



PAPERIKONEEN SÄHKÖKÄYTTÖJEN SUORITUSKYKY JA ENERGIATE- HOKKUUS

Lappeenrannan–Lahden teknillinen yliopisto LUT

Sähkötekniikan diplomityö

2024

Nestori Rask

Tarkastajat: Professori Juha Pyrhönen

Tutkijaopettaja Janne Nerg

Ohjaaja: Petri Pekkola

TIIVISTELMÄ

Lappeenrannan–Lahden teknillinen yliopisto LUT

LUT School of Energy Systems

Sähkötekniikan koulutusohjelma

Nestori Rask

Paperikoneen sähkökäyttöjen suorituskyky ja energiatehokkuus

Sähkötekniikan diplomityö

2024

75 sivua, 14 kuvaa, 4 taulukkoa ja 16 liitettä

Tarkastajat: Professori Juha Pyrhönen

Tutkijaopettaja Janne Nerg

Ohjaaja: Petri Pekkola

Avainsanat: Sähkökäytöt, energiatehokkuus, kunnossapito

Sähkökäytöt ovat keskeinen osa teollisuusprosesseja ja niiden luotettava toiminta on oleellista prosessien tehokkuuden kannalta. Sähkökäyttöjen energiatehokkuutta parantamalla voidaan myös pienentää prosessien energiankulutusta. Tässä diplomityössä tutkitaan mahdollisuuksia paperikonelinjan sähkökäyttöjen käytettävyyden ja energiatehokkuuden parantamiseen. Työn teoriaosuudessa käsitellään säädettyjen sähkökäyttöjen perusteita ja paperikonesovellusten erityisvaatimuksia sähkökäyttöjen näkökulmasta.

Sähkökäyttöjen virta- ja pyörimisnopeusmittaushistorian avulla tutkitaan miten käytöt soveltuvat prosessin vaatimukseen. Mittaushistorian avulla voidaan tunnistaa kohteet, joissa sähkökäytön mitoitus ei ole perusteltu. Erityisesti ylimitoitettut sähkökäytöt tarjoavat mahdollisuuksia energiatehokkuuden parantamiseen. Työssä myös tutkitaan käytännössä, miten oikosulkumoottorin vuon optimointi soveltuu käytettäväksi paperikonesovelluksessa.

Suunnitelmallisella kunnossapidolla voidaan vähentää laiterikkojen aiheuttamia tuotantokatkoksia. Työssä sähkökäyttöjen kunnossapitoa arvioidaan tehtaan kunnossapitojärjestelmän kirjausten perusteella. Tehdyn selvityksen perusteella esitetään, miten sähkökäyttöjen häiriökorjausten määrää voitaisiin vähentää laitteiden kunnonvalvontaa kehittämällä.

ABSTRACT

Lappeenranta–Lahti University of Technology LUT

LUT School of Energy Systems

Electrical Engineering

Nestori Rask

Performance and energy efficiency of a paper machine's electric drives

Master's thesis

2024

75 pages, 14 figures, 4 tables and 16 appendices

Examiners: Professor Juha Pyrhönen

Associate professor Janne Nerg

Supervisor: Petri Pekkola

Keywords: Electric drives, energy efficiency, maintenance

Electric drives are a key part of industrial processes, and their reliable operation is essential for the efficiency of the processes. The energy consumption of processes can also be reduced by improving the energy efficiency of electric drives. This thesis examines possibilities for improving the usability and energy efficiency of electric drives of a paper machine line. The theoretical part of the work deals with the basics of controlled electric drives and the special requirements of paper machine applications from the point of view of electric drives.

The suitability of the electric drives for the process requirements of the paper machine is examined using current and rotational speed measurements. With the measurements, it is possible to identify drives where the sizing of the electric drives is not justified. Oversized electric drives offer opportunities for improving the energy efficiency of the drive. It is also examined in practice how the flux optimization of an induction motor is suitable for use in paper machine application.

With planned maintenance, the number of production interruptions caused by equipment failures can be reduced. In this thesis the maintenance of electric drives is evaluated based on records of the factory's maintenance system. Based on the findings, suggestions are made on how to reduce repair related downtimes by improving condition monitoring of electric motors.

KIITOKSET

Kiitän työn tarkastajia professori Juha Pyrhöstä ja tutkijaopettaja Janne Nergiä arvokkaista neuvoista ja ohjauksesta. Suuret kiitokset myös Petri Pekkolalle ja muille MM Kotkamillsin suunnittelu- ja kunnossapito-organisaation edustajille kaikesta opastuksesta. Lämmin kiitos myös perheelleni kaikesta tuesta opintojen aikana.

SYMBOLI- JA LYHENNELUETTELO

Roomalaiset

<i>a</i>	välityssuhde
<i>B</i>	magneettivuon tiheys
<i>E</i>	sähkökentän voimakkuus
<i>F</i>	voima, kuormituskerroin
<i>f</i>	taajuus
<i>I</i>	virta
<i>J</i>	hitausmomentti
<i>K</i>	kriittisyysindeksi
<i>k</i>	konevakio
<i>L</i>	induktanssi
<i>l</i>	pituus
<i>M</i>	valintakriteeriin perustuva kerroin
<i>N</i>	hammasluku
<i>n</i>	pyörimisnopeus
<i>P</i>	teho
<i>P.I.</i>	polarisaatioindeksi
<i>p</i>	paine, napapariluku, vikaantumisväli
<i>Q</i>	varaus
<i>R</i>	resistanssi
<i>r</i>	säde
<i>s</i>	jättämä

T	vääntömomentti
t	aika
U	jännite
v	nopeus
W	painoarvo

Kreikkalaiset

η	hyötysuhde
Ψ	käämivuo
Ω	kulmanopeus

Lyhenteet

CD	Poikkisuunta (engl. cross direction)
DTC	Suora vääntömomentinsäätö (engl. direct torque control)
MD	Konesuunta (engl. machine direction)
NRL	Normaalin ajotilanteen tehontarve (engl. normal running load)
PK1	Paperikone 1
RDC	Poikkeuksellisen ajotilanteen tehontarve (engl. recommended drive capacity)

Sisällysluettelo

Tiivistelmä

Abstract

Kiitokset

Symboli- ja lyhenneluettelo

1	Johdanto.....	8
1.1	MM Kotkamills Oy.....	9
1.2	Paperin valmistus.....	9
2	Sähkökäytöt.....	17
2.1	Sähkömoottori.....	17
2.1.1	Tasavirtamoottori.....	19
2.1.2	Kiertokenttämoottorit.....	21
2.1.3	Sähkömoottorin säätö.....	26
2.2	Kuorma.....	28
2.3	Sähkökäyttöjen energiatehokkuus.....	29
2.4	Paperikoneiden sähkökäytöt.....	32
2.4.1	Ylemmän tason säätömenetelmät.....	34
2.4.2	Sähkökäytön valinta.....	36
2.5	Paperikoneen 1 sähkökäytöt.....	38
2.5.1	Viiraosa.....	40
2.5.2	Puristinosa.....	41
2.5.3	Kuivatusosa, konekalanteri ja rullain.....	42
2.5.4	Tyhjöjärjestelmä.....	45
2.6	Paperikoneen sähkökäyttöjen kehittäminen.....	45
2.6.1	Energiatehokkuus.....	47
2.6.2	Laitteiden elinkaari ja käytettävyys.....	48
3	Kunnossapito ja käyttövarmuus.....	50
3.1	Kunnossapidon motiivit, käytänteet ja strategiat.....	50
3.2	Sähkömoottorien vikaantuminen ja kunnonvalvonta.....	51
3.3	Paperikonelinjan sähkökäyttöjen laitekanta.....	53

3.3.1 Häiriöraportointi	55
3.4 Käyttövarmuuden kehityskohteita	56
3.4.1 Kuitulinjojen sähkönjakeluhäiriöt.....	56
3.4.2 Sähkökäyttöjen häiriökorjausten vähentäminen	59
4 Johtopäätökset	61
Lähteet	62
Liitteet.....	66

1 Johdanto

Teolliset prosessit perustuvat usein erilaisten sähkötekniisten sovellusten hyödyntämiseen. Automaation ja tietotekniikan mahdollistamisen lisäksi sähkö tarjoaa luotettavan, sekä joustavan työkalun tehon siirtämiseksi teollisuudessa. Sähkötekniikan merkitystä teollisuudessa kuvastaa hyvin se, että vuonna 2022 44 % Suomen sähkön kulutuksesta jakautui eri teollisuudenalojen kesken, joista metsäteollisuus vastasi suurimmasta kulutuksesta (Suomen virallinen tilasto 2022). Prosessien energiatehokkuuden parantamisen myötä teolliset toimijat voivat alentaa energiakustannuksiaan, sekä vähentää päästöjään. Teollisuusprosessien korkea käyttöaste on myös korkea prioriteetti laitosten tuloksen ja kannattavuuden kannalta. Katkeamattoman tuotannon mahdollistavien tuotannontekijöiden jatkuva toiminta edellyttää, että laitteistoja ylläpidetään ja niiden toimintaa valvotaan. Teollisuuslaitosten sähkökäyttöjen liittyvien tekniisten valintojen ja niiden mitoitusien onnistuminen on edellytys tehokkaalle tuotantoprosessille. Toisaalta väärin mitoitettut käytöt eivät vastaa tarkoitustaan tai ovat ylimitoitettuja ja toimivat siten tehottomasti ja ovat investointeina turhan kalliita.

Tämä diplomityö on laadittu MM Kotkamills Oy:n suunnitteluorganisaation toimeksiantosta. Yhtiön paperikonelinjaa on historiansa aikana päivitetty useasti sekä prosessin että laitteiston suhteen. Sen seurauksena paperikoneen laitekanta on kirjavaa ja sisältää eri sukupolvien laitteistoja, erityisesti sähkökäyttöjen osalta. Työssä tehdään selvitys paperikonelinjan sähkökäyttöjen suorituskyvystä ja tulosten avulla pyritään saamaan selville paperikonelinjan sähkökäyttöihin liittyviä kehityskohteita energiatehokkuuden ja käyttövarmuuden näkökulmasta. Työn suuntaa ja tavoitteita tukevia tutkimuskysymyksiä ovat:

- Onko paperikoneen sähkökäyttöjen osalta tarvetta linkaaripäivityksille?
- Miten ja kuinka usein paperikonelinjan sähkökäytöt vikaantuvat?
- Onko paperikonelinjan sähkökäyttöjen kunnossapidossa kehityskohteita?
- Ovatko paperikoneen sähkökäyttöjen valinnat ja mitoituset perusteltuja?
- Voiko nykyisiä laitteita käyttää aiempaa energiatehokkaammin?

Työssä tarkastellaan, miten paperikonelinjan sähkökäytöt soveltuvat prosessin nykyvaatimuksiin. Saatavilla olevien prosessimittausten ja laitetietojen avulla pyritään selvittämään

ovatko sähkökäyttöjen laitemitoitukset perusteltuja, sekä minkälaiset ovat eri laitekokonaisuuksien edellytykset tuotantotason kasvattamiselle. Käytettävä tutkimusaineisto käsittää mm. tehtaan automaatiojärjestelmästä kerättyä mittaustietoa, sekä kunnossapitojärjestelmän raportointia.

1.1 MM Kotkamills Oy

MM Kotkamills Oy on itävaltalaiseen Mayr-Melnhof-konserniin kuuluva metsäteollisuusyhtiö, jolla on Kotkassa sijaitseva tehdasintegraatti. Tehtaalla tuotetaan kahdella konelinjalla laminaattipaperia ja kartonkia, ja sen toiminnot työllistävät noin 500 henkilöä. Yhtiön Kotkan tehtailla on vaiherikas historia, ja sen juuret juurtavat vuoteen 1872, jolloin norjalainen Hans Gutzeit perusti Kymijoen suulle Kotkansaarelle sahan. Tehtaan toiminnot laajenivat vuonna 1907, kun tehtaalla aloitettiin sulfaattiselluloosan valmistus ja edelleen vuosina 1953–1954, kun aloitettiin säkkipaperituotanto kahdella paperikoneella PK1 ja PK2.

Vuonna 1973 PK1:llä alettiin valmistaa yksinomaisesti laminaattipaperia, joka kulkee Absorbex tuotenimellä. Konelinjan laminaattipaperin pääraaka-aineena käytetään tehtaan omalla sellutehtaalla valmistettua valkaisuamatonta sulfaattiselluloosaa, sekä vuonna 2011 valmistuneella kierrätyskuitulaitoksella valmistettua keräyskuitumassaa. Sellutehtaan pääraaka-aine puolestaan on sahanpuru. PK1:n tuotantokapasiteetti on uusimpien päivitysten jälkeen 185 000 tonnia paperia vuodessa.

Säkkipaperituotannon loppuessa PK2 muutettiin sanomalehtipaperikoneeksi, jonka massatarpeita varten rakennettiin hiertämö. Konelinjaa päivitettiin vuonna 1987 valmistamaan päällystettyä aikakauslehtipaperia päällystysosan ja pastakeittiön valmistuessa. Vuonna 2016 tehtaalle tehtiin merkittävä investointi, kun aiemmin painopaperikoneeksi modernisoitu PK2 purettiin ja sen tilalle rakennettiin uusi kartonkikone KK2, jonka tuotantokapasiteetti on 400 000 tonnia kartonkia vuodessa.

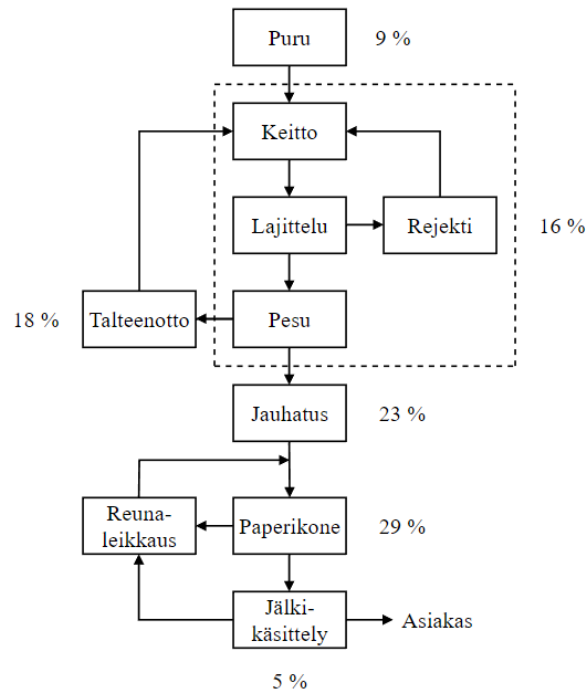
1.2 Paperin valmistus

Paperin valmistus teollisessa mittakaavassa tapahtuu paperikoneella. Paperikoneen toiminnan tavoitteena on tuottaa laatuvaatimukset täyttävä jatkuva paperiraina. Tuotetun paperin tulee olla myös tasalaatuista pituus- ja poikittaissuunnassa. Paperikoneen keskeiset

osakokonaisuudet ovat lyhyt kierto, perälaatikko, viiraosa, puristinosa ja kuivausosa. Tämän lisäksi tuotettavan paperilaadun mukaan paperikone voi sisältää esimerkiksi päällystysasemia, liimapuristimen ja kalanterin ennen rullainta, jossa valmis paperi rullataan konerullaksi. (Holik, 2013.)

Paperi on edelleen merkittävä materiaali, vaikka digitalisaatio vähentää paperisen tiedonvälityksen määrää. Vuonna 2023 paperi- ja kartonkituotteita valmistettiin maailmalla 414 Mt (FAO, 2023). 2000-luvulla tuotannon pääpaino on kuitenkin siirtynyt painopapereista pakkausmateriaaleihin (FAO, 2022). Paperiteollisuuden haasteita Euroopassa ovat mm. puun kasvava kysyntä energianlähteenä, kasvavat energiakustannukset ja graafisten paperituotteiden kysynnän lasku (Euroopan komissio, 2024).

