

Taajuusmuuttajia on erityyppisiä, yleisimpiä taajuusmuuttajatyyppejä ovat syklokonvertteri, virtavälipiirillinen taajuusmuuttaja (LCI; *load commutated inverter*) ja jännitevälipiirillinen taajuusmuuttaja (VSI; *voltage source inverter*). (Sähkönet, Taajuusmuuttajat 2023)

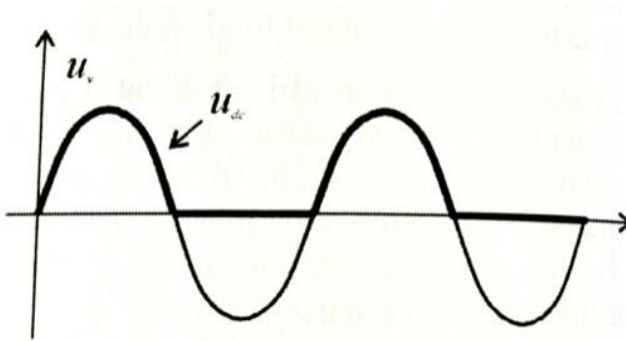
Syklokonvertteri sisältää kolme vastarinnan kytkettyä tyristorisiltaa. Näiden avulla energiaa voidaan ohjata kahteen suuntaan. Syklokonverttereiden huono puoli on niiden lähtötaajuus, joka on noin puolet tulotaajuudesta. Syklokonverttereilla ohjataan yleisesti vain suuria, hitaasti pyöriviä taajuusmuuttajia. Virtavälipiirillinen taajuusmuuttaja on hyvin samantyyppinen, kuin jännitevälipiirillinen, mutta siinä käytetään kapasitanssin sijasta induktanssia tasoittamaan vaihtosuuntaajalta tulevaa virtaa. (Sähkönet, Taajuusmuuttajat 2023)

Oikosulkumoottoreiden taajuusmuuttajina käytetään useimmiten jännitevälipiirillisiä taajuusmuuttajia. Jännitevälipiirillisen taajuusmuuttajan toiminta voidaan jakaa kolmeen eri osaan. Ensin muodostetaan tasajännite verkkojännitteestä. Tämän jälkeen tasajännitteen aaltoisuutta tasoitetaan välipiirissä kondensaattorilla. Lopuksi tasajännitteestä muodostetaan vaihtojännite moottorille vaihtosuuntaajalla. Vaihtosuuntaajan syöttämää taajuutta hallitaan ohjauselektroniikan avulla. (Sähkönet, Taajuusmuuttajat 2023)

### 5.1.1 Tasasuuntaus

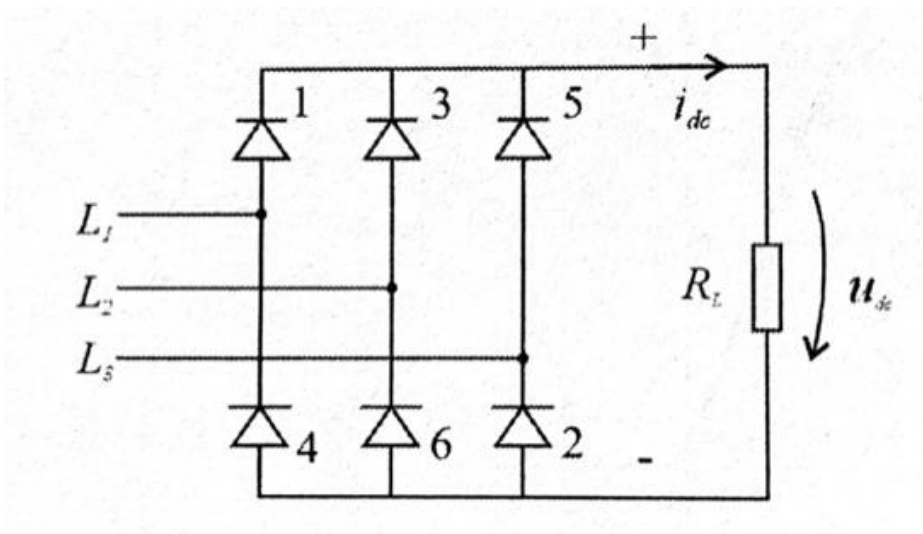
Yksinkertaisin tapa suorittaa tasasuuntaus on kytkeä diodi kuormitusvastuksen kanssa sarjaan. Näin siniaallosta käytetään vain toista puolta, tätä kutsutaan puoliaaltotasajakytkennäksi.

Kuvassa on esitetty kytkentä, jossa on sarjaan kytketty diodi ja kuormitusvastus. Kytkenä suodattaa siniaallon niin, että vain yläpuolella näkyvä positiivinen jännite pääsee läpi. Negatiivinen jännite suodattuu pois.

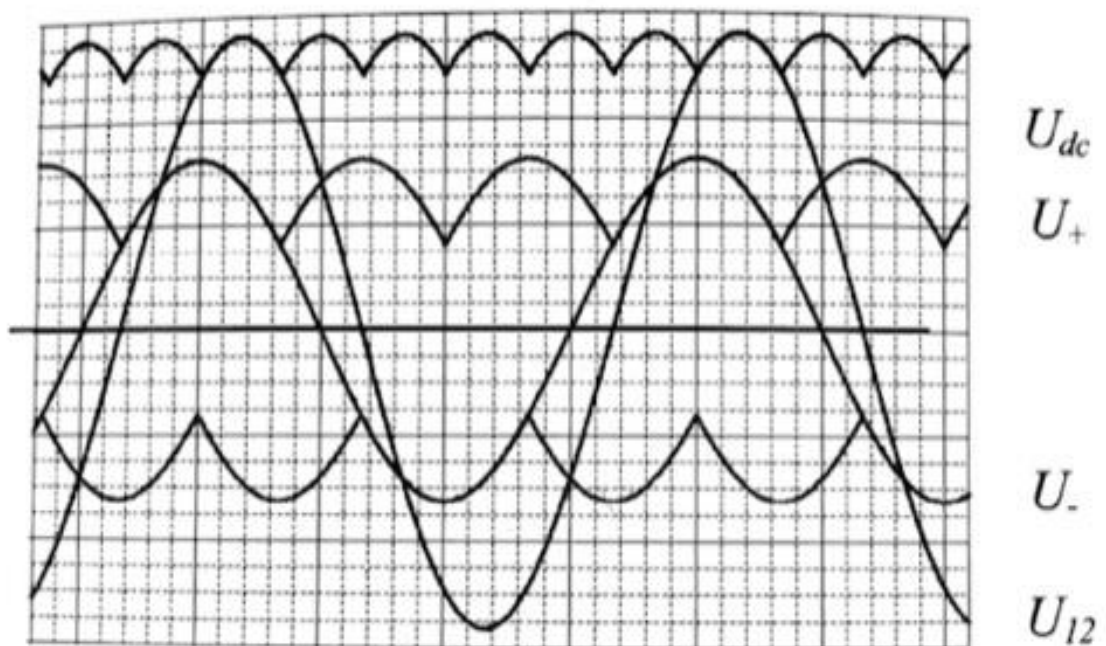


KUVIO 2. Puoliaaltotasaus (Sähkövoimatekniikan perusteet, s.178)

Suuremmilla sähkötehoilla, tyypillisesti yli 2 kW:n teholuokassa ja kun tarvitaan hyvälaatuista tasajännitettä, käytetään kolmivaiheista siltakytkentää. Kolmivaiheinen tasasuuntaus rakennetaan kolmesta diodisiltaparista. Kytkennässä muodostuu tasajännitekisko. Kuviossa 3 positiiviseen kiskoon diodeista kytkeytyy 1, 3 ja 5. Negatiiviseen kiskoon diodeista kytkeytyy 4, 6 ja 2. (Hietalahti, Sähkövoimatekniikan perusteet. s 178, 184)



KUVIO 3. Kolmivaiheinen siltakytkenä. (Sähkövoimatekniikan perusteet, s.184)