Puu on paperin- ja sellunvalmistuksen pääasiallinen selluloosakuitujen lähde. Vuonna 2022 metsäteollisuuden puunkäyttö Suomessa oli 65,2 miljoonaa kuutiometriä, josta suurin yksittäinen puutavaralaji oli massateollisuuden käyttöön mennyt mäntykuitupuu (Luonnonvarakeskus, 2023). Kuidutusprosesseissa puusta tai muusta selluloosapitoisesta raaka-aineesta prosessoidaan kuitupitoista massaa. Menetelmät kuitujen erotteluun voivat perustua puuaineksen kemialliseen käsittelyyn, mekaaniseen rasittamiseen, lämmittämiseen tai näiden yhdistelmään. Teolliset kuidutusmenetelmät jaotellaan tämän mukaan, joko mekaanisiksi, kemiallisiksi tai kemimekaanisiksi. Keskeiset erot eri kuidutusmenetelmien välillä ovat lopputuotteena syntyvän massan ominaisuuksissa, sekä prosessien saannossa, joka määrittää tuotetun massan ja sen valmistukseen käytetyn puuraaka-aineen massojen suhteena. (Smook, 2016.) Kuvassa 1.1 on esitettyä tehtaan paperikonelinjalle sovellettavissa oleva prosessikaavio. Sähkönjakelun kapasiteetin perusteella paperikonelinjan sähkötehon kysynnän pääpaino on paperikoneella.



Kuva 1.1. Yksinkertaistettu prosessikaavio sellun- ja paperinvalmistuksen eri vaiheista, sekä prosessien materiaalivirtojen kierroista. Kaavioon on merkitty, miten paperikonelinjan jakelumuuuntajakapasiteetti jakautuu prosentuaalisesti eri prosessivaiheiden kesken. Muokattu lähteestä: (Biermann, 1996).

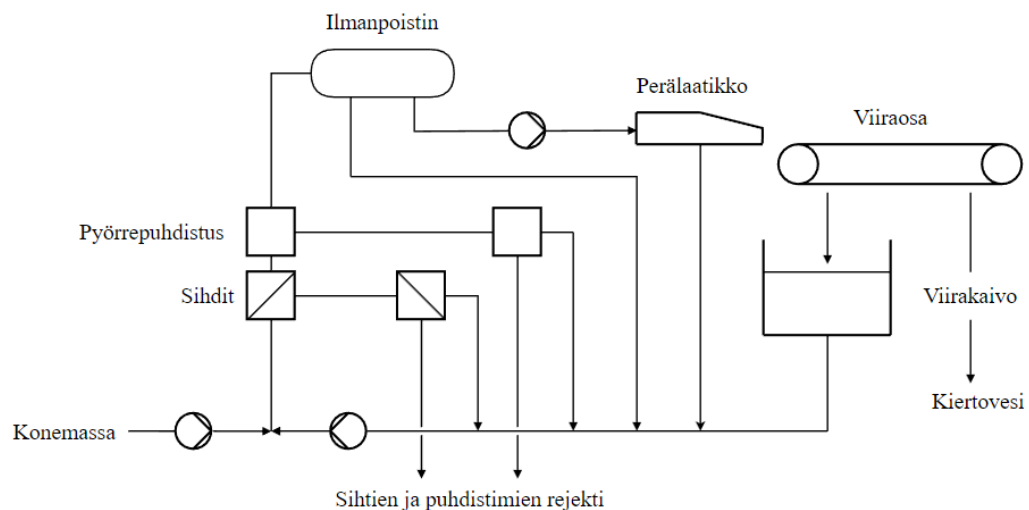
Mekaanisessa massan valmistuksessa käytettävät suuritehoiset jauhimet ja hiomakoneet kuluttavat paljon sähköenergiaa. Lipiäisen ym. (2022) mukaan mekaanisen massan valmistuksen sähköenergian ominaiskulutus on 1,47 MWh/t, kun taas kemiallisen massan valmistuksen sähköenergian ominaiskulutus on 0,69 MWh/t. Kemiallisen massan valmistus on kuitenkin energiantensiivisempää tuotantoprosessien kokonaisenergiakulutuksen kannalta.

Tasoviirakone soveltuu monien eri paperilaatujen valmistukseen ja sitä voidaan pitää paperikoneen ns. vakiorakenteena. Paperikoneilla on kaksi eri puolta, etu- ja takapuoli, joista yleisesti käytetään myös nimityksiä hoito- ja käyttöpuoli. Hoitopuolella sijaitsevat paperikoneen ohjauspaneelit ja muu käyttölaitteisto. Käyttöpuolella puolestaan on paperikoneen teloja ja sylintereitä pyörittävät sähkökäytöt. Tämän lisäksi paperikoneen pituus- ja poikisuunnasta puhuttaessa käytetään termejä MD-suunta (machine direction) ja CD-suunta (cross-machine direction). (Smook, 2016.)

Lyhyt kierto on osa paperikoneen määrän pään prosessikonaisuutta, johon kuuluvat myös, hyllyn käsittely ja kuidun talteenotto (Holik, 2013). Paperikoneelle tuleva sakea konemassa käsitellään lyhyessä kierrossa ennen paperikonetta ja sen eri vaiheet ovat:

- laimennus kiertovedellä
- puhdistus konesihdeillä ja pyörrepuhdistimilla
- ilmanpoisto
- pumppaus perälaatikkoon

Lyhyeen kiertoon syötettävän konemassan sakeus on tyypillisesti 3–4 % ja se täytyy valmistettavan tuotteen mukaan laimentaa 0,1–1,5 % sakeuteen. Konemassa laimennetaan sekoittamalla siihen viiraosan suodosvettä. Laimennuksen määrään vaikuttaa mm. lopputuotteelta vaadittu vahvuus. (Ek et al., 2009.) Lyhyen kierron järjestelmän tulisi soveltua nopeisiin lajinvaihtoihin, sekä tuottaa mahdollisimman vähän kuituhäviötä (Holik, 2013). Lyhyen kierron prosessikaavio ja sen keskeiset laitteet ovat esitettyinä kuvassa 1.2. Lyhyen kierron materiaalivirtoja hallitaan suurilla pumppukäyttöillä, joiden nopeussäädöllä voidaan säätää esimerkiksi perälaatikon syöttöpainetta.



Kuva 1.2. Yksinkertaistettu lyhyen kierron prosessikaavio. Lyhyessä kierrossa sakea konemassa laimennetaan ja suodatetaan ennen perälaatikkoon syöttämistä. Muokattu lähteestä: (Ek et al., 2009).

Konemassaa laimennetaan viirakaivon kiertovedellä, minkä jälkeen sekoitettu massa syötetään konesihtien läpi. Konesihtien aksepti ja rejekti kierrätetään, kunnes massan rejektin määrä on hyväksyttävissä rajoissa. Sihtien jälkeen massa syötetään pyörrepuhdistuslaitoksen lävitse, jossa puhdistusvaiheita on 4–6 kappaletta. Tämän jälkeen massa syötetään ilmanpoistimeen, josta ylikaato kierrätetään takaisin lyhyeen kiertoon. Lopulta massa syötetään perälaatikolle, josta on jatkuva ohivirtaus takaisin lyhyeen kiertoon. Konemassan ja kiertoveden epäonnistunut sekoittuminen massan laimennuksessa voi johtaa massan sakeuden vaihteluun ja täten myös paperirainan neliöpainon vaihteluun. Lyhyen kierron massasulppun epäpuhtaudet voivat vahingoittaa paperikoneen laitteita tai huonontaa valmiin paperin laatua, minkä takia ne erotellaan konesihtien ja pyörrepuhdistimien avulla. (Ek et al., 2009.)

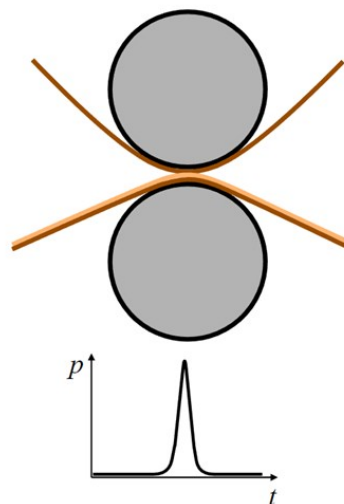
Viiravedellä laimennettu massa pumpataan perälaatikkoon, josta massasulppu syötetään paperikoneen viiraosalle. Perälaatikon tehtävänä on tuottaa CD-sunnassa homogeeninen massasuspensio ja levittää se tasaisella nopeudella paperikoneen viiralle. Hydraulisessa perälaatikossa massa syötetään perälaatikkoon kartio- tai suorakulmiomaisen jakotukin kautta, josta on jatkuva ohivirtaus takaisin lyhyeen kiertoon. Jakotukin poikkipinta-ala pienenee massan virtaussuunnassa ja rakenteen tavoitteena on tuottaa tasainen virtaus perälaatikon jakopillistöön koko perälaatikon leveydeltä. (Ek et al., 2009). Perälaatikon huulikanaavassa massasuspension virtausnopeus kiihtyy viiran ratanopeuden alueelle, jonka jälkeen massa suihkuu huuliaukosta viiralle (Holik, 2013).

Viiraosalla perälaatikon massasuspensiosta muodostuu kuitupitoinen raina. Viiraosan tavoitteena on poistaa rainasta vettä suotautumalla, sekä tuottaa haluttu kuituorientaatio. Rainan kuituorientaation anisotropian määrittää pääasiassa perälaatikosta suihkuavan massasuspension ja viiran välinen nopeusero. Tasoviiralla runkoviira kulkee vaakatasossa erilaisten vedenpoistoelementtien ylitse ja vedenpoisto tasoviiralla tapahtuu painovoiman suuntaisesti. Tyypillisiä vedenpoistoelementtejä tasoviiralla ovat rintapöytä, foililistat, märkäimulaatikot, imulaatikot ja imutela. (Holik, 2013.)

Puristinosalla paperirainasta puristetaan vettä puristinhuopien välissä. Viiralta saapuvan paperirainan kuiva-ainepitoisuus kasvaa puristinosalla tyypillisesti noin 20 prosentista 40–50 prosenttiin. Korkean kuiva-ainepitoisuuden saavuttaminen puristinosalla on edullista paperinvalmistuksen energiatehokkuuden kannalta, sillä veden haihduttaminen paperirainasta

kuivatusosalla on huomattavasti energiaintensiivisempää puristamiseen verrattuna. (Ek et al., 2009.) Paperikoneen höyrynkulutuksen vähentämisen lisäksi puristamalla voidaan muokata paperirainan rakennetta ja pintaominaisuuksia (Holik, 2013).

Varsinainen paperirainan puristus tapahtuu toisiinsa puristetun telaparin muodostamassa telanipissä. Paperiraina kulkeutuu telanipin lävitse yhden puristinhuovan pinnalla tai kahden huovan välissä. Nippien kuormituksen suuruus ilmaistaan tyypillisesti pituusyksikköä kohden muodossa kN/m, jolloin on puhe ns. viivakuormasta. Paperi- ja kartonkikoneiden puristinosat käsittävät tyypillisesti 2–4 telanippiä. (Ek et al., 2009.) Puristamisen alussa paine alkaa kasvaa nipissä, jolloin ilma poistuu paperirainasta ja huovasta. Ilman poistuttua, paperiraina on veden kyllästämä, jonka jälkeen myös hydraulinen paine alkaa kasvaa ja vesi siirtyä rainasta huopaan. Telanipin keskikohdassa saavutetaan nipin kokonaispaineen huippu, jonka jälkeen nippi alkaa laajeta ja hydraulinen paine laskee. Poistuessaan nipistä paperiraina laajenee, jolloin rainaan muodostuvan alipaine imee vettä huovasta takaisin rainaan. Tätä ns. paperirainan jälleenkastumista voidaan vähentää alipaineistetun imutelan avulla. (Holik, 2013). Puristettu vesi kulkeutuu pois nipistä vettyneen puristinhuovan mukana (Ek et al., 2009). Telanipissä paperiraina altistuu kuvan 1.3 mukaiselle puristusimpulssille, jonka suuruuteen vaikuttaa paperikoneen ratanopeus ja nipin viivakuorma. Nipin viivakuormaa säätämällä voidaan hallita paperirainan kosteusprofiilia.



Kuva 1.3. Telanipin aiheuttama puristusimpulssi saadaan selville integroimalla nipin puristusaine p sen vaikutusajan t suhteen. Puristusimpulssin suuruutta ja puristusprosessin tehokkuutta voidaan kasvattaa esimerkiksi nipin geometrian avulla. Muokattu lähteistä: (Holik, 2013; Ek et al., 2009).

Puristusimpulssin suurentaminen parantaa puristusprosessin tehokkuutta. Perinteisessä telanipissä puristinhuovan ja paperirainan mekaaninen kestävyys rajoittavat puristusvoiman kasvattamista. Puristusimpulssia voidaan suurentaa pidentämällä nippiä, jolloin paperiraina on pidemmän ajan puristuksessa. (Ek et al., 2009.) Kenkäpuristimessa kenkätelan koveraa kuormituskenkää painetaan vastatelaan vasten. Kenkätelan ulkokehällä pyörii voideltu putkimainen hihna. Kenkäpuristimessa nipin pituus voi olla jopa kymmenkertainen perinteiseen telanippiin verrattuna. Kenkäpuristimen pidennetty nipin avulla voidaan saavuttaa suuri puristusimpulssi pienemmällä puristuspaineella. (Holik, 2013.)

Kuivatusosalla paperirainasta poistetaan vettä haihduttamalla. Kuivatusosan jälkeen paperirainan kuiva-ainepitoisuus on tyypillisesti 93–95 %. (Ek et al., 2009.) Yleisin menetelmä veden haihduttamiseen kuivatusosalla on sylinterikuivatus. Sylinterikuivatuksessa paperiraina kulkee kuivatusviiran ohjaamana kuivatussylintereiden pintoja pitkin, joista lämpö siirtyy rainaan. (Holik, 2013.) Kuivatussylinterit ovat valurautaisia paineastioita ja ne ovat perinteisesti aseteltuna kahteen päällekkäiseen riviin. Kuivatussylinterit yhdessä kuivatusviiran kanssa muodostavat kuivatusryhmän.

Haihduttamiseen tarvittava lämpöenergia siirretään kuivatussylintereihin matalapainehöyryn avulla. Höyryn lauhtuessa siitä vapautuva lämpöenergia johtuu kuivatussylinterien seinämien kautta paperirainaan. Lauhteen käyttäytyminen kuivatussylinterin sisällä riippuu pitkälti sylinterin pyörimisnopeudesta. Pienellä ajonopeudella lauhde kasaantuu lammikoksi sylinterin alaosaan ja nopeuden kasvaessa lauhdepinta alkaa leviämään pitkin sylinterin seinämiä. Nopeuden edelleen kasvaessa, lauhdepinta alkaa levitä tasaiseksi renkaaksi sylinterin sisäpinnalle. (Ek et al., 2009.) Lammikkona oleva lauhde kuormittaa kuivatusryhmän sähkökäyttöjä huomattavasti. Kuormitus on edelleen hyvin epätasaista lauhteen alkaessa levitä sylinterin sisäpinnalle, kunnes lopulta kuormitus pienentyy huomattavasti lauhteen tasoittuessa renkaaksi. (Holik, 2013.) Lauhde poistuu sylintereistä lauhteenpoistimien eli ns. sifonien avulla.