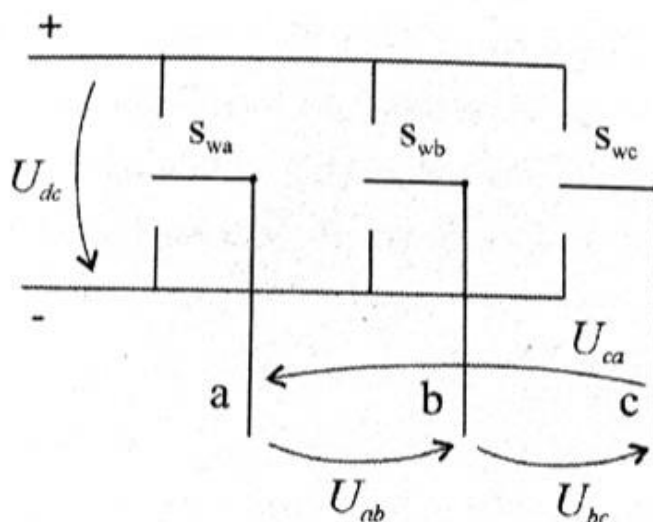
KUVIO 4. Kolmivaiheisen siltakytkenän muodostama tasajännite. Kuvassa  $U_{12}$  kuvaa verkon pääjännitettä,  $U_+$  ja  $U_-$  muodostunutta tasajännitettä ja  $U_{dc}$  tasajännitekiskojen välistä jännitettä. (Sähkövoimatekniikan perusteet, s.184)

### 5.1.2 Välipiiri

Välipiirissä on kela ja kondensaattori ja välipiirin tehtävä on suodattaa tasajännitteen epäpuhtauden tasaten taajuus. Usein välipiirissä on ylimääräinen vastus, jolla kulutetaan moottorilta jarrutuksessa palautuva energia. Välipiiristä voidaan myös ottaa ohjauskomponenttien tarvitsema jännite, mutta usein tämä tuodaan taajuusmuuttajaan ulkopuolelta. (Sähkövoimatekniikan perusteet, s.189)

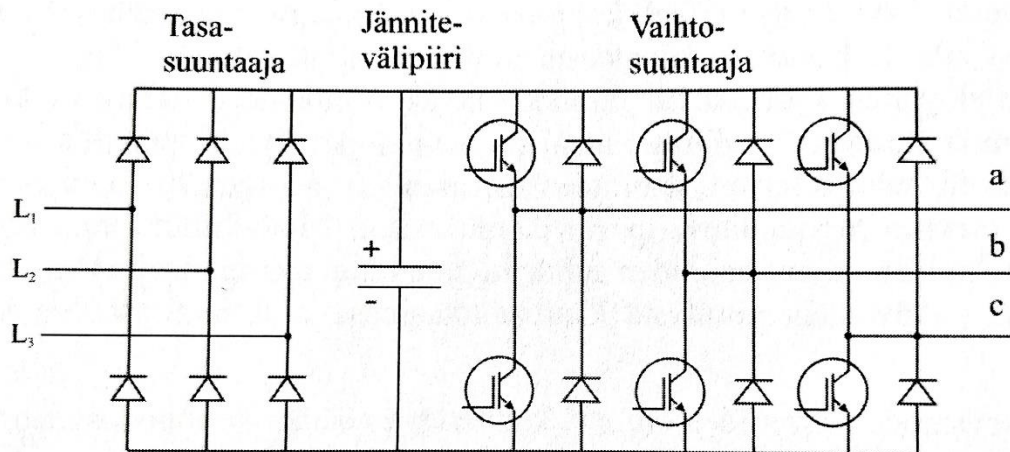
### 5.1.3 Vaihtosuuntaus

Lopuksi on vielä suoritettava vaihtosuuntaus eli tasajännitteen muuttaminen säädettävätaajuiseksi vaihtojännitteeksi. Vaihtosuuntaaja voidaan mallintaa kytkinmallilla. Kytkimet voivat olla kytkettynä joko positiiviseen jännitekiskoon tai negatiiviseen jännitekiskoon. Ohjaamalla näitä kytkimiä halutulla pulssitaajuudella saadaan aikaiseksi esimerkiksi  $120^\circ$ :n vaihe-erolla oleva kolmivaihejännite. (Sähkövoimatekniikan perusteet, s.189)



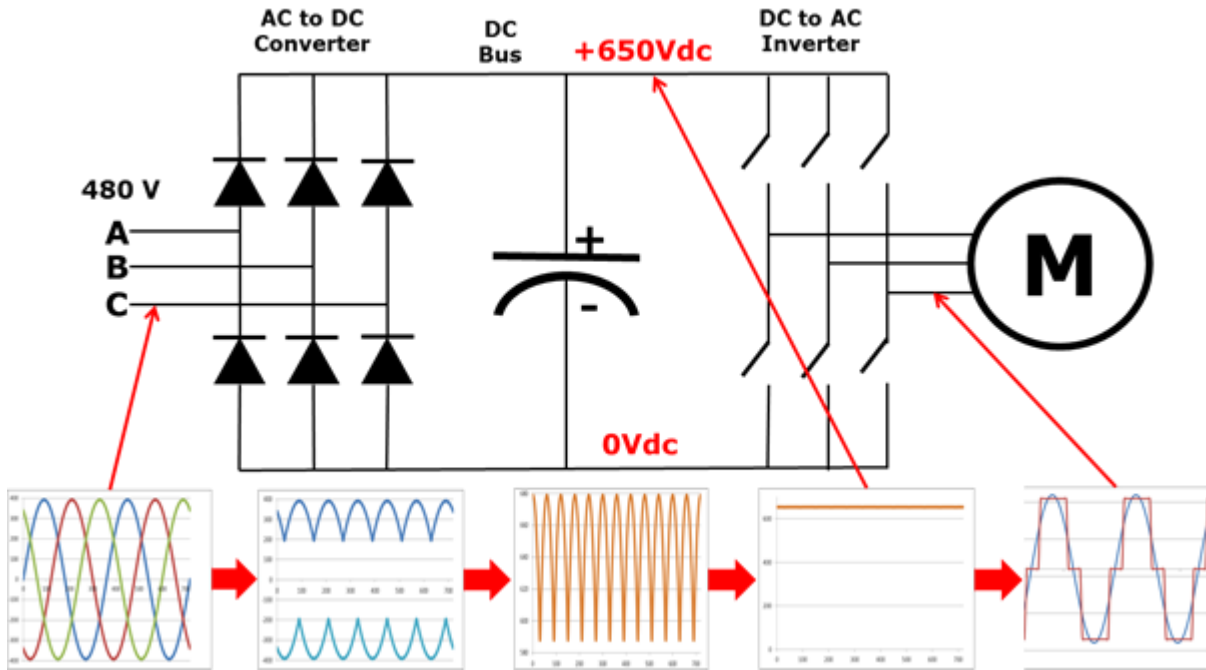
Kuvio 5. Vaihtosuuntaajan mallinnus kytkinmallilla. (Sähkövoimatekniikan perusteet, s.189)

Todellisuudessa vaihtosuuntaus tehdään esimerkiksi IGBT-transistoreilla, joiden rinnalle on kytketty nolladiodit. Nämä komponentit muodostavat yhdessä kuusi puolijohdekatkojaa, jotka kytkävät tahdissa tasajännitteen positiivisen ja negatiivisen kiskon, muodostaen moottorille vaihtojännitteen. Kuviossa 6 on kytkentäkaavio, jossa on tasasuuntaaja, jännitevälipiiri ja vaihtosuuntaaja. Tästä yhdistelmästä koostuu taajuusmuuttaja.