Kuivuessaan paperiraina kutistuu sekä MD- että CD-suunnissa. Kutistuminen on tyypillisesti suurempaa CD-suunnassa, sillä kuidut ovat suuntautuneet paperirainan kulkusuunnan mukaisesti. Kuivatusryhmien ja nippien väliset nopeuserot muodostavat rainaan jännityksiä ja koneenosien välistä kireyttä. Koneenosien välisiä nopeuseroja säätämällä on täten mahdollista rajoittaa kutistumista MD-suunnassa. (Holik, 2013.) Kuivumisnopeutta MD-suunnassa säädetään kuivatusryhmien höyrynpaineiden avulla. Suurella höyrynpaineella ja tätä

seuraavalla suurella kyllästymislämpötilalla saavutetaan suuri sylinterin sisä- ja ulkopinnan välinen lämpötilaero. Höyrynpaineen kasvattaminen täten kasvattaa sylinterien lämmönsiirtotehoa ja paperirainan kuivumisnopeutta. Kuivatusryhmien höyrynpaine normaalisti kasvaa paperirainan kulkusuunnassa siten, että höyrynpaine on suurimmillaan viimeisessä kuivatusryhmässä. (Ek et al., 2009.)

Paperikoneen lopussa valmis paperiraina rullataan rullaimella tampuuriraudan ympärille konerullaksi. Rullaimella tuotetaan jatkuvatoimisesta paperikoneesta erillisiä eriä paperia jatkojalostusta varten. Rullauksessa syntyvän pinta- ja pohjahylyn määrän optimoinnilla voidaan parantaa prosessin materiaalihyötysuhdetta ja taloudellisuutta. Keskeisimmät rullauksen lopputulokseen vaikuttavat parametrit ovat paperirainan ratakiireys, viivakuorma ja kehävoima. (Holik, 2013.)

Yleisin paperikoneissa käytetty rullaintyyppi on ns. Pope-rullain, jossa tampuurirautaa painetaan rullaussylinteriä vasten. Rullaussylinteri pyörii sähkökäytön avulla ja konerulla muodostuu kitkan vaikutuksesta pyörivän tampuuriraudan ympärille. Konerullan kokoa valvotaan rullauksen aikana esimerkiksi halkaisijamittauksen avulla. Rullan valmistuessa paperiraina katkaistaan ja rullaukseen vaihdetaan tyhjä tampuurirauta. Rullan vaihtoa varten tyhjä tampuurirauta kiihdytetään erillisen sähkökäytön avulla aluksi koneen ratanopeuteen, jonka jälkeen se lasketaan pyörimään rullaussylinteriä vasten. Paperiraina voidaan katkaista esimerkiksi ilmapuhalluksella, jolloin raina kietoutuu tyhjän tampuuriraudan ympärille, johon alkaa tämän jälkeen muodostua uusi konerulla. (Holik, 2013.)

Rullaus on sähkökäytön kannalta haastava tehtävä, ja sähkökäytöltä vaadittavat ominaisuudet vaihtelevat eri rullaintyyppien kesken. Keskiökäyttöisillä rullaimilla sähkökäytöllä pyöritetään itse konerullaa rullainsylinterin sijasta. Tämä mahdollistaa konerullan kehävoiman hallinnan sähkökäytön avulla. Keskiökäytössä tyhjän tampuuriraudan pitää täten pyöriä suurella nopeudella, jolloin moottorikäyttö menee syvälle kentänheikennykseen. Koska rullasta halutaan tasainen, pitää vääntömomentin säädön rullan halkaisijan kasvaessa ja moottorin vähitellen siirtyessä vakiovoalueelle onnistua täydellisesti. Paperirainan kireyden säätö on siis tässä olennaista. Tavanomaisissa Pope-rullaimissa paperirainan kireyttä säädetään rullainsylinterin sähkökäytön vääntömomentin avulla sen sijasta, että säätö perustuisi kuormitusanturien avulla mitattuun kireyteen. (Rautiainen, 2009.)

2 Sähkökäytöt

Sähkökäyttö on järjestelmä, joka käsittää sähkömoottorin, sekä muita syöttö- ja hallintalaitteita, jotka yhdessä mahdollistavat sähkömekaanisen energian muunnoksen (Jufer, 2010). Sähkökäytöt ovat teollisuusprosessien keskeisimpiä laitekokonaisuuksia. Sähkökäyttöjen säätömenetelmät mahdollistavat käyttöjen hyödyntämisen toimilaitteena säätöä vaativissa sovelluksissa. Pyörivän sähkökäytön säädön perustavoitteena on tuottaa haluttu vääntömomentti halutulla pyörimisnopeudella. Moottorin nopeus- ja vääntömomenttisäädöt mahdollistavat mm. materiaalivirtojen hallinnan prosessien olosuhteiden ja vaatimusten muuttuessa.

2.1 Sähkömoottori

Pöyhönen (1975) määrittelee sähkömoottorin pyörivänä sähkökoneena, jolla voidaan muuntaa siihen tuotu sähköenergia mekaaniseksi energiaksi. Pyörivä sähkökone, jolla muunnetaan mekaanista energiaa sähköenergiaksi, on puolestaan generaattori (Pöyhönen, 1975). Sähkömekaanisen energiamuunnon yhtenä perusilmiönä voidaan pitää Lorentzin voimaa. Positiiviseen, nopeusvektorilla \mathbf{v} liikkuvaan varaukseen dQ vaikuttaa sähkökentänvoimakkuudessa \mathbf{E} ja magneettivuontiheydessä \mathbf{B} voima-alkio $d\mathbf{F}$.

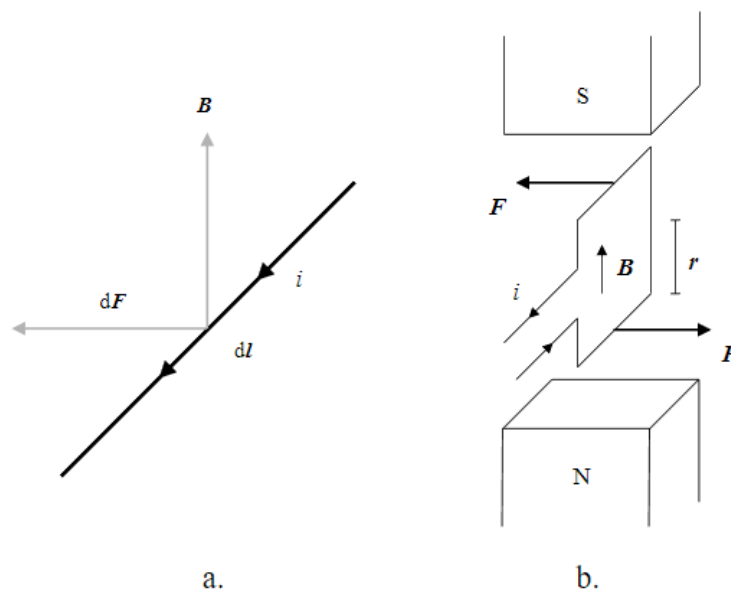
$$d\mathbf{F} = dQ(\mathbf{E} + \mathbf{v} \times \mathbf{B}) = dQE + \frac{dQ}{dt} d\mathbf{l} \times \mathbf{B} = dQE + id\mathbf{l} \times \mathbf{B} \quad (2.1)$$

Sähkömoottorien toiminta perustuu magneettikentän sisällä olevan virrallisen johtimen ja kentän muodostaman voiman hyödyntämiseen (Pöyhönen, 1975). Johtimessa kulkevan virran ollessa kohtisuorassa magneettikentän kanssa, voidaan voiman suuruus ilmaista yhtälön (2.1) avulla. Jos virran i kulkusuunta $d\mathbf{l}$ ja vuontiheys ovat toisiaan vastaan kohtisuorassa, yhtälö yksinkertaistuu muotoon

$$F = Bil \quad (2.2)$$

jossa l on magneettikentän sisällä olevan johtimen pituus. On huomionarvoista, että mikäli magneettikentän vuo ei ole kohtisuorassa johtimen kanssa, niin voima on pienempi. (Hughes, 2019.) Voimailmiön yksityiskohtaisempana esitysmuotona voidaan pitää Lorentzin voiman yhtälöä, joka on esitettyä yhtälössä 2.1, sekä havainnollistettuna kuvassa 2.1 a. (Pöyhönen et al., 2008). Lorentzin voima voidaan valjastaa vääntömomentin

tuottamiseen muokkaamalla magneettivuon sisällä olevan johtimen rakennetta. Edelleen kuvassa 2.1 b. on havainnollistettu, miten magneettivuossa olevaan johdinsilmukkaan muodostuu Lorentzin voiman aiheuttama voimapari ja tätä seuraava vääntömomentti. Kuvan mukainen järjestely ei kuitenkaan johda jatkuvaan pyörimisliikkeeseen, sillä silmukkaan muodostuvat voimat kumoavat toisensa silmukan halkaisijan ollessa kohtisuorassa magneettivuon kanssa.



Kuva 2.1 a. Lorentzin voiman vaikutus virralliseen johtimeen magneettikentässä. Kulma β ilmaisee kulman magneettivuon tiheyden vektorin B ja johtimen välillä. b. Magneettivuossa sijaitsevan johdinsilmukan muodostama alkeissähkömoottori. Lorentzin voiman muodostama voimapari pyrkii kääntämään silmukkaa vastapäivään. Silmukan leveyden muodostama voiman varsi r vaikuttaa vääntömomentin suuruuteen. Muokattu lähteestä: (Pyrhönen et al., 2008).

Normaalirakenteisten sähkökoneiden perusosat ovat pyörivä roottori, staattori käämeineen, laakeripukit tai laakerikilpi ja laakerit. Roottori sijaitsee staattorin sisällä laakeripukeissa olevien laakerien varassa. Roottorin ja staattorin välillä on ilmapäli. (Pöyhönen, 1975.) Staattoria ja roottoria voidaan myös nimittää pyörivän sähkökoneen aktiivisiksi osiksi (Pyökäri, 1971).

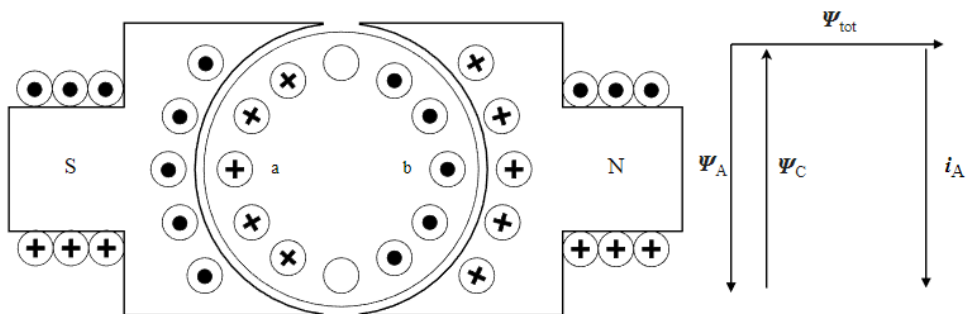
2.1.1 Tasavirtamoottori

Tasavirtakoneen perusrakenne noudattaa kappaleessa 2.1 esitettyä pyörivän sähkökoneen rakennetta, sillä poikkeuksella, että tasavirtakoneen roottoria nimitetään ankkuriksi ja moottori sisältää harjalaitteet, sekä hiiliharjat. (Pöyhönen, 1975.) Tasavirtakoneiden toiminta suurimmaksi osaksi perustuu pyörivän ankkurikämmityksen ja koneen rungossa paikallaan olevan magnetoimiskäämityksen väliseen reaktioon (Pyrhönen et al., 2008). Moottorikäytössä tasavirtakoneen ankkuri- ja magnetoimiskäämityksiin syötetty teho tulee tehoelektroniikan ohjaamana verkosta. (Pöyhönen, 1975.) Tasavirtakoneet luokitellaan ankkuri- ja magnetoimiskäämitysten välisen kytkennän mukaan joko sarja-, sivuvirta-, compoundi- tai vierasherätteiksi koneiksi. Kukin edellä mainituista konetyypeistä voi toimia sekä generaattorina, että moottorina. (Pyökäri, 1971.) Nykypäivänä paperikoneissa käytettävät tasavirtamoottorit ovat käytännössä kaikki vierasherätteisiä tasavirtakoneita. Muut tasavirtakonetyypit olivat ennen tehoelektroniikan käyttöä käteviä, sillä niiden ominaisuuksia voitiin määrittellä mainittujen erilaisten magnetointitapojen kautta. Esimerkiksi sarjamoottori saattoi toimia liikennevälinekäytössä, jossa jännitelähteen kytkentä moottoriin aiheutti hyvin suuren virran, joka kulki sekä magnetointikämmien että ankkurin läpi. Tällä saavutettiin hyvin suuri lähtövääntö. Koneen kiihtyessä vastaavasti virta pieneni, jolloin saatiin ns. automaattinen kentänheikennys. Periaatteessa lähestulkoon säätämätön sarjamoottori voisi toimia rullaimen moottorina.

Tasavirtamoottorien vääntömomentin tuottaminen perustuu ankkurissa aksiaalisessa suunnassa kulkevan virran ja staattorin radiaalisen magneettivuon väliseen reaktioon. Galvaaninen yhteys pyörivään ankkuriin muodostetaan grafiitista valmistettujen hiiliharjojen avulla, joita jousikuormitteiset harjanpitimet painavat ankkurin kommutaattoria vasten. (Hughes & Drury, 2019.) Kommutaattori koostuu kupariliuskoista ja se on eristetty ankkurista. Ankkurikämmityksen vyyhdet ovat liitetty kommutaattoriin siten, että yksittäisen vyyhden kaksi päätä ovat liitetty eri liuskoihin kommutaattorilla. Kommutaattorin liuskoja on yhtä paljon kuin ankkurilla on vyyhtejä. Kuormitettuna ankkuri kehittää moottorin päävuohon nähden poikittaisen vuon. Tämä ns. ankkurireaktio siirtää koneen päävuota ja sen vaikutuksen kumoamiseksi suuremmissa moottoreissa on erilliset kompensointi- ja kääntönavat. (Pöyhönen, 1975.) Täysin kompensoidun tasavirtakoneen vääntömomentti T on suoraan verrannollinen ankkurivirtaan I_a ja kenttäkäämien muodostamaan käämivuohon Ψ_F .

$$T = kI_a\Psi_F \quad (2.3)$$

Tasavirtamoottoreita syötetään tasajännitteellä. Virta kulkee ankkurikämeihin kommutaattorin ja hiiliharjojen kautta (Hughes & Drury, 2019). Tasavirtamoottorin vääntömomentin syntymekanismia voidaan havainnollistaa kuvan 2.2 avulla, jossa ankkurikäimitykseen syötetty virta aiheuttaa voiman käämien johtimiin kuvassa 2.1 esitetyllä tavalla. Ankkurin sähkövääntömomentti T määrittyy yhtälön 2.3 mukaisesti, jossa k on koneen rakenteen mukainen konevakio, I_a on ankkurivirta ja Ψ_F on koneen magneetoiva käämivuo (Pöyhönen, 1975). Tasavirtamoottoreissa käämivuo tyypillisesti pyritään pitämään vakiona, jolloin vääntömomentti on verrannollinen ankkurivirran suhteen (Hughes & Drury, 2019). Kenttäkäämien napojen välinen magneettikenttä on napaisuudeltaan muuttumaton, jolloin ankkurissa esiintyvien virtojen suuntien on muututtava jatkuvan vääntömomentin saavuttamiseksi. Ankkuriin syötettävä tasavirta on tällöin vaihtosuunnattava ja tämä toteutetaan mekaanisesti kommutaattorin avulla (Pyrhönen et al., 2008).