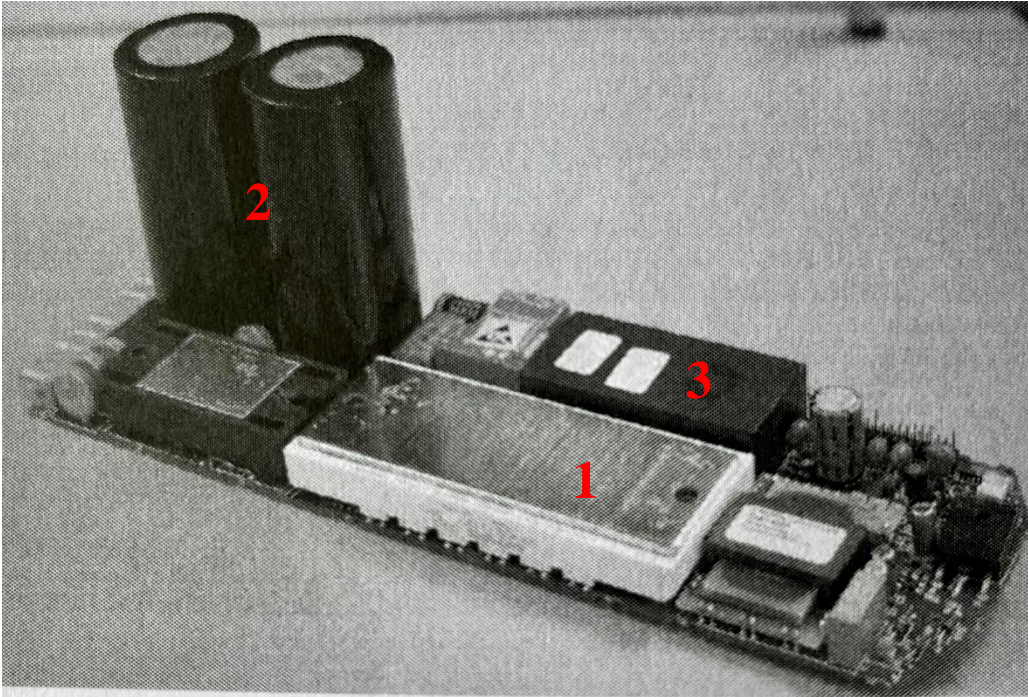
KUVIO 6. Taajuusmuuttajan kytkentä. (Sähkövoimatekniikan perusteet, s.192)

Kuviossa 7 näemme välipiirillisen taajuusmuuttajan toimintaperiaatteen. Vasemmalla on taajuusmuuttajan syöttöjännite verkosta. Verkkajännite ohjataan kolmivaiheiseen dioditasasuuntaussiltaan, josta välipiiriin syötetyn tasajännitteen keskiarvo on vakio. Kytkentäkuvan kuvan alta näemme, kuinka vaihtojännitteen sinimuotoinen taajuus muuttuu tasajännitteeksi kulkiessaan dioditasasuuntaussillan lävitse ja takaisin vaihtojännitteeksi vaihtosuuntaajan jälkeen.



KUVIO 7. Välipiirillinen taajuusmuutaja (What is a Variable Frequency Drive 2023)

Kuvassa 8 on taajuusmuuttajan tehopuolijohteet sijoitettuna piirilevyllä. Piirilevyn alareunassa numerolla 1 on merkittynä tasasuuntaaja. Tasasuuntaajan jälkeen tulevat jännitevälipiirin kondensaattorit ovat vasemmassa ylänurkassa merkittynä numerolla 2. Vaihtosuuntaaja on tasasuuntaajan vieressä merkittynä numerolla 3.



KUVA 8. Tehopuolijohteiden sijoittelu piirilevyllä. (Mukaiillen Sähkövoimatekniikan perusteet, s.192)

## 5.2 Taajuusmuuttajan ohjaus

Taajuusmuuttajissa on monia reaaliaikaisia mittauksia. Moottorille menevää jännitettä ja virtaa mitataan koko ajan. Tämä mittaustieto välitetään taajuusmuuttajan ohjausyksikköön, jossa on parametroidut asetusarvot moottorille. Mikäli mittaustieto ja asetusarvot eivät vastaa toisiaan, säätää taajuusmuuttajan ohjauselektronikka vaihtosuuntaajaa. Reaaliaikaista mittaustietoa kerätään myös vaihtosuuntaajilta sekä syöttävästä verkosta. Jännitevälipiirillisen taajuusmuuttajien ohjaus perustuu skalaarisäätöön, skalaariverkkosäätöön tai momenttisäätöön. (Sähkönet, Taajuusmuuttajat 2023)

Taajuusmuuttajaa voidaan ohjata joko:

- Taajuusmuuttajan ohjauspaneelin kautta
- I/O väylän kautta jännitesignaalilla
- Analogiaviesteillä tai
- Kenttäväylän kautta (esimerkiksi Profibus tai Profinet).

Kenttäväylän kautta tapahtuva ohjaus on teollisuudessa yleisin käytetty ohjaustapa, koska tätä kautta saadaan taajuusmuuttajan hälytykset ja muut tarvittavat tiedot suoraan prosessinohjausjärjestelmään. (Sähkönet, Taajuusmuuttajat 2023)

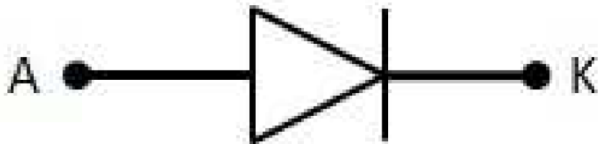
Kuvassa 9 on ABB:n pienikokoinen 15 kW:n taajuusmuuttaja. Taajuusmuuttajan etupaneelissa on ohjauspaneeli, josta taajuusmuuttajaa saadaan ohjattua käsin sekä tehtyä tarvittavat parametroidit.



KUVA 9. ABB ACS880 taajuusmuuttaja. (ABB tarkemmat tiedot ACS880)

### 5.3 Taajuusmuuttajan komponentit

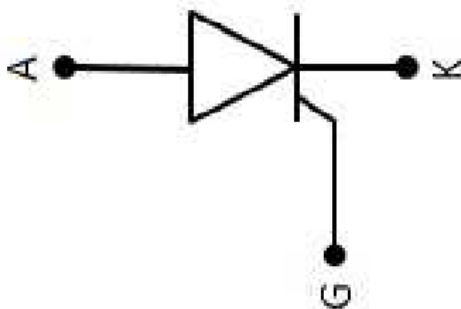
**Diodi** on yksinkertainen komponentti, joka päästää virtaa vain yhteen suuntaan. Diodi koostuu anodista ja katodista. Virta kulkee vain anodilta katodille. Piirrosmerkistä näemme, että virta kulkee vain nuolen osoittamaan suuntaan. Nuolen suuntaan virta kulkee esteettömästi.



KUVIO 8, Diodin piirrosmerkki

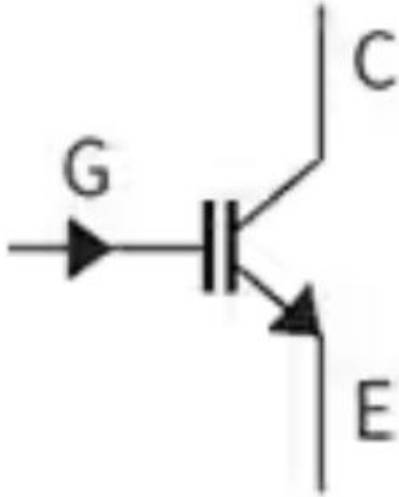
Kun virta kulkee nuolen suuntaisesti, sanotaan diodin olevan päästösuunnassa, jos virta yrittää kulkea katodilta anodille sanotaan sen olevan estosuunnassa. (Sähkötekniikka ja elektroniikka)

**Tyristori** on hyvin samantyyppinen komponentti kuin diodi. Tyristorissa on anodin ja katodin lisäksi hila (G, gate). Virta ei pääse tyristorin läpi edes nuolen osoittamaan suuntaan, ennen kuin tyristorin hilalle tuodaan ohjausvirtapulssi. Kun ohjausvirtapulssi on tuotu hilalle, alkaa virta kulkemaan anodilta katodille. Hilalla ei tarvitse olla jatkuvasti virtaa, vaan tyristori pysyy päästävänä niin kauan kun virta kulkee, piirrosmerkkiin nähden oikeaan suuntaan. (Sähkötekniikka ja elektroniikka)



KUVIO 9, Tyristorin piirrosmerkki

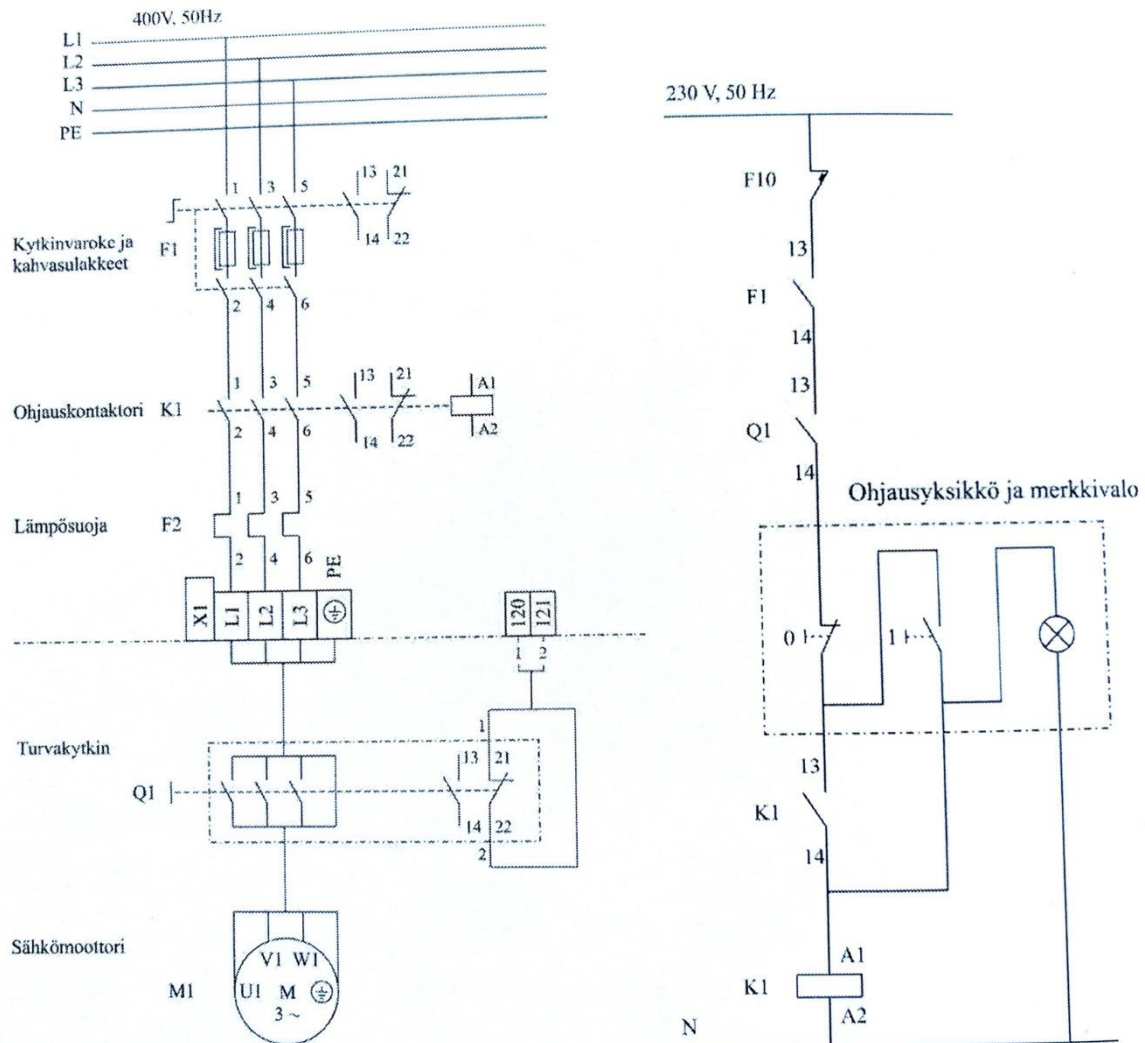
**IGBT-Transistori** (*insulated gate bipolar transistor*). IGBT-transistorilla saadaan kytkettyä sähkövirtoja nopeasti pienellä häviöllä. Erona tyristoriin on, että virran kulku voidaan katkaista anodilta kato-dille, ilman, että virtaa katkaistaan. Ohjaamalla hilan ohjausjännitettä, voidaan virta katkaista nopeasti. IGBT-transistori on tyypillisin komponentti, jolla vaihtosuuntaus nykyään toteutetaan. Transistori on täysin ohjattavissa. (Sähkötekniikka ja elektroniikka)