Kuva 2.2. Kaksinapaisen tasavirtamoottorin ankkurikäimityksessä esiintyvät virrat ankkurin aksiaalisuunnasta nähtynä. Ankkurin a- ja b-puolen vastakkaisuuntaiset virrat synnyttävät vastakkaisuuntaiset voimat ja vääntömomentin. Vektoriesityksestä on nähtävissä, miten ankkurireaktion aiheuttama käämivuo Ψ_A kompensoidaan, jotta kokonaisvuo Ψ_{tot} säilyttää kohtisuoran aseman ankkurivirran kanssa. Muokattu lähteistä: (Hughes & Drury, 2019; Pyrhönen et al., 2016).

Vierasherätteisessä tasavirtamoottorissa ankkuri- ja magnetointivirtoja voidaan säätää toisistaan riippumatta. Täysin kompensoidun tasavirtamoottorin rakenne takaa, että ankkurivirta ja magneettivuo ovat aina kohtisuorassa toisiinsa nähden (Pyrhönen et al., 2016). Teollisuuden tasavirtakäytöissä käytetään tyristorisuuntaajia, joiden sytytyskulmalla voidaan

säätää tasasuunnatun jännitteen keskiarvoa ja lopulta tasavirtamoottorin ankkuri- ja magne-
tointivirtoja.

Kolmivaiheiset tyristorisuuntaajat tuottavat 50 Hz verkossa tasajännitteeseen 300 Hz väreen, jonka tasavirtamoottorin induktanssi suodattaa hyvin, minkä seurauksena suuntaajan verkosta ottama virta on muodoltaan siniaallon sijasta lähes kanttiaalto. Kanttiaallon aiheuttamat matalataajuiset harmoniset komponentit säröttävät syöttävän verkon jännitettä tuomalla siihen matalataajuisia harmonisia alkaen viidennestä ja seitsemännestä harmonisesta. Tyristorisuuntaajat ottavat verkosta pätötehon lisäksi myös reaktiivista ohjausloistehoa, jonka merkitys korostuu etenkin käytettäessä suurta sytytyskulmaa (Melkebeek, 2018). Tasavirtakäytöllä suuri ohjausloisteho muodostuu tilanteessa, jossa käyttöä kuormitetaan suurella vääntömomentilla ja pienellä jännitteellä. Tasavirtakäytöt edellyttävät täten aktiivista loistehon kompensointia, jota säädetään käytön pyörimisnopeuden funktiona. Yksinkertainen ratkaisu loistehon aktiiviseen kompensointiin on portaittain kytkettävä rinnakkaiskondensattoriparisto, jota ohjataan mitatun loistehon mukaan. 6-pulssiset tasasuuntaajat aiheuttavat merkittäviä viidennen ja seitsemännen kertaluokan yliaaltoja. Yliaaltojen suodattamiseen hyödynnetään teollisuudessa tyypillisesti keskijänniteverkkoon kytkettyjä yliaaltosuodattimia. Passiivinen yliaaltosuodatin eli ns. imupiiri viritetään siten, että se muodostaa yhdelle tai useammalle yliaaltokomponentille matalaimpedanssisen sulkeutumistien. Aktiivisella yliaaltosuodattimella verkon yliaallot kumotaan suodattimen tuottamalla virtakomponentilla, joka on vastakkainen kutakin yliaaltokomponenttia kohden. Suodattimen aktiivinen osa koostuu joko virta- tai jännitevälipiirillisestä vaihtosuuntaajasta ja säätimestä, joka erittelee eri yliaaltokomponentit mitatusta kuorman vaihevirrasta. (Akagi, 2005.)

2.1.2 Kiertokenttämoottorit

Kiertokenttämoottoreissa moottorin staattorikäänitys synnyttää moottorin ilmaväliin pyörivän magneettikentän. Kiertokenttämoottoreita ovat mm. erilaiset tahtimoottorit ja oikosulkumoottorit. Oikosulkumoottorien toiminta perustuu staattori- ja roottorikäänitysten väliinseen induktioilmiöön (Pyökäri, 1971). Oikosulkumoottorit tuottavat vääntömomenttia samalla peruseriaatteella kuin tasavirtamoottorit, mutta oikosulkumoottoreiden tapauksessa roottoriin ei syötetä erillistä sähkövirtaa, vaan oikosuljetun roottoripiiriin indusoituu jännite staattorikäänien synnyttämästä pyörivästä magneettikentästä. (Hughes & Drury, 2019).

Oikosulkumoottorit ovat tyypillisesti kolmivaiheisia, sekä niiden staattorit ja roottorit ovat umpinapaisia. Sekä staattori että roottori on valmistettu toisistaan eristetyistä uritetuista sähköteräslevyistä. Oikosulkumoottorin roottorirakenteista yleisin on häkkikämmity roottori, jossa roottorin urissa olevat sauvat ovat oikosuljettu molemmista päistä oikosulkurenkailla. Häkkikämmitykseen ei ole moottorin ulkopuolelta galvaanista yhteyttä, mikä tarkoittaa, että roottoripiirin resistanssin määrittää pääasiassa sen rakenne, eikä sitä pystytä jälkikäteen muuttamaan. (Hughes & Drury, 2019.) Oikosulkumoottori tarvitsee vääntöä kehittäkseen jättämän s , joka määrittää tahtinopeuden n_s ja roottorin todellisen nopeuden n_r avulla.

$$s = \frac{n_s - n_r}{n_s} \quad (2.4)$$

Usein puhutaan suhteellisesta jättämästä, joka voidaan määrittää yhtälön (2.4) avulla. Jättämän ilmeneminen on välttämätöntä moottorin vääntömomentin tuotannon kannalta. Oikosulkumoottorin staattorikämmitykseen syötetty kolmivaihevirta synnyttää staattorin ja roottorin väliseen ilmapäliin pyörivän magneettikentän. Kentän voimaviivat leikkaavat roottorin sauvoja roottorin pyöriessä jättämällä. (Pyrhönen et al., 2016.) Roottorin sauvoihin induoituva sähkömotorinen voima on verrannollinen nopeuteen, jolla vuo leikkaa roottorisauvoja. Tällöin jättämä vaikuttaa roottorin sähkömotorisen voiman suuruuden lisäksi sen taajuuteen. Mikäli roottori pyörii ilman jättämää ei siihen kehity roottorivirtoja synnyttäviä sähkömotorisia voimia, minkä takia oikosulkumoottori toimii käytännössä aina jättämällä. Tästä seuraa myös nimitys epätahtimoottori, sillä moottori pyörii aina tahtinopeutta pienemmällä nopeudella. (Hughes & Drury, 2019.) Oikosulkumoottorin pyörimisnopeus n_r määritetään

$$n_r = \frac{f_s}{p} (1 - s) \quad (2.5)$$

p on moottorin napapari-luku ja f_s on syöttötaajuus. Yhtälön (2.5) mukaisesti vakiotajuudella syötettävän oikosulkumoottorin pyörimisnopeuden määrää staattorikämmityksen rakenne ja kuorman vaikutuksesta syntyvä suhteellinen jättämä s . Jättämän tulee olla pieni, sillä käytännössä roottoriin syötettävästä tehosta jättämän määrittämä osuus muuttuu roottorin resistanssissa lämmöksi. Mitä pienempi roottoriresistanssi on sitä lähempänä tahtinopeuttaan moottori kehittää nimellisen vääntömomenttinsa. Vakiorakenteisten 50 Hz oikosulkumoottoreiden nimellinen jättämä on tyypillisesti 1–5 % moottorin koosta riippuen.

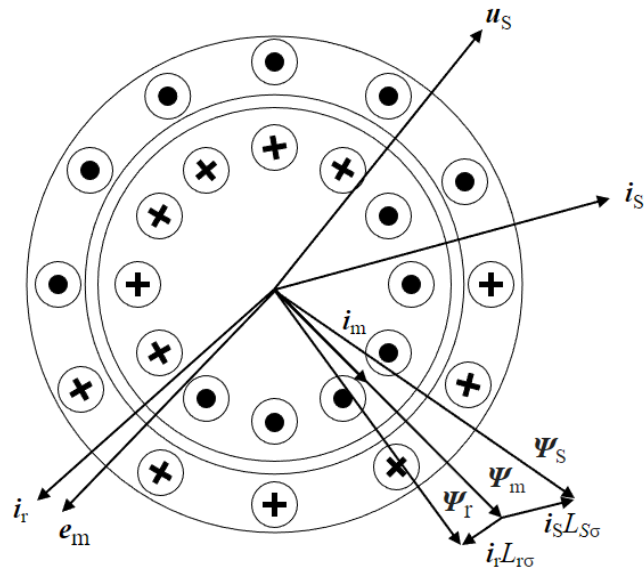
Monivaiheisten vaihtovirtakoneiden sinimuotoisesti jakautuneiden suureita voidaan havainnollistaa niiden virtuaalisten avaruusvektoreiden avulla. Avaruusvektoriesitys mahdollistaa

monivaiheisen järjestelmän analysoinnin vaihesuureiden yhteisvaikutusten kautta, joka on huomattavasti yksinkertaisempaa kuin kunkin vaiheen suureiden erillinen mallintaminen. Avaruusvektorit ovat täten tärkeä työkalu erityisesti säädettyjen kiertokenttäkoneiden muustilojen käsittelyssä.

Kiertokenttäkoneen, kuten oikosulkumoottorin sähköinen vääntömomentti T_e voidaan esittää staattorivirtavektorin \mathbf{i}_s ja staattorikämmivuovektorin Ψ_s ristitulona

$$T_e = \frac{3}{2} p \Psi_s \times \mathbf{i}_s \quad (2.6)$$

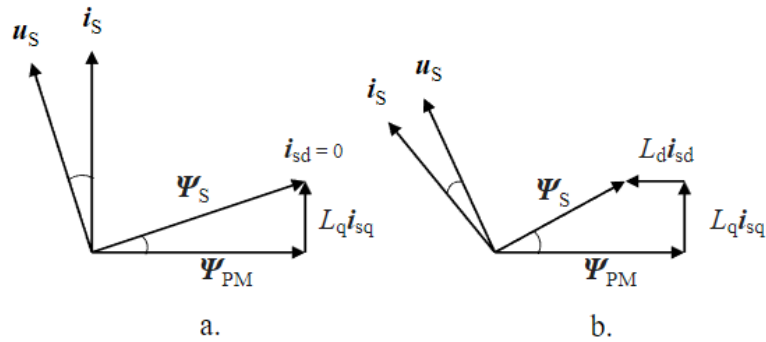
Toisin kuin täysin kompensoituissa tasavirtamoottoreissa, oikosulkumoottoreissa virta- ja kämmivuovektorit eivät asetu koneen rakenteen määräämänä automaattisesti kohtisuorasti toisiaan vastaan. Kuvassa 2.3 on esitetty miten ilmavälikämmivuo Ψ_m indusoi oikosulkumoottorin roottoriin jännitteen e_m . Roottorisauvan virta yhdessä ilmavälivuontiheyden kanssa synnyttävät vääntömomentin Lorentzin voiman mukaisesti. Oikosuljettuun roottoriin syntyvän roottorivirtavektorin \mathbf{i}_r ja staattorivirtavektorin \mathbf{i}_s summavektori magnetoi koneen ja synnyttää ilmavälikämmivuon, jonka ansiosta oikosulkumoottori kehittää vääntömomenttia Lorentzin voiman mukaisesti. Moottorin vääntömomentti voidaan laskea sekä staattorivirta- että roottorivirtavektorin ja ilmavälikämmivuon avulla. Kummankin virtavektorin ilmavälikämmivuota vastaan kohtisuora komponentti on yhtä suuri, mutta erisuuntainen. Siten staattorin ja roottorin vääntömomentit ovat päinvastaiset. Kun staattori kiinnitetään alustaan se ei pääse pyörimään vääntömomentin vaikutuksesta.



Kuva 2.3 Kolmivaiheisen oikosulkumoottorin poikkileikkaus ja yksinkertaistettu avaruusvektoriesitys. Staattorijännitevektori u_s integroituu Faradayn induktiolain mukaisesti staattorikämmivuovektoriksi Ψ_s . Ilmavälikämmivuovektori Ψ_m asettuu moottorin ilmavälivirtavektorin i_m suuntaan ja sen asema poikkeaa staattorikämmivuovektorista staattorin hajainduktanssin aiheuttaman hajakäämmivuon takia. Muokattu lähteestä: (Pyrhönen et al., 2016).

Tahtimoottorit ovat kiertokenttäkoneita, joiden roottori pyörii samassa tahdissa staattorikämmivuon kanssa ilman jättämää. Tahtikonekonstruktioista erityisesti kestmagneettitahtimoottori on osoittautunut kilpailukykyiseksi vaihtoehdoksi oikosulkumoottorille teollisuuden nopeussäädetyissä sovelluksissa. Kestomagneettitahtimoottorissa roottoriin on sijoitettu suuren koersiivisuuden omaavia kestmagneetteja, jotka tuottavat tyhjäkäyntimagneetoinnin. Erilaisia mahdollisia roottorirakenteita on useita, ja kestmagneettien asettelulla on suuri vaikutus moottorin ominaisuuksiin.

Kuvassa 2.4 on havainnollistettu kestmagneettitahtimoottorin toimintaa vektoriesityksien avulla. Moottorin vääntömomentin tuotto perustuu pääosin kestmagneettien kämmivuon Ψ_{PM} ja koneen poikittaissuuntaisen staattorivirran i_q tuloon. Kestomagneettien luonteesta johtuen, moottorin kentänheikennys täytyy toteuttaa demagnetoimalla staattorin kämmivuota. Riippuu moottorin haja- ja magnetointi-induktanssien suhteesta, kuinka suuri osuus kentänheikennyksestä kohdistuu itse magneettien vuontiheyteen. Moottorin kentänheikennys edellyttää negatiivista pitkittäissuuntaista virtakomponenttia.



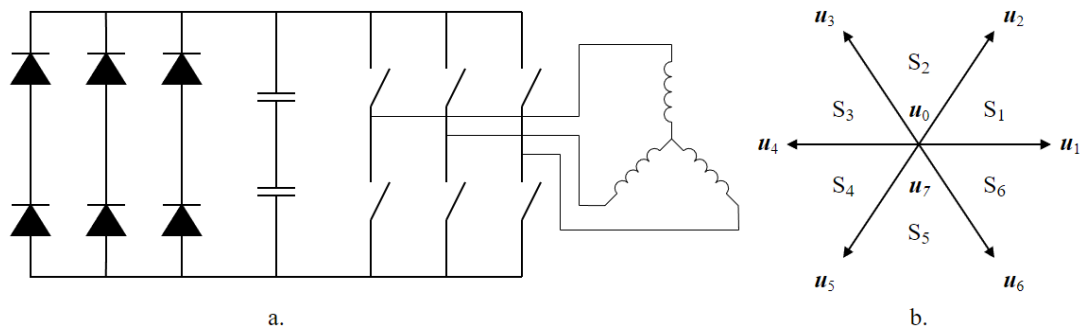
Kuva 2.4. Yksinkertaistettu kestopagneettitahtikoneen avaruusvektorioppiirros, a. ilman kentänheikennystä ja b. kentänheikennyksessä. Kentänheikennyksessä staattorikäännavuovektorin Ψ_S pienentämiseksi staattorivirtavektorin pitkittäissuuntaiselle komponentille i_{sd} annetaan negatiivinen referenssi. Muokattu lähteestä: (Pyrhönen et al., 2016).