KUVIO 10. IGBT-transistorin piirrosmerkki

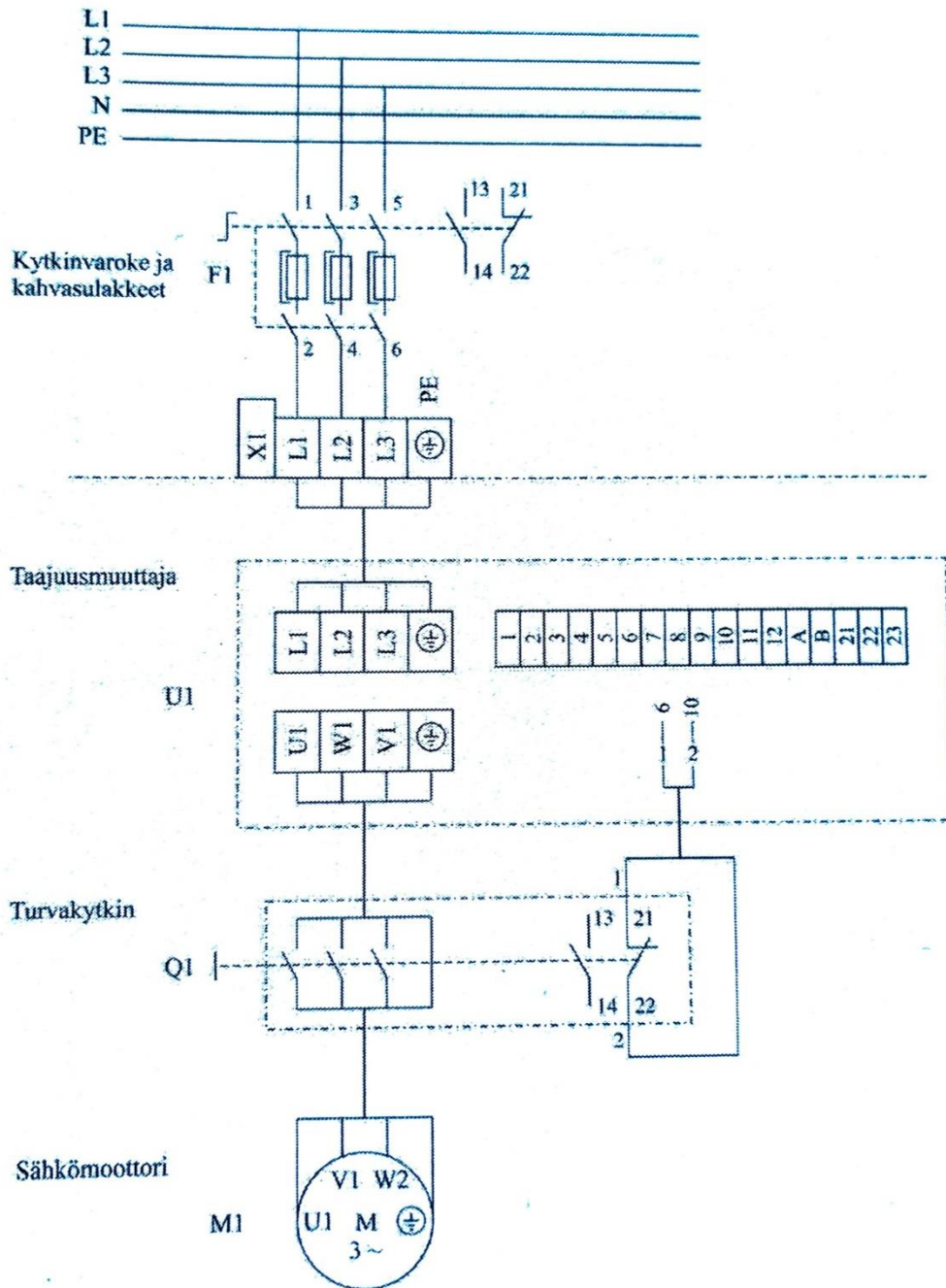
## 6 TAAJUUSMUUTTAJAKÄYTÖN KYTKENTÄ

Kuvassa 10 on esitettyä suoraan verkkoon kytketyn sähkömoottorikäytön piirikaavio. Moottorin käyntiä ohjataan kontaktorilla K1, joka saadaan vetämään ohjauspiirikaaviossa näkyvästä painikkeesta 1. Kontaktori jää vetäneeseen tilaan omien apukärkiensä avulla 13–14. Moottori saadaan pysäytettyä painikkeesta 0. Moottorin pysähtymisen aiheuttaa myös ylivirtasuojan F1 laukaisu tai turvakytkimen Q1 avaus. Ohjauspiirikaaviossa oleva merkkivalo näyttää käytön tilan, kun painike 1 on painettuna ja moottori pyörii palaa myös merkkivalo. Valo sammuu samalla, kun moottorin virtapiiri katkeaa. (Sähkövoimatekniikan perusteet, s.248)



KUVA 10. Suoraan verkkoon kytketyn sähkömoottorikäytön piirikaavio. (Sähkövoimatekniikan perusteet, s.248)

Kytentäkaavio taajuusmuuttajan kanssa on hyvin samankaltainen, kuin suoraan verkkoon kytketyssä käytössä. Taajuusmuuttaja korvaa kontaktorin K1 ja tällöin moottorin ohjaus tapahtuu taajuusmuuttajan avulla, joko sen etupaneelistai tai yleisemmin kenttäväylän kautta. Oikosulkusuojaukseen tulee kiinnittää erityistä huomiota taajuusmuuttajakytkennässä, koska sulakkeiden pitää olla riittävän nopeita suojatakseen taajuusmuuttajan tehoelektroniikkaa. (Sähkövoimatekniikan perusteet, s.254)



KUVA 11. Taajuusmuuttajan käyttö moottorilähdössä. (Sähkövoimatekniikan perusteet, s.254)

## 7 VUOTOKAASUPUHALTIMEN ENERGIANKULUTUS JA UUDET AJOTAVAT

Ensimmäisenä on selvitettävä sähkömoottorin energiankulutus nykytilanteessa. Sähkömoottorin teho lasketaan kaavalla 6 (Motiva 2023).

$$P_1 = \frac{P_2}{\eta_m * \eta_s * \eta_v} \quad (6)$$

jossa

$P_1$  = puhaltimen ottama sähköteho [W],

$P_2$  = puhaltimen akseliteho [W],

$\eta_m$  = sähkömoottorin hyötysuhde [%],

$\eta_s$  = säädön hyötysuhde [%] ja

$\eta_v$  = voimansiirron hyötysuhde [%].

Koska kohteessa ei vielä ole taajuusmuuttajaa, jätetään säädön hyötysuhde kaavasta pois. Kaavaan lisätään kuitenkin voimansiirron hyötysuhde, joka on kiilahihnakäytössä parhaimmillaan noin 95 % ja käyttöiän myötä laskee jopa 5 % hihnojen löystymisen ja kulumisen takia. Hammashihnakäytössä hyötysuhde on jopa 98 %, joten tässä kohteessa siirtyminen kiilahihnakäytöstä hammashihnakäyttöön olisi myös järkevää. (U.S. Department of energy 2023). Kiilahihnat ovat ennakkohuolto-ohjelman piirissä, joten niitä kiristetään ja vaihdetaan usein. Oletetaan täten voimansiirron hyötysuhteeksi 95 %. Puhaltimen akseliteho nähdään puhaltimen konekortista, joka on esitetty kuvassa 12.

Tyyppi	KSMB-100-3-RD105Z-1660-2-1-ER-KT		
Laitetunnus	Vuotokaasuilmapuhallin		
		Atex -luokka: -	
Paino ilman moottoria	3600 kg	Valmistusvuosi	
Tiheys	1,04 kg/m <sup>3</sup>	Pyörimisnopeus	1115 1/min
Tilavuusvirta	29,42 m <sup>3</sup> /s	Maks. pyörimisnopeus	1200 1/min
Kokonaispaine	2777 Pa	Imupuolen lämpötila	20 °C
Akseliteho	109,2 kW	Maks. imupuolen lämpötila	40 °C

KUVA 12. Vuotokaasupuhaltimen konekortti.

Teorian tueksi moottorin todellinen teho mitattiin pihtivirtamittaria apuna käyttäen. Vaihevirraksi mitattiin 195 A. Kolmivaihemoottorin teho saadaan laskettua kaavalla 7.

$$P_{\text{syöttö}} = \sqrt{3} * U * I * \cos\varphi \quad (7)$$

jossa

$P_{\text{syöttö}}$  = teho [W],

U = jännite [V],

I = vaihevirta [A] ja

$\cos\varphi$  = vaihekulma [°].

Vuotokaasupuhaltimen moottorin mitattu teho suorakytkennällä on:

$$\sqrt{3} * 400V * 195 A * 0,86 = 116 185,97 W \approx 116,2 kW$$

Vuotokaasupuhaltimen moottorin teho käyttämällä puhaltimen akselitehoa kaavan 6 mukaisesti:

$$P_1 = \frac{109,2 kW}{0,956 * 0,925} = 120,23 kW \quad (6)$$

Mitatun tehon ja laskennallisen tehon noin 3,3 %, joka riittää laskentatarkkuudeksi, kun lasketaan teoreettista säästöä uudella ajotavalla. Jatkossa laskennan helpottamiseksi käytetään puhaltimen akselitehosta johdettua 120,23 kW:n tehoa.

Puhaltimen tehosta saadaan vuosikulutus kilowattitunneissa kaavalla 8.

$$E_{vuosi} = P * t \quad (8)$$

jossa

$E_{vuosi}$  = energiankulutus vuodessa [kWh],

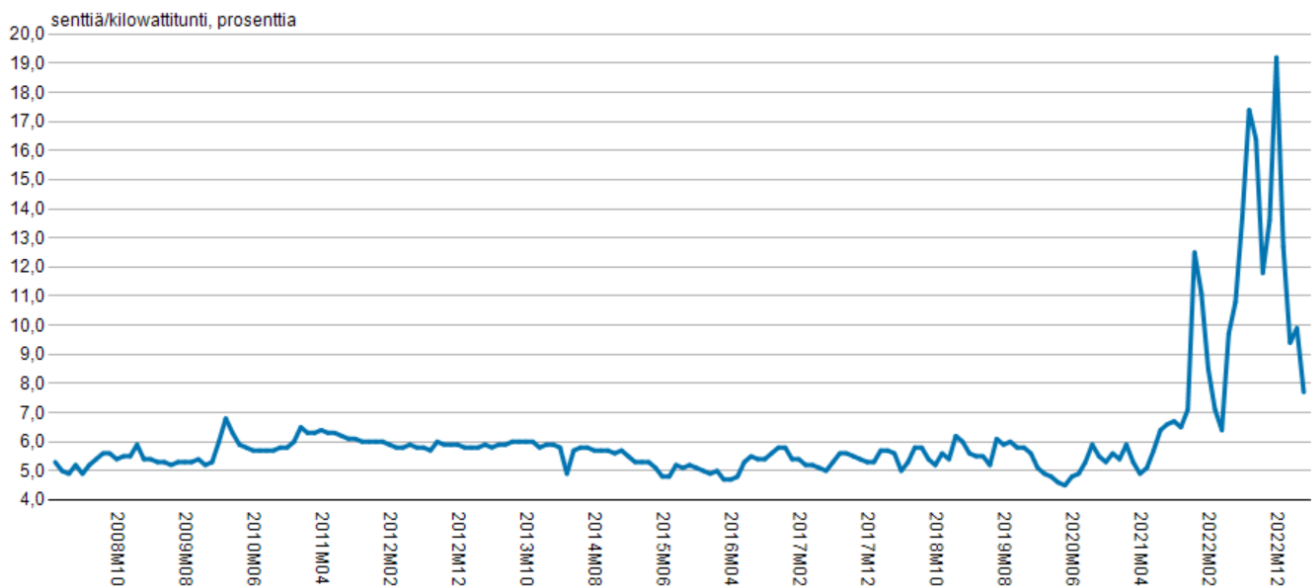
P = teho [kW] ja

t = aika [h].