Toisin kuin tasavirta- ja oikosulkumoottorissa, kestopagneettitahtimoottorin roottorissa ei ole virtapiiriä, jossa syntyisi resistiivisiä häviöitä. Tällä on positiivinen vaikutus moottorin hyötysuhteeseen ja termiseen kuormitettavuuteen, sillä roottori tuottaa hyvin vähän lämpöä, joka pitää tuoda ulos moottorista. (Hughes & Drury, 2019.) Tosin kestopagneettiroottorin ongelmaksi voi muodostua sitä kuumana ympäröivä staattori, joka lämmittää roottorin, vaikka siinä itsessään tapahtuukin vain vähäisiä häviöitä. Mitä kuumempina roottori käy sitä kalliimpia kestopagneetteja tarvitaan. Jos verrataan kestopagneettikoneen häviöitä oikosulkukoneen häviöihin, huomataan, että jättämään verrannolliset häviöt puuttuvat, mikä parantaa hyötysuhdetta likimäärin jättämän s verran. Kun kestopagneettikoneen tyhjäkäyntimagnetointi saadaan lähes häviöttä kestopagneettien avulla, jää staattorivirta vakiovoalueella selvästi pienemmäksi kuin oikosulkukoneessa. Näin säästyy merkittävä määrä virtalämpöhäviöitä sekä staattorilla että roottorilla. On kuitenkin tilanteita, jossa vuon pienentäminen olisi eduksi. Oikosulkumoottorikäytöistä tuttua vuon optimointia ei käytännössä voi harjoittaa kestopagneettikoneilla.

2.1.3 Sähkömoottorin säätö

Sähkömoottorin säätäminen toteutetaan muokkaamalla moottorille syötettävän jännitteen ominaisuuksia. Staattorin syöttöjännitettä hallitaan tyypillisesti kuvan 2.5 a. mukaisella kaksitasoisella jännitevälipiirillisellä taajuusmuuttajalla. Taajuusmuuttajaan syötettävä verkkojännite tasasuunnataan esimerkiksi diodisillan avulla. Vaihtosuuntaajan avulla kuorman yksittäinen vaihe kytketään välipiirin + tai – potentiaaliin.

Avaruusvektorimoduloinnissa taajuusmuuttajan vaihtosuuntaaja yhdessä staattorikäimityksen kanssa toimii avaruusvektoriteorian mukaisten jännitevektorien muodostajana. Kaksitasoisen ja kolmivaiheisen vaihtosuuntaajan kuudella puolijohdekytkimellä on kahdeksan mahdollista erilaista kytkentää, joilla voidaan muodostaa kuusi aktiivista jännitevektoria ja kaksi nollavektoria. Aktiiviset vektorit rajaavat välilleen kuusi erillistä sektoria. Jännitevektoreita on havainnollistettu kuvassa 2.5 b. Jännitevektori suunnataan kytkemällä sektorin sivuavia aktiivisia vektoreita ja nollavektoreita modulointisekvenssin mukaisesti (Pyrhönen et al., 2016).



Kuva 2.5. a. Kaksitasoinen jännitevälipiirillinen kolmivaihetajuusmuuttaja, b. vaihtosuuntaajan eri kytkinasentojen avulla tuotettavat mahdolliset jännitevektorit ja niiden rajaamat sektorit. Taajuusmuuttajaa voidaan pulssinleveysmodulaation lisäksi hyödyntää aaltovektorimoduloinnissa. Muokattu lähteestä: (Pyrhönen et al., 2016)

Sähkömoottorin pyörimisnopeutta voidaan kasvattaa yli moottorin nimellisarvon taajuusmuuttajan avulla. Nimellistaajuuden yläpuolella olevaa moottorin toiminta-aluetta kutsutaan

kentänheikennysalueeksi. Kulmataajuuden kasvaessa yli moottorin nimellisarvon on käämivuota pienennettävä, jotta moottorin liitinjännite pysyy nimellisarvossaan (Pyrhönen et al., 2016). Käämivuon pienentäminen johtaa tilanteeseen, jossa moottorin pyörimisnopeuden kasvattaminen tehdään moottorista saatavilla olevan vääntömomentin kustannuksella.

Oikosulkumoottorin pyörimisnopeuden säätäminen voidaan yksinkertaisimmillaan toteuttaa muokkaamalla syöttöjännitteen taajuutta ja amplitudia. Säätömenetelmää, jossa säädettävät suureet ovat moottorin syöttöjännitteen taajuus ja amplitudi kutsutaan skalaarisäädöksi. Oikosulkumoottorin skalaarisäätö perustuu moottorin pysyvän tilan yhtälöihin (Pyrhönen et al., 2016). Kentänheikennystä ja resistanssin aiheuttaman jännitehäviön kompensointia lukuun ottamatta jännitteen ja taajuuden suhde pyritään pitämään vakiona. Skalaarisäätö on kelvollinen esimerkiksi pumppu- ja puhallinsovelluksiin, jotka eivät vaadi tarkkaa vääntömomentin hallintaa, sekä monimoottorikäyttöihin.

Vaativammat säätösovellukset, jotka edellyttävät vaihtovirtakoneen vääntömomentin tarkempaa hallintaa perustuvat vektorisäätöön. Vektorisäädössä moottorin tilaa analysoidaan mitattujen vaihevirtojen ja mahdollisesti myös välipiirin jännitteen avulla. Vektorisäätö perustuu säädettävän moottorin kaksiakselimalliin, jossa virran pitkittäiskomponentti tuottaa käämivuon ja poikittaishäviökomponentti vääntömomentin. Staattorivirran käämivuota ja vääntömomenttia tuottavia komponentteja pyritään hallitsemaan erillisesti (Pyrhönen et al., 2016).

Vektorisäädöllä pyritään säilyttämään virta- ja käämivuovektorien välinen kohtisuoruus, jotta moottori pystyy tuottamaan suurimman mahdollisen vääntömomentin. Staattorivirran komponentteja ei pystytä kuitenkaan mittaamaan suoraan, minkä takia mitatut virrat erotellaan käämivuon ja vääntömomentin tuottaviin virtakomponentteihin koordinaatistomuunnosten avulla. Käämivuo estimoidaan hyödyntämällä moottorin sijaiskytkentään perustuvaa moottorimallia. Käytetty moottorimalli lopulta määrittää säädön takaisinkytkennässä käytettävät ohjaussuureet (Pyrhönen et al., 2016).

Suora vääntömomentinsäätö (engl. direct torque control, DTC) on kehittynyt ja laajalti hyödynnetty menetelmä kiertokenttäkoneiden säätöön. DTC perustuu suoraan käämivuosäätöön, jossa staattorijännitevektoria integroimalla määritetään koneen staattorikäämivuo. Tämän lisäksi DTC sisältää esimerkiksi virtamalli- tai keskipistekorjauksen, joilla pyritään säilyttämään staattorikäämivuon origokeskeisyys. Vaihtosuuntaajan kytkentöjen avulla staattorikäämivuota ja vääntömomenttia ohjataan niille määritettyjen hystereesirajojen sisällä

(Pyrhönen et al., 2016). Estimoidusta roottorikäänivuosta voidaan määrittää moottorin akselin asento riittävällä tarkkuudella moniin säätösovelluksiin.

2.2 Kuorma

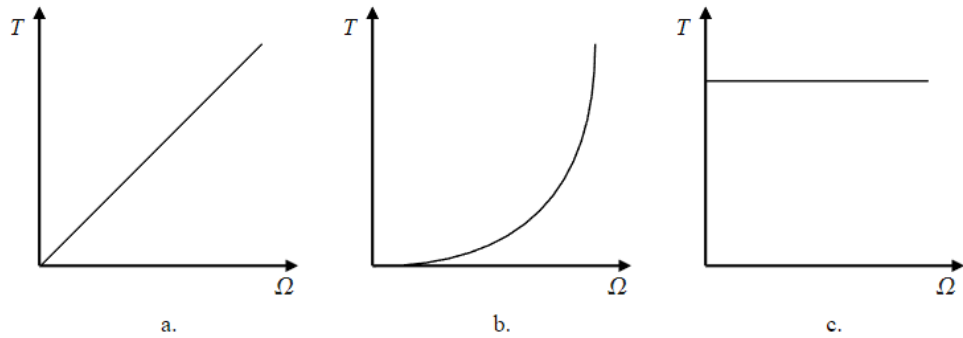
Sähkökäytöltä vaadittavat ominaisuudet riippuvat kyseessä olevan sovelluksen kuormasta ja kuormituksen luonteen ymmärtäminen on keskeistä sähkökäytön teknisten valintojen kannalta. Sähkökäytön suunnittelun näkökulmasta tärkeimmät tiedot kuormasta ovat jatkuvan tilan vääntömomentin karakteristiikka kuorman nopeuden suhteen, moottorin kokema kokonaishitausmomentti ja vaadittu dynaaminen suorituskyky (Hughes & Drury, 2019).

$$T_e = T_L + J \frac{d\Omega}{dt} + D\Omega \quad (2.7)$$

Sähkökäytön tuottaman vääntömomentin ja kuorman välisen mekaniikan suhdetta voidaan havainnollistaa yhtälön (2.7) avulla, jossa T_e on sähkömoottorin tuottama vääntömomentti, T_L on kuorman vääntömomentti, J on systeemin kokonaishitausmomentti ja $D\Omega$ on kitkan vääntömomentti (Pyrhönen et al., 2016). Erityisesti hitausmomentin vaikutus tulee ottaa huomioon, mikäli kuorman kiihdytykselle ja pysäytykselle on asetettu suorituskykyvaatimuksia. Kuvassa 2.6 on havainnollistettu eri kuormatyyppien vääntömomenttia niiden pyörimisnopeuden suhteen.

Osa sähkömoottoreihin syötetystä tehosta muuttuu aina lämmöksi, joka on saatettava moottorin eri osista ympäristöön. Moottorin lämpötila ja terminen kuormitettavuus määrittävät lopulta moottorin pysyvän tilan maksimikuormitettavuuden. Moottorin ympäristön lämpötila on täten keskeinen parametri sähkökäytön mitoituksessa ja korkea ympäristön lämpötila laskee moottorin termistä kuormitettavuutta.

Säädetyin sähkökäytön kannalta on olennaista arvioida, moottorin terminen kuormitettavuus kuorman eri toimintapisteissä. Vakio-oikosulkumoottorit ovat tyypillisesti itsejäähdytteisiä, jolloin niiden jäähdysteho laskee moottorin pyörimisnopeuden laskiessa. Vakiovääntömomentin vaativa kuorma voi esimerkiksi edellyttää moottorin lisäjäähdytystä pienellä pyörimisnopeudella.



Kuva 2.6. Kuorman vääntömomenti pyörimisnopeuden suhteen eri kuormatyypeille, a. lineaarinen vääntömomenti, b. neliöllinen vääntömomenti ja c. vakiovääntömomenti. Muokattu lähteestä: (Pyrhönen et al., 2016.)

Hidasta pyörimisnopeutta edellyttävät sovellukset, kuten kuljettimet tyypillisesti hyödyntävät vaihdetta sähkökäytön voimansiirrossa. Häviöttömän vaihteen välityssuhde a määritetään

$$a = \frac{N_e}{N_L} = \frac{T_e}{T_L} = \frac{\Omega_L}{\Omega_e} \quad (2.8)$$

N_m ja N_L ovat vaihteen hammaspyörien hammasluvut, Ω_L on kuorman kulmanopeus ja Ω_e on sähkömoottorin kulmanopeus (Pyrhönen et al., 2016). Vaihteiden avulla on mahdollista mekaanisesti sovittaa sähkömoottorin pyörimisnopeus ja vääntömomenti sovelluksen vaatimalle alueelle.

Sähkömoottori voidaan tietenkin rakentaa mille pyörimisnopeudelle tahansa, mutta käytännössä hyvin matalat nopeudet eivät ole sähkökoneille yleisesti tyypillisiä, vaan vaihteiden avulla saadaan edullinen kokonaisuus. Sähkökoneen vääntömomenti määrää suurin piirtein käytännössä koneen hinnan, joten suuren vääntömomentin hidas moottori on paljon kalliimpi kuin pieni nopeakäyntinen sähkökone alennusvaihteen kanssa.

2.3 Sähkökäyttöjen energiatehokkuus

Williams (2022) esittää, että 95 % sähkömoottorin elinkaarikustannuksista koostuu itse moottorin kuluttamasta sähköenergiasta. Sähkökäytön kuluttaman sähköenergian vähentäminen voi täten tarjota suuren kustannussäästöpotentiaalin. Euroopan komissio (2019) on

asettanut vähimmäisvaatimukset kolmivaihemootoreiden ja taajuusmuuttajien energiatehokkuuksille, jotka perustuvat IEC:n määrittämiin vähimmäishyötysuhdeluokituksiin. Taajuusmuuttajakäytössä tehohäviöiden raja-arvot on määritetty moottorin staattorin 90 %:in nimellistaajuudella ja 100 %:in nimellisellä vääntömomentilla.

Säädettyjen sähkökäyttöjen toimintapiste sijaitsee yleensä moottorin nimellisvääntömomentin ja nimellistaajuuden ulkopuolella – juuri siksihän nopeussäädettyä käyttöä sovelletaan. Osakuormalla toimivassa taajuusmuuttajakäytössä oikosulkumoottorin rauta- ja magnetointivirtahäviöt voivat heikentää käytön hyötysuhdetta huomattavasti. Tämä on seurausta siitä, että rautahäviöt ovat suurimmilta osin riippuvaisia koneen vuon huippuarvosta ja taajuudesta. Edellä mainittua on havainnollistettu taulukossa 2.1, josta nähdään oikosulkumoottorin hyötysuhteen pienenevän nimellisarvostaan osakuormituksella. Oikosulkumoottorin hyötysuhdetta osakuormalla voidaan parantaa pienentämällä moottorin vuota sen nimellisarvosta. Vuon pienentämisen vaikutusta voidaan arvioida esimerkiksi seuraavalla tavalla tuntematta yksityiskohtaisesti moottorin parametreja. Taulukossa 2.1 esitetyn moottorin nimellinen tehokerroin on 0,83, minkä mukaan reaktiivisen virtakomponentin I_Q osuus moottorin näennäisvirrasta I_S vakiovuolla on

$$I_Q = \sqrt{I_S^2 - I_P^2} = 0,56$$

Vakiovuolla ja esimerkiksi 25 % nimelliskuormalla moottorin virran suuruus suhteessa sen nimellisarvoon voidaan arvioida olevan

$$I_{S,100\%} = \sqrt{0,56^2 + (0,25 \cdot 0,83)^2} = 0,60$$

Jos moottorin vuo pienennetään 75 %:iin, niin staattorivirran suuruus suhteessa nimellisarvoon pienenee arvoon

$$I_{S,75\%} = \sqrt{(0,56 \cdot 0,75)^2 + \left(\frac{0,25 \cdot 0,83}{0,75}\right)^2} = 0,50$$

Oletetaan staattorikämmityksen resistanssin säilyvän muuttumattomana, jolloin staattorin kuparihäviöt $P_{Cu,S}$ ovat verrannolliset staattorivirran neliön suhteen. Vakiovuolla tässä kuormitustilanteessa staattorin kuparihäviöiden suhteessa nimelliskuormitukseen voidaan arvioida olevan

$$P_{\text{Cu,S,100 \%}} = \frac{I_{\text{S,100 \%}}^2}{I_{\text{S,nom}}^2} = 0,36$$

Pienennetyllä vuolla kuparihäviöiden suuruus on

$$P_{\text{Cu,S,75 \%}} = \frac{I_{\text{S,75 \%}}^2}{I_{\text{S,nom}}^2} = 0,25$$

Suurehkon oikosulkumoottorin staattorin kuparihäviöiden arvona voidaan pitää 1,5 % moottorin nimellistehosta. Edellisen perusteella vakiovuolla käyvän oikosulkumoottorin staattorin kuparihäviöiden suuruuden voidaan arvioida täten olevan 0,53 % ja 75 %:in vuolla 0,38 % moottorin nimellistehosta.

Esimerkin moottorin nimellinen jättämä on 0,8 % ja 25 %:in kuormituksella jättämä on vastaavasti 0,2 %. Pienentyneen vuon myötä koneen jättämä ja roottorivirta kasvavat, jotta moottorin tuottama vääntömomentti säilyy ennallaan. Jättämä ja roottorin kuparihäviöt $P_{\text{Cu,R}}$ kasvavat vuontiheyden käänteisarvon neliön suhteen, jolloin 75 %:in vuolla häviöt ovat 1,7-kertaiset vakiovuokäyttöön nähden.

Moottorin rautahäviöiden suuruuden voidaan yksinkertaistaa olevan verrannollinen vuontiheyden B neliön kanssa. Pienentyneellä vuolla moottorin rautahäviöiden P_{Fe} suuruuden suhteessa niiden nimellisarvoon voidaan arvioida olevan

$$P_{\text{Fe,75 \%}} = (B_{\text{nom}} \cdot 0,75)^2 = 0,56$$

Rautahäviöiden nimellisarvon ollessa tyypillisesti 1,0 % moottorin nimellistehosta, 75 % vuolla rautahäviöt pienenevät 0,56 %:iin. Kitka- ja lisähäviöt arvioidaan yhtä suuriksi molemmissa tilanteissa, jolloin moottorin häviökomponenttien summaksi vakiovuolla muodostuu 1,73 % moottorin nimellistehosta ja 75 %:in vuolla 1,30 % moottorin nimellistehosta. Edellisen tarkastelun perusteella moottorin häviöt pienenevät noin 25 %, jos moottorin vuota pienennetään 75 %:iin. Häviökomponenttien osalta suurin muutos tapahtuu rautahäviöissä, jotka miltei puolittuvat.

Taulukko 2.1 450 kW kolmivaihemoottorin valmistajan ilmoittamat hyötysuhdearvot taajuusmuuttajakäytössä. Moottorin hyötysuhde on merkittävästi nimellisarvoaan pienempi pyörimisnopeuden ja vääntömomentin vähentyessä. P_1 kuvaa moottorin häviötehoa ja niitä verrataan nimellistehoon P_n . Muokattu lähteestä: (ABB, 2024)

n_n [%]	T_n [%]	η [%]	P_1 [W]	P_1/P_n [%]
90	100	94,1	25400	5,6
50	100	92,0	19600	4,3
25	100	86,4	17700	3,9
90	50	93,3	14500	3,2
50	50	92,3	9390	2,1
50	25	89,5	6600	1,5
25	25	85,0	4960	1,1

Energiatohokkuuden näkökulmasta säädetty sähkökäyttö on edullista mitoittaa toimimaan lähellä nimellispistettä. Tarpeeton ylimitoittaminen on myös epätehokasta pääoman hyödyntämistä, sillä suuri mitoitusaste heijastuu mm. huolto-, kaapelointi- ja asennuskustannuksiin. Mitoituksessa on kuitenkin perusteltua varata tehoreserviä, jotta sähkökäyttö kykenee täyttämään prosessin vaihtelevat vaatimukset ja mahdolliset kuorman suuruuden virhearvioinnit.

Mikäli kuorma ei vaadi moottorin täyttä nimellistä vääntömomenttia, niin oikosulkumoottorin käämivuon ohjearvoa voidaan optimoida moottorin häviöiden minimoimiseksi, kuten aikaisemmin osoitettiin. Käämivuon optimointimenetelmät voidaan karkeasti jakaa toimintaperiaatteensa mukaan kahteen eri ryhmään; häviömalleihin perustuviin säätimiin ja iteratiivisiin online-säätimiin. Online-säätimet mittaavat sähkökäytön syöttötehoa, ja käämivuota säädetään iteroiden, kunnes syöttötehon minimi saavutetaan. Menetelmän etu on se, että sen käyttö ei edellytä tietoa moottorin parametreista. Säätimen säätövirhe kuitenkin suppenee hitaasti ja iterointi voi johtaa piikkeihin moottorin vääntömomentissa. (Qu et al., 2012.) Käämivuon optimointi voi täten olla epäkäytännöllinen sovelluksissa, joissa käytön vääntömomentin laadulle on korkeat kriteerit. Tämä on olennaista paperikoneiden sähkökäytöissä, joissa epätasaisuudet käyttöjen vääntömomentissa voivat aiheuttaa ratakatkon.

2.4 Paperikoneiden sähkökäytöt

Sähkökäytöt ovat yksi paperikoneen keskeisimmistä laitekokonaisuuksista. Sähkökäyttöjen avulla paperirainaa siirretään eteenpäin pitkin paperikonetta. Paperirainan etenemisnopeus eli ns. ratanopeus määrittää paperikoneen tuotantomäärän yhdessä valmistettavan paperilaidun neliöpainon ja rainan leveyden kanssa. Paperikoneen yksittäinen käyttö voidaan jakaa

kahteen osaan, mekaaniseen käyttölaiteistoon ja sähkökäyttöön. Sähkökäyttöön syötettävä sähköteho muunnetaan mekaaniseksi tehoksi ja johdetaan käytön mekaniikan kautta paperikoneen ajettavalle osalle, joka on tyypillisesti tela tai sylinteri. Yleisesti ottaen käyttöjen suunnitteluperiaatteet ja tehovaatimukset eivät riipu tuotettavasta paperilaadusta, vaan enemminkin paperikoneen leveydestä ja nopeudesta. Paperikoneen käyttöjen tulee kyetä toimimaan pitkiä aikoja luotettavasti vaativissa toimintaolosuhteissa. Käytön suunnittelussa vaikuttavia tekijöitä ovat käytön tilantarve, käytön vaatiman kunnossapidon määrä ja sen haasteellisuus, sekä moottorin ja mahdollisten vaihteiden asemointi. (Karlsson, 2010.)

Paperikoneen sähkökäytölliset telat ja sylinterit välittävät kudosten, kuten viirojen ja huopien avulla vääntömomenttia muille teloille. Yksi kudus muodostaa tällöin käyttöryhmän, joka sisältää pääkäytön lisäksi tarvittavan määrän apukäyttöjä. Kudosten hyödyntäminen voimansiirrossa mahdollistaa käyttöjen määrän optimoinnin. Käyttöjen määrän optimoinnissa tulee kuitenkin varmistaa, että jokainen käytöllinen tela pystyy välittämään tarpeeksi vääntöä ilman, että kudus luistaa telan pinnalla. Telojen ja kudosten väliseen voimansiirtokykyyn vaikuttavat esimerkiksi kudoksen kireys ja komponenttien välisen kitkan määrä. Käyttöjä kuormittavat mm. telojen ja kudosten apulaitteet, kuten vedenpoistossa käytetyt imulaatikot ja teloja puhdistavat kaapimet. (Karlsson, 2010.) Paperikoneen toiminnan kannalta on tärkeää ylläpitää paperirainan kireyttä oikealla tasolla. Rainan ja kudosten kireys näkyy voimana ja voima ilmenee vääntömomenttina sähkökäytön akselilla. Teho P voidaan määrittää voiman F ja nopeuden v tulona ja tämän pohjalta voidaan esittää seuraavat paperikoneiden tapauksessa käytettävät yhtälöt

$$P = Fk \quad (2.9)$$

$$k = lv \quad (2.10)$$

Käyttöjen tehontarpeen arvioinnissa käytetään yhtälöä (2.9), jossa F on kuormituskerroin ja k on konevakio. Kuormituskertoimen arvo on määritetty kullekin komponentille. Konevakio voidaan määrittää yhtälöllä (2.10), jossa l on rainan leveys, ja v on koneen suunnittelunopeus. (Karlsson, 2010.)

Paperikoneen käyttöjen mitoittamisessa määritetään eri toimintapisteiden NRL- ja RDC-teho. NRL (normal running load) viittaa käytön tehontarpeeseen normaaleissa toimintaolosuhteissa, kun taas RDC (recommended drive capacity) kertoo käytön tehontarpeen poikkeuksellisissa toimintaolosuhteissa, kuten suurien tyhjötasojen tai vesikuormien alla. Paperikoneen sähkökäytöt mitoitetaan tyypillisesti RDC-tehon mukaan ja mekaanisten osien

mitoituksessa tyypillisesti hyödynnetään NRL-tehoa. Yleisin kuormatyyppi paperikoneissa on vakiovääntömomenttikuorma. (Karlsson, 2010.) Kuormatyyppin mukaisesti kuorman vaatima teho kasvaa suoraan verrannollisesti pyörimisnopeuden kanssa. Sähkökäyttö tulee siis mitoittaa suurimman pyörimisnopeuden vaatimusten mukaan.

Tehotarpeen kannalta on myös huomattava paperikoneen kiihdyttämisen vaatima teho, joka riippuu koneen suunnittelunopeudesta, kiihdytettävien osien hitausmomenteista ja vaaditusta kiihtyvyydenopeudesta. Suositeltavan kiihtyvyyden arvoksi esitetään 300 m/min^2 . Kiihdytyksen vaatima teho on merkittävä erityisesti paperikoneen kuivatusosalla kuivatussylinderien suuren hitausmomentin takia. Onkin tavanomaista, että kuivatusosalle määritetään erikseen kiihdytyksen vaatima lisäteho ja tästä seuraava kokonaisteho, joka on tyypillisesti huomattavasti suurempi kuin RDC-teho. Käyttöryhmien kiihdyttämiseen kuluvan ajan perusteella kiihdytysjaksoon on mahdollista suhtautua suunniteltuna sähkökäytön ylikuormitusjaksona, jolloin voidaan välttyä moottorin tarpeettomalta ylimitoittamiselta muihin ajotilanteisiin nähden. (Karlsson, 2010.)

2.4.1 Ylemmän tason säätömenetelmät

Paperikoneen sähkökäyttöjen on pystyttävä säätämään koneen eri osien nopeutta laajalla alueella, sekä suurella tarkkuudella. Tyypillisesti vaaditaan enintään 0,02 %:n nopeuspoikkeamaa. Rainan siirtyessä koneen osalta toiselle ilman minkään kudoksen tukea on tärkeää ylläpitää sopivan suuruinen kireys paperirainassa. Sähkökäyttöjen kannalta radan kireys on riippuvainen koneen eri osien välisen nopeuseron eli ns. vetoeron suuruudesta. Puutteellinen nopeudenhallinta ja tätä seuraava hallitsematon ratakireys voivat johtaa rainan repeämiseen, josta seuraa tuotantokatkos. (Smook, 2016.) Paperikoneen sähkökäyttöjen pääasialliset käyntitilat ovat ryömintä, hidasajo ja ns. tuotantoajo, jossa käyttöjen nopeutta säädetään tuotannon vaatimusten mukaisesti. Hidasajoa käytetään tyypillisesti paperikoneen kudosten vaihdossa viira-, puristin- ja kuivausosilla. (Karlsson, 2010.)

Käyttöjen ohjausjärjestelmän nopeusohjeketju määrittää nopeus- ja vääntöohjeet kullekin käytölle. Nopeusohjeketjun rakenteesta on olemassa monia erilaisia muunnelmia ja tunnusomaisia piirteitä nopeusohjeketjulle ovat esimerkiksi: (Karlsson, 2010.)

- Viiraosa toimii koko paperikoneen pääosana. Runkoviiran nopeuden pitäminen tasanaisena helpottaa suihkusuhteen hallintaa.
- Käytöt, joilla on suuri peittokulma ja täten hyvä kontakti kudosten kanssa ovat osa nopeusohjeketjua. Näiden käyttöjen vetoerojen asettelut vaikuttavat myös seuraaviin käyttöryhmiin.
- Käytöt, joilla on heikko kontakti kudosten kanssa seuraavat käyttöryhmän isäntää. Näiden käyttöjen veto- ja nopeuserojen asettelut isäntäkäyttöön nähden eivät vaikuta seuraaviin käyttöryhmiin. Edellä mainittuja käyttöjä kutsutaan myös nopeusohjeketjun haaroiksi.
- Nopeusohjeketjuun kuuluvat myös tyypillisesti puristin- ja kuivausosan, kalanterin, sekä rullaimen käytöt.
- Yläviirat, johto- ja levitystelat, päällystysasemat ja muut käytöt, joilla on heikko kontakti paperirataan ovat tyypillisesti nopeusohjeketjun haaroja.
- Käytöt, jotka on mekaanisesti yhdistetty toisiinsa hyödyntävät isäntä-orja-periaatetta. Isäntäkäytön valintaan ei ole yksiselitteistä valintaperiaatetta, mutta esimerkiksi suuritehoisin käyttö on tyypillinen valinta isännäksi.
- Paperikoneen eri osien välinen vetoerojen asettelu ilmaistaan prosenteissa ja se on verrannollinen koneen ratanopeuteen.
- Yksi käyttö johtaa kutakin yksittäistä koneosuutta ja muut käytöt säätävät nopeutensa suhteessa johtavan käytön nopeuteen.

Nopeussäädön lisäksi paperikoneiden sähkökäytöissä tyypillisesti käytetään myös vääntömomentti- ja kireyssäätöä. Kireyssäätö on käytännössä sähkökäytön näkökulmasta epäsuora vääntömomenttisäätö. Käyttöjen vääntömomenttisäädössä ei tyypillisesti hyödynnetä mitatun vääntömomentin takaisinkytkentää, vaan säätö perustuu moottorimallin hyödyntämiseen vääntömomentin estimoinnissa. Pyörimisnopeuden mittaamisessa hyödynnetään pulssiantureita, joiden vaihtoväli on noin viisi vuotta. Tapauskohtaisesti nopeussäätö voi olla toteutettu myös ilman varsinaista mitatun pyörimisnopeuden takaisinkytkentää. Nopeussäätöjen kehityssuunta tähtää pulssiantureiden määrän vähentämiseen. (Karlsson, 2010.) Eri tahtikoneiden soveltaminen tarjoaa tähän erinomaisen lähtökohdan. Epätahtikoneen tarkka nopeussäätö ilman nopeusanturia on selvästi haasteellisempaa kuin tahtikoneiden.

Paperikoneen sähkökäyttöjen kuorman vääntömomenttiin ja täten myös paperiradan etene-
misen hallintaan vaikuttaa mm. seuraavat dynaamiset tekijät (Karlsson, 2010):

- Kuivatussyylinterien vesikuorman vaikutus kuivausryhmien nopeussäätöön.
- Telat ja kuivaussyylinterit, joita ei ole tasapainotettu.
- Voimansiirroissa olevien välysten kompensointi.
- Ilma kudoksen ja telan rajapinnassa aiheuttaa kudoksen luistamista telan pinnalla. Ilmiö on riippuvainen ajonopeudesta.
- Virhe telahalkaisijoiden mitoissa voi aiheuttaa luistoa kuormanjaossa. Kuormanjako voi johtaa myös kudosten venymiseen.
- Mekaanisten rakenteiden elastisuudesta aiheutuvat taivutus- ja vääntöväärhtelyt.

Lämpötilaerot etenkin paperikoneen kuivatusosalla vaikuttavat kuivatussyylinterien halkaisijoihin, ja tällä on suora vaikutus nopeussäädön tarkkuuteen.