Vuotokaasupuhaltimen moottori on jatkuvasti käytössä, joten kulutus on:

$$120,23 \text{ kW} * 8760 \text{ h} = 1\,053\,214,8 \text{ kWh} / \text{a}$$

Sähkön hinta on viime vuosina heilahdellut rajusti. Kuviossa 11 on esitettyä sähkön kokonaishinta vuodesta 2008 alkaen yrityksille, joiden vuosikulutus on yli 70 000 MWh. Kuviossa näkyy sähkön hin-  
nan voimakas heilahtelu vuoden 2021 keskivälistä alkaen. Keskimäärin sähkön hinta on ollut noin 6 snt/kWh. Käytetään laskuissa keskimääräisenä hintana 8 snt/kWh viime vuosien takia.



KUVIO 11. Sähkön kokonaishinta yritysasiakkaille, joiden vuosikulutus on >70 000 MWh (Tilastokeskus)

Kertomalla vuotokaasupuhaltimen vuotuinen sähkönkulutus keskimääräisellä sähkön hinnalla saadaan laskettua vuotokaasupuhaltimen vuosikulutus euroissa:

$$1\,053\,214,8 \text{ kWh} * 0,08 \text{ €} = 84\,257,18 \text{ €}.$$

Esimerkkihinta ABB:n 132 kW:n taajuusmuuttajasta on noin 7500 €. Taajuusmuuttajan asennuksen lisäksi pitää se ohjelmoida automaatiojärjestelmään, joten voimme arvioida taajuusmuuttajan asennuksen kokonaishinnaksi noin 8500 €. Keskimääräisellä sähkön kokonaishinnalla 0,08 € / kWh taajuusmuuttajan asennuksesta koituvat kustannukset säästetään takaisin jo 106 250 kWh:n säästöllä.

Affiniteettisääntöjen avulla voidaan laskea säästömahdollisuuksia, kun puhaltimen kierrosnopeutta säädetään taajuusmuuttajan avulla. Teoreettisen tehon affiniteettisääntö on kuvattu kaavassa 9. Kaavasta käy ilmi, että teho on kierrosnopeuden kolmanteen potettiin verrannollinen, joten pienikin pudotus kierrosnopeudessa vaikuttaa erittäin paljon.

$$\frac{P_1}{P_0} = \left(\frac{n_1}{n_0}\right)^3 \quad (9)$$

jossa,

$P_1$  = teho lopputilanteessa [W],

$P_0$  = teho alkutilanteessa [W],

$n_1$  = kierrosluku lopputilanteessa [rpm] ja

$n_0$  = kierrosluku alkutilanteessa [rpm].

Kuvasta 6 nähdään, että puhaltimen hyötysuhde ei laske merkittävästi kierroslukua pienennettäessä. Myöskään sähkömoottorin hyötysuhde ei merkittävästi laske kuormaa pienentäessä. Vasta kun sähkömoottorin osakuorma laskee alle 50 %:n, alkaa hyötysuhde laskemaan. Puhaltimen ja moottorin hyötysuhteita ei siis tarvitse tässä tapauksessa ottaa laskuissa huomioon.

Seuraavaksi tarkastellaan puhaltimen akselitehoa kaavaa 9 käyttäen jos puhaltimen kierrosluku lasketaan 115 rpm alemmaksi, eli uusi kierrosnopeus olisi 1000 rpm.

$$P_1 = 109,2 \text{ kW} * \left(\frac{1000 \text{ rpm}}{1115 \text{ rpm}}\right)^3 = 78,77 \text{ kW} \quad (9)$$

Sähkömoottorin teho lasketaan kaavalla 6. Nyt otetaan huomioon myös taajuusmuuttajan hyötysuhde, joka on keskimäärin 96 % (ABB tarkemmat tiedot ACS880)

$$P_1 = \frac{78,77 \text{ kW}}{0,956*0,95*0,96} = 90,35 \text{ kW} \quad (6)$$

Kaavan 8 mukaisesti sähkömoottorin uusi vuosikulutus olisi:

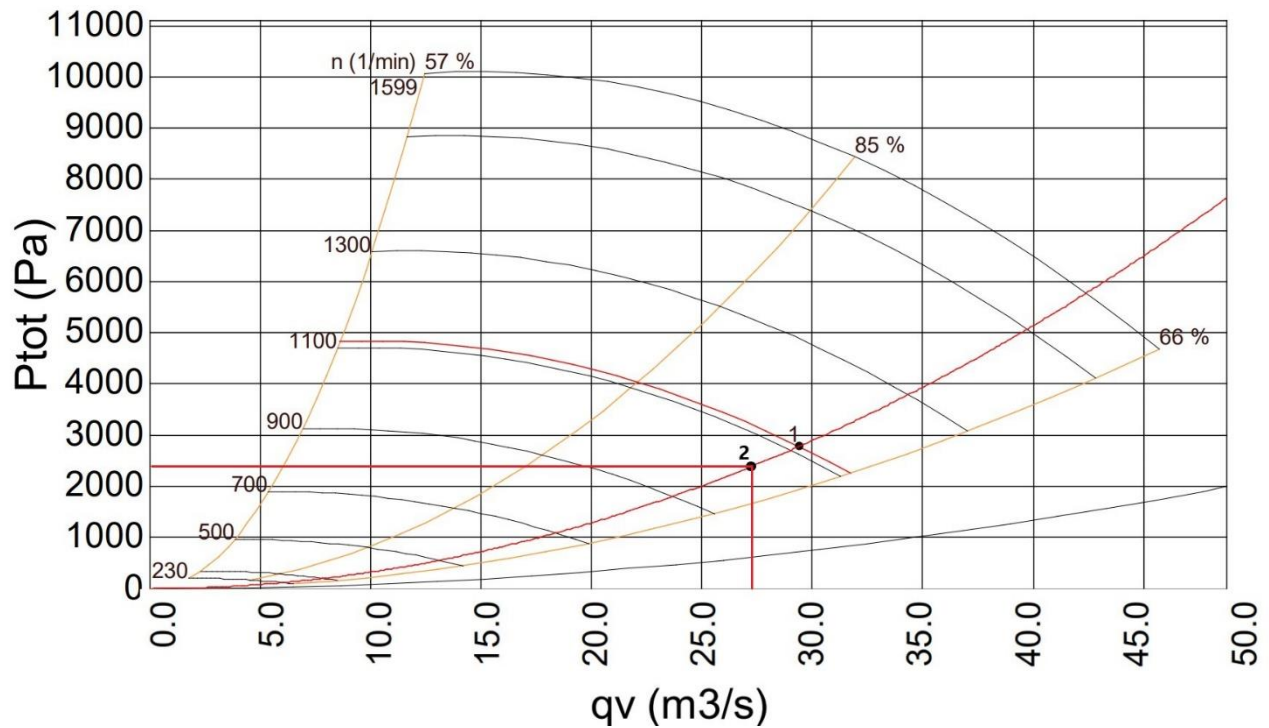
$$90,35 \text{ kW} * 8760 \text{ h} = 791 466 \text{ kWh.} \quad (8)$$

Energiansäästö vuodessa:

$$1 053 241,8 - 791 466 \text{ kWh} = 261 775,8 \text{ kWh}$$

0,08 € /kWh keskihinnalla euroissa säästöä vuosittain tulisi 20 942 €. Taajuusmuuttajan investointikustannukset säästettäisiin takaisin noin 148 päivässä.