2.4.2 Sähkökäytön valinta

Paperikoneiden sähkökäyttöjen mitoitusperiaatteena on, että käytöltä on oltava saatavissa koneenoson vaatima vääntömomentti paperikoneen koko nopeusalueella. Telojen ja sylinterien voidaan ajatella olevan osa sähkökäytön voimansiirtoa, sillä niiden halkaisijat yhdessä moottorien pyörimisnopeuden kanssa määrittävät kehänopeuden, joka tulee sovittaa paperikoneen ratanopeuden kanssa. Karlsson (2010) esittää, että telojen pyörimisnopeudet paperikoneissa vaihtelevat tyypillisesti 100–1000 r/min välillä. Usein on perusteltua valita suuren napaluvun sähkömoottori tai hyödyntää alennusvaihdetta voimansiirroissa. Valintaa suoran käytön ja alennusvaihteen välillä voidaan pitää yhtenä keskeisimmistä paperikoneen sähkökäyttöjen teknisistä valinnoista.

Suoran käytön avulla saavutetaan kompakti ja mekaanisesti yksinkertainen kokonaisuus. Vaihdelaatikat vaativat voitelua ja huoltoa, jotka lisäävät laitteiston kunnossapidollista kuormaa. On kuitenkin huomionarvoista, että jotkin koneenosat, kuten imutelat voivat edellyttää vaihteen käyttöä rakenteensa takia. Vaihdelaatikko lisää voimansiirron mekaanisia häviöitä,

mikä tulee ottaa huomioon eri vaihtoehtojen energiatehokkuuksien vertailussa. Vaihdelaatikon häviöt ovat tyypillisesti 1–1,5 % hammaskosketusta kohti.

Paperikoneissa käytettävien sähkömoottorien kronologinen kehitys seuraa hyvin pitkälti säädettyjen sähkökäyttöjen yleisiä trendejä. Vanhojen tasavirtakäyttöjen hyvän säädettävyyden vastapuolena on moottorien monimutkainen rakenne ja säännöllinen huollon tarve. Tasavirtamoottorien hiiliharjojen kulumista ja hiilenpitimien kuntoa on valvottava määräajoin, sillä hiiliharjojen loppuun kulumisen voi johtaa kommutaattorin ennenaikaiseen vaurioitumiseen. Paperikoneella hiiliharjojen huoltaminen edellyttää aina tuotantokatkoa. Tasavirtamoottorien määrän vähentyessä myös niiden huoltamisesta on kehittymässä erikoisammattitaitoa vaativa työsuorite. Tasavirtamoottorien moniosaiset käämitykset tekevät niiden kunnostamisesta kallista muihin moottorityyppeihin verrattuna.

Oikosulkumoottorit ovat yksinkertaisia ja vankkarakenteisia. Ne tekevät niistä tyypillisesti ensisijaisen valinnan moniin teollisuuden sähkökäyttösovelluksiin. Oikosulkumoottorin käytettävyyttä rajoittaa sen heikohko soveltuvuus suurta napalukua edellyttäviin sovelluksiin. Monivaiheisen kiertokenttämoottorin magnetointi-induktanssi on kääntäen verrannollinen moottorin napapari-luvun neliön kanssa. Moninapainen oikosulkumoottori vaatii tällöin suuren magnetointivirran, joka puolestaan ilmenee moottorin alhaisena tehokertoimena. Tämän takia oikosulkumoottorin kanssa tyypillisesti hyödynnetään alennusvaihdetta, mikäli ko. sovellus edellyttää pientä pyörimisnopeutta.

Verrattaessa oikosulkumoottoriin kestromagneettitahtimoottorit eivät vaadi staattoriin magnetointivirtakomponenttia, minkä tähden ne soveltuvat hyvin sovelluksiin, joissa vaaditaan pientä pyörimisnopeutta ja suurta napalukua. Kestomagneettien hinnat ovat korkeita ja vaihtelevat suuresti. Kestomagneettitahtimoottorien pääomakustannukset voivat olla suuria muihin moottorityyppeihin verrattuna. Tämä heikentää moottorityypin teknistaloudellista kilpailukykyä. Kestomagneettitahtimoottorin hyvän hyötysuhteen ja tehokertoimen avulla voi olla kuitenkin mahdollista kuolettaa moottorin korkeat investointikustannukset sen elinkaaren aikana.

Sähkökäyttöä suunniteltaessa tulee ottaa huomioon eri vaihtoehtojen koko elinkaaren kustannukset, sekä niiden vaatiman huollon määrä. Lopullinen valinta eri vaihtoehtojen välillä voidaan perustaa eri ratkaisujen energiatehokkuuteen ja arvoituihin kunnossapidollisiin kustannuksiin. Valinnoissa tulee myös huomioida olemassa olevan ja suunnitellun laitekannan

homogeenisuutta, joka vaikuttaa mm. varaosien yhteensopivuuteen. Erityisesti suurien sähkömoottorien ja suuntaajien kohdalla tulee selvittää mahdollisuudet hyödyntää samoja varaosia useammassa eri kohteessa.

Oikosulkumoottorin pyörimisnopeuden tarkka säätö edellyttää pyörimisnopeuden takaisin-kytkentää. Pyörimisnopeus voidaan mitata sähkömoottorin akselilta absoluuttianturin avulla tai vaihtoehtoisesti roottorin asema voidaan estimoida roottorin käämivuon komponenttien perusteella. Absoluuttianturin avulla saadaan erittäin tarkka tieto sähkömoottorin roottorin asemasta, mutta anturit ovat potentiaalinen vikaantumiskohde ja ne on vaihdettava määräajoin. Anturittoman nopeuden mittauksen hyödynnettävyyden lopulta määrittää käytettävän sovelluksen vaatimukset. Epäonnistunut nopeuden arviointi voi tuottaa haasteita mm. käyttöryhmien vetoerojen ja viiran suihkusuhteen hallinnassa. Karlsson (2010) esittää, että paperikoneen käyttöryhmien välisiltä vetoeroilta edellytetään 0,02 % tarkkuutta. On huomion-arvoista, että kaupalliset taajuusmuuttajat tarjoavat ratkaisuja pulssi- ja absoluuttianturien vikaantumisen haittojen minimoimiseen. Esimerkiksi ABB:n ACS880 taajuusmuuttajat voidaan parametroida siten, että anturin vikaannuttua taajuusmuuttaja siirtyy käyttämään laskennallista pyörimisnopeusarviota (ABB, 2018).

2.5 Paperikoneen 1 sähkökäytöt

PK1:llä on laaja skaala erilaisia sähkökäyttöjä, jotka edustavat eri aikakausien tekniikkaa. Teloja ja sylintereitä ohjaavia säädettäviä sähkökäyttöjä on yhteensä 27 kappaletta; 12 oikosulkumoottorikäyttöä, 10 kestopagneettitahtimoottorikäyttöä ja 5 tasavirtakäyttöä. Tämän lisäksi paperikoneella on lukuisia erilaisia sähkökäyttöisiä ruuveja ja hammastankoja esimerkiksi kiristimissä ja telojen liikuttajissa. Voimansiirtojen osalta käytöissä hyödynnetään alennusvaihteita, sekä suoraa käyttöä ilman välityssuhteen muokkaamista. Paperikoneen sähkökäyttöjen yhteenlaskettu nimellisteho on 4,383 MW, josta pääosa sijoittuu viira- ja puristinosalle. Paperikoneen ohjenopeuden maksimiarvo on 600 m/min. Paperikoneelle suoritettiin vuonna 2022 mittava puristinosan uusinta, jossa päivitettiin viira- ja puristinosan, sekä 1. kuivausryhmän sähkökäytöt.

PK1:n nopeusohjeketjun pääkäyttö on viiran vetotela (D011), mikä tarkoittaa sitä, että paperikoneen ajonopeuden säätöpiirin asetusarvo välittyy käytön nopeusohjeksi. Nopeusohjeiden asettelut ilmaistaan käyttöjen kehänopeutena, yksikön ollessa m/min. Onnistunut

ratanopeuden hallinta edellyttää käyttöjen pyörimisnopeuden mittaamisen lisäksi tarkkaa tietoa telojen ja sylinterien halkaisijoista. Säättöpiireissä käytetyt telahalkaisijat mitataan te-loista ja telahalkaisijat päivitetään telanvaihtojen yhteydessä.

Useammasta sähkökäytöstä koostuvat käyttöryhmät hyödyntävät kuormanjakosäätöä, jossa ryhmän pääkäyttö on nopeussäädettävä ja pääkäyttöön mekaanisesti yhteydessä olevat apu-käytöt toimivat vääntömomenttisäädöllä. Apukäyttöjen vääntömomenttiohjeasetuksella voi-daan tasata ryhmän käyttöjen kuormaa suhteessa niiden nimellistehoon, sekä kykyyn välittää vääntömomenttia yhteiseen voimansiirtoon, kuten kudokseen tai vaihteeseen.

Käyttöryhmien nopeus- ja vääntömomenttiohjeen asetusarvot määritetään

$$v_{\text{ref},n} = \left(\frac{v_{\text{ref},n-1} v_{\text{dif}}}{100} \right) + v_{\text{ref},n-1} \quad (2.11)$$

$$T_s = \frac{T_{\text{ref}} T_{\text{nom},P} n_P}{T_{\text{nom},S} n_S} \quad (2.12)$$

Yhtälössä (2.11) v_{ref} on käyttöryhmän nopeusohje yksikössä m/min ja v_{dif} on käyttäjän mää-ritettävissä oleva nopeuseron asetusarvo prosentteissa. Alaindeksi n kuvastaa sähkökäytön järjestysnumeroa nopeusohjeketjussa. Sähkökäyttöjen nopeuserojen myötä paperikoneen ra-tanopeus kasvaa koneen pituussuunnassa. Yksittäisen apukäytön vääntömomenttiohje kuor-manjaossa määritetään yhtälön (2.12) mukaisesti, jossa T_s on apukäytön vääntömoment-tiohje prosentteissa, T_{ref} on kuormanjaon asetusarvo prosentteissa, $T_{\text{nom},P}$ on pääkäytön nimel-lisvääntömomentti, n_P on pääkäytön pyörimisnopeus maksimiratanopeudessa, $T_{\text{nom},S}$ on apu-käytön nimellisvääntömomentti ja n_S on apukäytön pyörimisnopeus maksimiratanopeudessa. Paperikoneen automaatiojärjestelmässä määritetään käyttäjän toimesta kullekin käyttöryh-män apukäytölle kuormanjaon asetusarvo. Käyttöryhmän pääkäyttö seuraa omaa nopeusoh-jettaan ja apukäyttöjen vääntömomenttiohje määritetään pääkäytöltä estimoidun vääntömo-mentin avulla. Jäykissä voimansiirroissa, kuten jaetuissa vaihteissa pääkäyttö ohjaa suoraan apukäyttöä suuntaajien välisen sarjayhteyden avulla. Kudoksetoissa kuormanjakosovel-luksissa apukäytön vääntömomenttiohje lasketaan automaatiojärjestelmässä ja ohje välite-tään suuntaajalle kenttäväylän kautta.

Paperikoneen sähkökäyttöjen suorituskyvyn arvioimiseksi on olennaista tunnistaa erilaiset ajotilanteet ja selvittää minkälaisena kuormituksena ne ilmenevät sähkökäyttöille. Yhtälöt (2.9) ja (2.10) antavat lähtökohdan tarkastelulle, jonka perusteella huomionarvoisia ajotilan-teita ovat ne, joissa konekomponentit ovat suuressa kuormituksessa suurella ajonopeudella.

Sähkökäyttöjen ajamalla teloilla ja sylintereillä on myös suuria hitausmomenteja, joidenka takia kiihdytyksen vaatimaa lisätehoa tulee tarkastella erikseen.

Paperikoneen sähkökäyttöjen kiihdytyksen tarkasteluun valittiin ajotilanne, jossa paperikone kiihdytetään ryöminnystä ajonopeuteen päänvientiä varten. Tässä ajotilanteessa käyttöryhmien kuormituksessa eivät ryhmien väliset vetoerot vaikuta. Sähkökäyttöjen kiihdytystä havainnollistavat kuvaajat ovat esitettyinä liitteissä 1–7, joissa näkyvät kunkin ryhmän pääkäytön ratanopeus ja käyttöjen vääntömomentit. Sähkökäyttöjen kuormitusprofiilin tarkastelemiseksi mittausaineistoksi valittiin jokaisen sähkökäytön taajuusmuuttajalta mitattu vääntömomentti ja moottorin pyörimisnopeus vuoden ajalta. Kuvaajiin on myös merkitty paperikoneen tämänhetkinen ratanopeuden maksimi suhteutettuna kunkin käytön nimelliseen pyörimisnopeuteen. Paperikoneen sähkökäyttöjen kuormitusprofiileja on havainnollistettu liitteissä 8–15.

2.5.1 Viiraosa

PK1:en viiraosalla on kolme sähkökäyttöä; viiran vetotela (D011), viiran imutela (D012) ja yläviiran eli ns. formerin vetotela (D013). Viiran veto- ja imutelojen käytöt muodostavat oman käyttöryhmänsä ja formerin vetotela on erillinen käyttö omalla nopeusohjeellaan. Viiran imutelan käyttö toimii apukäyttönä kuormanjaolla. Ylä- ja alaviiran välillä ei ole erillistä voimansiirtoa, mutta kudosten väliin muodostuvan nipin takia käyttöjen nopeuksien tarkka yhteensovittaminen on tärkeää. Teloja viiraosalla on yhteensä 15 kappaletta, alaviiralla 10 ja yläviiralla 5. Alaviiran sähkökäytöt ovat sijoitettu viiraosan raskaimmille teloille, joista vääntömomentti välittyy pitkän runkoviiran avulla muille teloille.

Paperiraina muodostuu perälaatikolta runkoviiralle siirrettävästä hyvin vesipitoisesta massasta. Viiraosalla raina on raskaimmillaan, sillä se sisältää vielä erittäin paljon vettä. Alaviiralla vettä poistuu rainasta painovoiman avulla, minkä lisäksi vedenpoistoa tehostetaan imulaatikoiden, foililistojen ja imutelan avulla. Vedenpoistolaitteiden alipaine kuormittaa käyttäjiä viiran liikkuessa paikallaan olevien vedenpoistoelementtien ylitse. Yläviiralla vettä poistetaan myös rainan yläpuolelta yläimulaatikon avulla. Viiraosan tyhjötasoilla ja ajettavalla paperilaadulla on keskeinen vaikutus sähkökäyttöjen kuormitukseen.

Paperikoneen sekoituspumppu paineistaa lyhyen kierron konesihtien syöttövirran, josta sihtien aksepti johdetaan perälaatikkoon. Sekoituspumppu on pyörimisnopeussäädetty 410 kW sähkökäyttö ja sen pyörimisnopeudella säädetään perälaatikon painetta. Perälaatikon paineella voidaan puolestaan vaikuttaa perälaatikosta viiralle syötettävän massasuspension ja viiran väliseen nopeuseroon eli ns. suihkusuhteeseen.

Viiraosalla on huomattava kokonaishitausmomentti, mutta tästä huolimatta viiraosan kiihdytys ryöminnästä tuotantonopeuteen kuormittaa sähkökäyttöjä ainoastaan noin 10 % nimellisväännöllä. Kiihdytyksessä formerin vetotelan käytön kuorma huomattavasti kevenee ja käyttö joutuu lopulta jarruttamaan seuratakseen omaa nopeusohjettaan. Kuormitusjakauman perustella voidaan todeta, että käyttöjen kuormitus on suurimmillaan paperikoneen ollessa tuotannossa.

Viiraosan käyttöjen kuormitusjakaumasta ilmenee, että viiran veto- ja imutelan käytöt hyödyntävät noin 10–25 % nimellisvääntömomentistaan. Vastaavasti formerin vetotelan käytön kuormitus on noin 25–50 % käytön nimellisvääntömomentista. Viiraosan sähkökäytöt ovat selkeästi ylimitoitettut paperikoneen nykyisiin ajovaatimuksiin nähden.