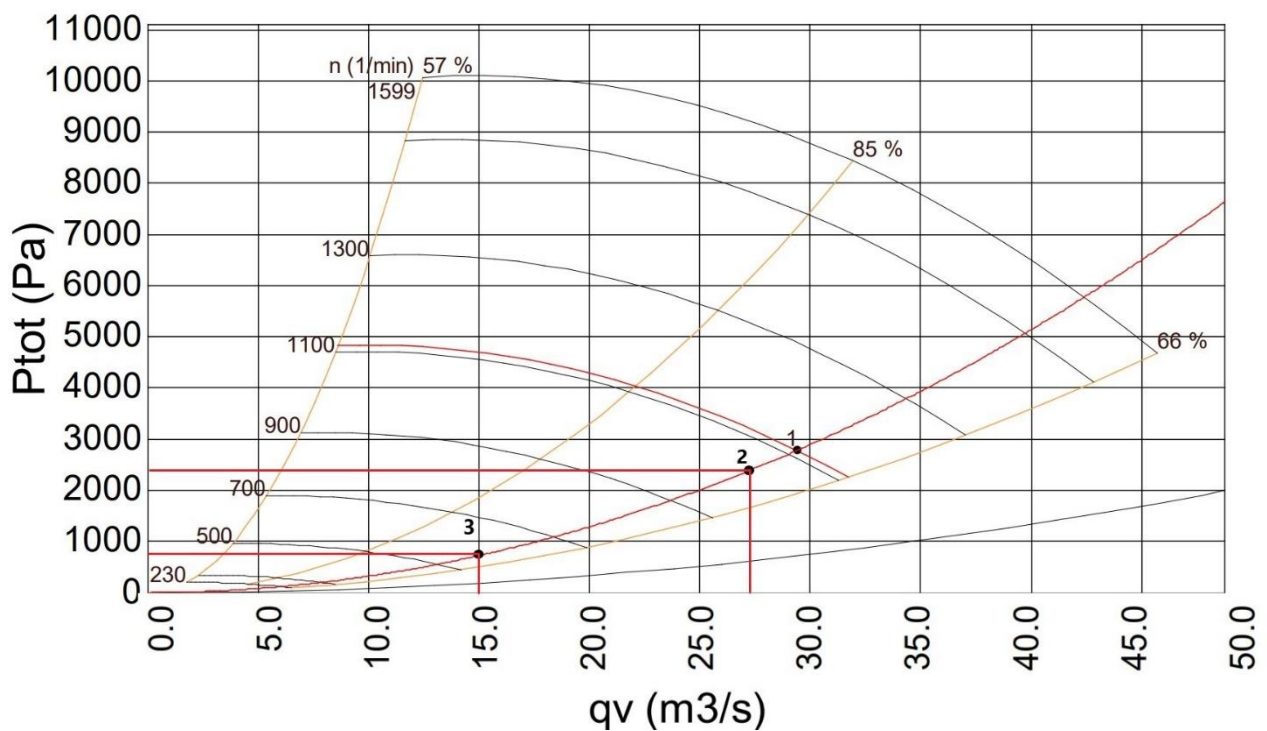
Uusi puhallinkäyrä on hahmoteltu kuvassa 24. Uusi tilavuusvirta olisi noin  $27 \text{ m}^3/\text{s}$ , kun  $1115 \text{ rpm}$ :n kierrosnopeudella se on  $29,42 \text{ m}^3/\text{s}$ . Uusi kokonaispaine olisi noin  $2500 \text{ Pa}$ , kun vanhalla pyörimisnopeudella kokonaispaine on  $2777 \text{ Pa}$ . Puhaltimen säädöstä ei ole vielä kokemuksia, koska se on ollut aina suorakytkettynä, joten käytännön kokemukset vasta kertovat, mikä kierrosnopeus on sopiva.



KUVIO 12. Puhallinkäyrä  $1000 \text{ rpm}$ :n kierrosnopeudella.

Taajuusmuuttajakäyttöisenä vuotokaasupuhaltimen ei tarvitsisi olla jatkuvasti isoilla tehoilla käytössä, vaan sen tehoa voitaisiin pienentää aina silloin, kun käyttäjät eivät ole uunihoitokierroksella. Uunihoitokierros kestää keskimäärin yhden tunnin ja vuorokaudessa tehdään neljä kierrosta.

Seuraavaksi tarkastellaan säästöpotentiaalia, jos puhallinta ajettaisiin normaalisti pienellä teholla ja kierrosnopeutta nostetaan ainoastaan sille ajalle, kun uunihoitokierros aloitetaan. Käytetään tässäkin tapauksessa teoreettisen tehon affiniteettisääntöä kaavan 9 mukaan ja kierrosnopeudeksi asetetaan 600 rpm, jolloin tilavuusvirta on  $15,0 \text{ m}^3/\text{s}$  ja kokonaispaine noin 800 Pa.



KUVIO 13. Puhallinkäyrä 600 rpm:n kierrosnopeudella

$$P_1 = 109,2 \text{ kW} * \left(\frac{600 \text{ rpm}}{1115 \text{ rpm}}\right)^3 = 17,02 \text{ kW} \quad (9)$$

600 rpm:n kierrosnopeudella sähkömoottorin osakuorma laskee alle 50 %:iin, joten hyötysuhteena ei voida käyttää samaa hyötysuhdetta kuin aiemmissa laskuissa. Motiwatti 2.0 laskentaohjelmassa on esitetty oikosulkumoottorin hyötysuhteen alenemaa, kun kuormitus pienenee alle 50 %:iin.

Hyötysuhde alenee 2 %-yksikköä kun osakuorma pienentyy 50 %:sta 40 %:iin. Hyötysuhde alenee 10 %-yksikköä kun osakuorma pienentyy 40 %:sta 20 %:iin. Hyötysuhde alenee 20 %-yksikköä kun osakuorma pienentyy 20 %:sta 10 %:iin. (Shemeikka & Hietaniemi s.46 2003)

Tässä tapauksessa osakuorma pienentyy noin 15 %:iin, joten käytetään moottorin hyötysuhteena

$$95,6 \% - 15 \% \text{-yksikköä} = 80,6 \%$$

Sähkömoottorin teho kaavan 6 mukaisesti 600 rpm:n kierrosnopeudella on:

$$P_1 = \frac{17,02 \text{ kW}}{0,806 * 0,95 * 0,96} = 23,15 \text{ kW} \quad (6)$$

Sähkömoottorin teho olisi vain 23,15 kW puhaltimen ylläpitoonopeudella, josta se nostettaisiin 90,35 kW:n tehoon hoitokierroksen ajaksi. Sähkönkulutus kaavan 8 mukaisesti tällä ajotavalla olisi:

$$7300 \text{ h} * 23,15 \text{ kW} + 1460 \text{ h} * 90,35 \text{ kW} = 300\,906 \text{ kWh} \quad (8)$$

Energiansäästö vuodessa lähtökohtaan verrattuna:

$$1\,053\,241,8 - 300\,906 \text{ kWh} = 752\,335,8 \text{ kWh}$$

0,08 € /kWh keskihinnalla euroissa säästöä vuosittain tulisi 60 187 €. Taajuusmuuttajan investointikustannukset tällä ajotavalla säästettäisiin takaisin noin 51 päivässä.

## 8 YHTEENVETO

Tämän insinööriyön tavoitteena oli tutustua Yara Kokkolan kaliumsulfaattitehtaan vuotokaasupuhallinjärjestelmään ja selvittää, olisiko uudella toimintatavalla saavutettavissa kustannussäästöjä. Työn teoriaosuudessa käsiteltiin oikosulkumoottorien, taajuusmuuttajien sekä puhaltimien toimintaa ja komponentteja. Hankaluuksia työssä aiheutui energiankulutuksen mittaamisessa, koska todelliset käyttöpiisteet puhaltimelle voidaan hakea vasta taajuusmuuttajan asennuksen jälkeen. Työssä esitetyt toimintapisteet kuitenkin vaikuttavat järkeviltä ja ne tuottaisivat suuren säästön energiankulutuksessa, joka tukee hyvin yrityksen tavoitteita energiankulutuksen pienentämisessä. Vuotokaasupuhaltimen energiankulutusta saataisiin uudella toimintatavalla pienennettyä noin 71 %. Työn tuloksien perusteella vaikuttaa selvältä, että taajuusmuuttaja kannattaa asentaa tähän kohteeseen, vaikka lopulta ajotavat hieman poikkeaisivatkin työssä esitetyistä. Investointikustannuksena taajuusmuuttajan asennus on pieni kulu, jolla on saavutettavissa huomattaviakin säästöjä.

Tulevaisuudessa, kun puhaltimen moottori pitää uusia ja vaihtaa IE4-luokan moottoriksi, voidaan myös miettiä, pitäisikö moottorin kokoa pienentää, jolloin hyötysuhde parantuisi puhaltimen pyöriessä pienemmillä kierroksilla. Moottorin uusimisen yhteydessä kannattaa myös pohtia vaihdettaisiinko kiilahihnat hammashihnaksi, jolloin voimansiirron hyötysuhde parantuisi nykyisestä ~95 %:sta 98 %:iin. Vaihtamalla energiatehokkaampi IE4-luokan moottori ja vaihtamalla kiilahihnat hammashihnaksi AC-käytön kokonaishyötysuhde nousisi nykyisestä 87 %:sta 90,7 %:iin.

Insinööriyö onnistui kokonaisuudessaan hyvin ja sillä saatiin aikaiseksi hyvä pohja investoinnille sekä uudelle ajotavalle.

## LÄHTEET

ABB elinkaarilaskuri. Saatavissa: <https://wwwmotors.fi.abb.com/>. Viitattu 01.9.2023

ABB 3GBP312230-ADL moottorin sähköiset tiedot. Saatavissa: <https://new.abb.com/products/3GBP312230-ADL/3gbp312230-adl>. Viitattu 01.9.2023

ABB tarkemmat tiedot ACS880. Saatavissa: <https://new.abb.com/products/fi/3AUA0000107993/acs880-01-032a-3>. Viitattu 01.9.2023

ABB tekninen opas nro 4. Saatavissa: [https://library.e.abb.com/public/32f0404329db7689c1256d2800411f0a/Tekninen\\_opas\\_nro4.pdf](https://library.e.abb.com/public/32f0404329db7689c1256d2800411f0a/Tekninen_opas_nro4.pdf)

ABB tekninen opas nro 7. Saatavissa: [Tekninen\\_opasnro7.pdf \(abb.com\)](#)

ABB:n TTT-käsikirja 2000-07 Saatavissa: [https://heikkilaakso.com/opetus/abb/180\\_0007.pdf](https://heikkilaakso.com/opetus/abb/180_0007.pdf)

Energiatehokkuussopimukset. 2023. Saatavissa: <https://energiatehokkuussopimukset2017-2025.fi/liity-sopimukseen/>. Viitattu 01.9.2023

Lauri Hietalahti, Sähkövoimatekniikan perusteet. Tammertekniikka 2013

Lauri Hietalahti, Säädetyt sähkömoottorikäytöt. Tammertekniikka 2012

Kauppalehti. 2007. Kemira GrowHow norjalaisomistukseen. Saatavissa: <https://www.kauppalehti.fi/uutiset/kemira-growhow-siirtyy-norjalaisomistukseen/1d0c5f02-854d-3d8d-affc-e56289eac658>. Viitattu 01.9.2023

Kemira. 2023. Kemira 100, Historiamme. Saatavissa: <https://www.kemira.com/fi/kemira-100/>. Viitattu 01.9.2023

Motiva. 2023. Energiatehokkaat pumput. Saatavissa: [Energiatehokkaat pumput.pdf \(motiva.fi\)](#). Viitattu 01.9.2023

Power-MI blog. 2023. Saatavissa: [Vibration Analysis of Centrifugal Fans | Power-MI](#). Viitattu 01.9.2023

Salenius Vili. 2023. Saatavissa: [https://www.theseus.fi/bitstream/handle/10024/39580/Salenius\\_Vili.pdf](https://www.theseus.fi/bitstream/handle/10024/39580/Salenius_Vili.pdf). Viitattu 01.9.2023

Sew IE-guide. 2023. Saatavissa: [https://www.sew-eurodrive.de/os/efficiency/?tab=ie-guide&country=de&language=en\\_us](https://www.sew-eurodrive.de/os/efficiency/?tab=ie-guide&country=de&language=en_us). Viitattu 01.9.2023

Shemeikka & Hietaniemi s.46 2003. Saatavissa: [Motiwatti 2.0 energiakatselmoijan tyokalun laskentaperiaatteet.pdf \(motiva.fi\)](#). Viitattu 01.9.2023

SOP. Kaliumsulfaattitehtaan sisäisen tietokanta.

Sähkönet, Taajuusmuuttajat 2023. Saatavissa: <https://blogit.gradia.fi/sahkonet/sahko-ja-automaatio-asennukset/oppimistehtavat/teollisuuden-sahkoasennukset/moottori-kaytot/taajuusmuuttajat/>. Viitattu 01.9.2023

Sähkötekniikka ja elektroniikka, Kimmo Silvonen. Saatavissa: <https://mycourses.aalto.fi/pluginfile.php/1513524/course/section/188482/tXt6.pdf>. Viitattu 01.9.2023

Tilastokeskus. Sähkön kokonaishinta yrityksille. Saatavissa: [Sähkön hinta kuluttajatyypeittäin muuttujina Kuukausi. Kokonaishinta, Yritys- ja yhteisöasiakas, vuosikulutus 70 000 - 150 000 MWh, Hinta \(snt/kWh\).. PxWeb \(stat.fi\)](https://www.stat.fi/sahkon-hinta-kuluttajatyypeittain-muuttujina-kuukausi-kokonaishinta-yritys-ja-yhteisosiakas-vuosikulutus-70-000-150-000-mwh-hinta-snt/kwh-pxweb-stat-fi). Viitattu 01.9.2023

U.S. Department of energy. 2023. Energy tips: Motor systems. Saatavissa: [Replace V-Belts with Notched or Synchronous Belt Drives \(energy.gov\)](https://www.energy.gov/replace-v-belts-with-notched-or-synchronous-belt-drives). Viitattu 01.9.2023

Yara. 2023. Yara at glance. Saatavissa: <https://www.yara.com/this-is-yara/yara-at-a-glance/>. Viitattu 01.9.2023

Yara. 2022. Annual report 2022. Saatavissa: <https://www.yara.com/siteassets/investors/057-reports-and-presentations/annual-reports/2022/yara-integrated-report-2022.pdf/>. Viitattu 01.9.2023

Yara Suomi. 2023a. Yara Suomi. Saatavissa: <https://www.yara.fi/tietoa-yarasta/yara-suomi/>. Viitattu 01.9.2023

Yara Suomi. 2023b. Yara Suomen historia. Saatavissa: <https://www.yara.fi/tietoa-yarasta/yara-suomi/historia/>. Viitattu 01.9.2023

Yara Suomi toimipaikat 2023. Yaran toimipaikat Suomessa. Saatavissa: <https://www.yara.fi/tietoa-yarasta/yara-suomi/toimipaikat/>. Viitattu 01.9.2023

Yara Suomi Kokkola 2023. Kokkola. Saatavissa: <https://www.yara.fi/tietoa-yarasta/yara-suomi/toimipaikat/kokkola/>. Viitattu 01.9.2023

Yara Suomi Kokkolan tehtaot 2023. Kokkolan tehtaot. Saatavissa: <https://www.yara.fi/tietoa-yarasta/yara-suomi/toimipaikat/kokkola/tehtaot/>. Viitattu 01.9.2023

What is a Variable Frequency Drive 2023. Saatavissa: <https://vfds.com/blog/what-is-a-vfd/>. Viitattu 01.9.2023