2.5.2 Puristinosia

Paperiraina siirtyy sieppotelan avulla viiraosalta puristinosalle, jossa rainasta poistetaan vettä puristamalla. Puristinosalla raina kulkeutuu puristinhuopien välissä puristimien nippien lävitse. PK 1:den puristinosalla on kaksi nippiä; 1. puristin, joka on lyhyt telanippi ja 2. puristin, joka on vyöhykesäädettävä kenkäpuristin. Puristinosalla on viisi sähkökäyttöä, 1. puristimen ylätela (D014), 1. puristimen imutela (D015), 1. puristimen johtotela (D016), 2. puristimen vastatela A (D017) ja 2. puristimen vastatela B (D018). Puristinosan käytöt on jaettu kahteen käyttöryhmään kahden puristimen kesken.

Puristaminen on mekaanisesti vaativa prosessi ja se edellyttää suurta akselitehoa. Paperirainasta puristettu vesi imeytyy puristinhuopiin, joista se poistuu huopakierroksen imulaatikoiden ja puristinkaukaloiden kautta keruusäiliöön. Puristinosan nipit ovat keskeisimmät käyttöjä kuormittavat komponentit. Puristimien viivakuormaa säädetään telahydrauliikan tuottaman paineen avulla ja puristimien kuormituksella voidaan vaikuttaa puristusprosessin

vedenpoiston määrään. Tämän lisäksi puristinosan imutelan ja huopaimurien tyhjötaso vaikuttaa käyttöjen kuormitukseen.

Puristinosan käyttöjen kiihdytyksestä on havaittavissa, että suurimman kuormituksen käyttöille aiheuttaa nippien viivakuorman kasvattaminen. Käyttöjen kuormitusjakauman perusteella käyttöjen kuormitus on noin 20–50 % käyttöjen nimellisvääntömomentista. 1. Puristimen käyttöjen kuormituksissa on keskinäisiä eroja käyttöryhmän kuormanjaon asetteiden takia.

2.5.3 Kuivatusosa, konekalanteri ja rullain

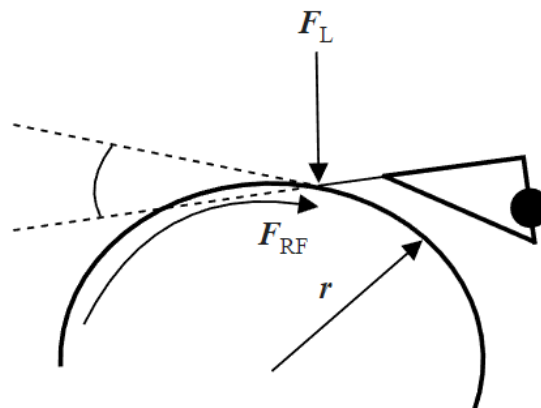
PK1:den kuivatusosalla on yhteensä 49 kuivaussylinteriä, jotka ovat jaettu kahdeksaan eri kuivatusryhmään. Kuivaussylinterit ovat päällekkäin kahdessa rivissä ja paperiraina kulkee kuivatusosan läpi kaksiviiraviennissä. Kuivatusryhmissä 2B. (D022), 3. (D023), 4. (D024), 5. (D028), 6. (D029) ja 7. (D030) on kussakin kuusi kuivatussylinteriä ja yksi sähkökäyttö. Näissä kuivatusryhmissä rungon sisään on koteloitu hammaspyörästö, jolla vääntömomenti välitetään kuivatusryhmien ylä- ja alaviirojen sylintereille. 2A. (D021) kuivatusryhmällä on sama rakenne, mutta sylinteriryhmä koostu kahdeksasta kuivatussylinteristä. 1. Kuivatusryhmässä on pääkäytön (D019) lisäksi yksi käytöllinen johtotela (D020). 1. Kuivatusryhmässä on vain yksi kuivatusviira ja ryhmä on kudoksetoinen.

4. ja 5. Kuivatusryhmän välissä sijaitsee paperikoneen välipuristin. Välipuristin ei ole kuormituksella, mutta paperiraina on kosketuksessa puristimen alatelan kanssa, minkä johdosta tela toimii ikään kuin johtotelana. Välipuristimella on kaksi tasavirtakäyttöä; välipuristimen alatela (D026) ja ylätela (D027). Puristuskuormitukseen suunniteltu alatelan käyttö on luonnollisesti ylimitoitettu nykyisessä tilanteessa.

Kuivatussylinterien likaantuminen heikentää niiden lämmönsiirtokykyä, minkä takia niiden ulkopintoja puhdistetaan kaapimien avulla. Kaapimet ja kuivaussylinterien sisältä lauhdetta poistavat sifonit ovat kuivatusryhmän keskeisimmät kuormituskomponentit. Holmberg ym. (2013) esittävät, että kaapimet aiheuttavat 62 % kuivatusosan energiahäviöistä. Kuivatusryhmän vaatima akseliteho P_{syl} voidaan esittää muodossa

$$P_{syl} = (F_b + F_c + F_d) v \ln_{syl} \quad (2.13)$$

F_b on laakerien kuormituskerroin, F_c on sifonien ja höyrykytkimien kuormituskerroin, F_d on kaapimien kuormituskerroin ja n_{syl} on kuivatussylinderien lukumäärä (Karlsson, 2010). Esimerkiksi kaapimien kitkan vaikutuksesta ilmenevään kuormaan voidaan vaikuttaa kaavinterän materiaalilla, sekä kaapimen kuormituspaineella. Kaavinterää voidaan kuormittaa erillisellä toimilaitteella tai kuormitus voi perustua kaavinrakenteen omaan massaan. Kuvassa 2.7 on havainnollistettu kaavinterän kärkeen kohdistuvia voimia. Kaavinterän luoma sähkökäyttöä kuormittava vääntömomentti riippuu kuormitetun terän aiheuttamasta kitkasta ja sylinterin halkaisijasta. Kaapimet kuormittavat sähkökäyttöjä vakiovääntömomentilla, mikäli kaavinterän kuormitus pysyy muuttumattomana. Kaavinterämateriaalin kitkakertoimen pienentämisellä voidaan pienentää kuivatusosan energiankulutusta. Holmbergin ym. (2013) mukaan paperikoneissa tapahtuneen kehityksen myötä kaavinterien kitkakerroin on pienentynyt merkittävästi ja tyypillinen arvo kitkakertoimelle nykyisin on 0.2.



Kuva 2.7. Kaavinterään kärkeen kohdistuva kaapimen kuormitusvoima F_L ja sylinterin kehävoima F_{RF} . Kaavinterän kuormitus voi perustua esimerkiksi kaavinrakenteen omaan massaan tai erillisen toimilaitteen hyödyntämiseen. Muokattu lähteestä: (Valmet, 2011)

Kuivatusryhmillä on suuri kokonaishitausmomentti, joka ilmenee suurena kuormana ryhmiä kiihdyttäessä. Tämän lisäksi kuivatussylinderien sisällä oleva lauhderyöppy lisää kuormitusta huomattavasti kiihdytyksessä. Kuivatusryhmien kiihdytys kuormittaa käyttäjää kuivatusryhmästä riippuen 50–100 % käytön nimellisvääntömomentista. Kuivaussylindereissä olevan lauhteen käyttäytymisen vaikutus ilmenee mm. väreenä käytöiltä estimoiduissa

vääntömomenteissa. Kuivatusosan käytöt joutuvat ajoittaman kiihdyttämään käytön vääntömomenttirajaa vasten lauhdekuorman vaikutuksesta.

Kuivatusryhmien kuormitusjakaumissa on suuria eroja eri ryhmien kesken. Esimerkiksi 1. kuivatusryhmän käyttöjen vääntömomentti vaihtelee 20–80 % välillä. 1. Kuivatusryhmällä on korkeat vaatimukset sylinterien puhtaanapidolle, sillä märkä paperiraina voi tarttua kiinnilikkaisen sylinterin pintaan. Tämän takia 1. kuivatusryhmällä on kolme erillistä kaavinta, jotka yhdessä kuormittavat huomattavasti ryhmän sähkökäyttöjä. 1. Kuivatusryhmän käytöt ovat ajoittain hyvin suurella kuormituksella ja käyttöryhmän puutteellisen tehon on tulkittu aiheuttavan ajettavuusongelmia. 7. Kuivatusryhmän käyttö puolestaan ajautuu jarruttamaan ajoittain pysyäkseen omassa ohjenopeudessaan. Tämän voidaan tulkita olevan seurausta kalanterin ja rullaimen aiheuttamasta vedosta, joka huomattavasti keventää käytön kuormaa.

Kuivatusosan jälkeen paperiraina kalanteroidaan ja rullataan rullaimella konerullaksi. Tässä vaiheessa paperiraina kulkee ilman konekudoksen tukea. Konekalanterilla säädetään paperirainan paksuusprofiilia ja pintaominaisuuksia CD-suunnassa. Paperiraina kulkeutuu kalanterin ylä- ja alatelan muodostaman nipin läpi, jossa rainan pinnanmuotojen poikkeamat puristuvat ja hioutuvat. Kalanterin nipin viivakuormalla ja lämpötilaprofiililla säädetään paperirainan lopullinen paksuusprofiili ennen rullausta. Konekalanterilla on kaksi tasavirtakäyttöä; kalanterin ylätela (D033) ja alatela (D034), sekä kaksi oikosulkumoottorikäyttöä kalanterin levitystela (D032) ja johtotela (D035). Levitystelan sähkökäytön kuormitusjakauman perusteella käyttö jarruttaa seuratakseen nopeusohjettaan suurimman osan ajasta.

Kalanteroitu paperiraina rullataan konerullaksi Pope-rullaimella. PK1:n rullaimella on yksi tasavirtakäyttö, rullainsylinterin käyttö (D038) ja kolme oikosulkumoottorikäyttöä; rullaimen johtotela (D036), Rullaimen levitystela (D037) ja tampuurin käynnistin (D039). Rullainsylinterin käyttö on järjestyksessä paperikoneen viimeinen sähkökäyttö. Rullainsylinterin käytöllä hyödynnetään vääntömomenttisäätöä, minkä voidaan katsoa olevan eräänlainen rainan kireyssäätö. Ajonopeudesta riippumaton vääntömomenttisäätö on havaittavissa rullainsylinterin käytön kuormitusjakaumassa selkeänä huippuna.

2.5.4 Tyhjöjärjestelmä

Paperikoneen tyhjöjärjestelmän avulla tehostetaan eri koneenosien vedenpoistoa ja parannetaan ajettavuutta. Tyhjöjärjestelmän vaatima alipaine tuotetaan tyypillisesti joko vesirengaspumpuilla tai turbopuhaltimilla. (Paulapuro, 2008.) PK1:n tyhjöjärjestelmän alipaine tuotetaan kuudella nopeussäädetyllä turbopuhaltimella. Kunkin puhaltimen pyörimisnopeudella säädetään puhaltimen imukanavan alipainetta ja yksittäisen imukanavaan kytketyn vedenpoistoelementin alipainetasoa säädetään kuristamalla virtausta säätöventtiilillä. Paperikoneen tyhjötasot kasvavat siirryttäessä viiraosalta puristinosalle.

Paperikoneen turbopuhaltimilla on suora välityssuhde ja puhaltimen vaatima suuri pyörimisnopeus edellyttää suurnopeuskäytön hyödyntämistä. Turbopuhaltimien kaksinapaisilla moottoreilla käytetään 100–150 Hz syöttötaajuutta, millä saavutetaan puhaltimen vaatima yli 8000 r/min pyörimisnopeus. Nopeussäädetty turbopuhallin on tyhjöjärjestelmän energiatehokkuuden kannalta edistynyt ratkaisu, sillä nopeussäädön avulla voidaan korvata puhaltimen kuristussäätö. Vaihteeton turbopuhallin on myös kooltaan kompakti, minkä takia se soveltuu hyvin järjestelmien modernisointiin.

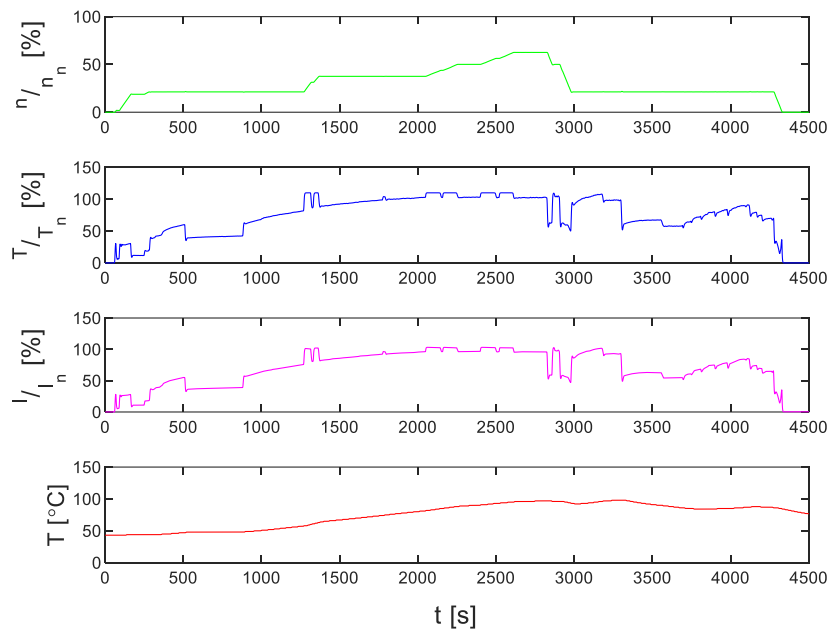
Saaren (2012) mukaan suurnopeuskäytöissä hyödynnetään tyypillisesti oikosulkumoottoria tai kestromagneettitahtimoottoria. Suurnopeuskäyttöjen suuri pyörimisnopeus ja tehoteho lisäävät käytön mekaanista rasitusta ja lämpötilaa. Suurnopeuskäytön keskipakoisvoimat asettavat erityisvaatimuksia mm. sähkömoottorin roottorin rakenteelle. Oikosulkumoottoreissa hyödynnetään esimerkiksi yhdestä kappaleesta valmistettua ns. massiviroottoria, joka soveltuu hyvin suurnopeuskäyttöihin sen jäykän rakenteen myötä. Teollisuuden vakimoottoreista poiketen suurnopeuskäytöissä on tyypillisesti magneettilaakerit tai kiertovoidellut mekaaniset laakerit.

2.6 Paperikoneen sähkökäyttöjen kehittäminen

Paperikoneen sähkökäyttöjen päivittäminen on usein aiheellista koneenosien, kuten viira- tai puristinosan modernisointien yhteydessä. Paperikoneen tuotantotason kasvattaminen on tyypillisesti helpommin saavutettavissa ratanopeuden kasvattamisella, sen sijaan, että paperirainan leveyttä suurennettaisiin. PK1:n sähkökäyttöillä on vaihtelevasti nopeuden noston edellyttämää tehoreserviä. Viiraosan sähkökäyttöillä on ylivoimaisesti suurin potentiaali

mahdollista nopeudennostoa ajatellen. Esimerkiksi viiran veto- ja imutelan sähkökäytöt hyödyntävät ajotilanteesta riippuen noin 5–15 % käyttöjen nimellistehosta.

Paperikoneen sähkökäyttöistä suurimman tuotannollisen pullonkaulan tällä hetkellä muodostaa 1. kuivatusryhmän sähkökäytöt ja erityisesti käyttöryhmän pääkäyttö (D019). Kuvassa 2.8 on koostettuna 1. kuivatusryhmän käyttöryhmälle suoritettu kuormitustesti, jossa ryhmän kaapimien kuormituspainetta kasvatetaan sylinterien puhtaanapidon edellyttämälle tasolle. Testin tuloksista havaitaan, että kuivatusryhmän pääkäytön kuormitus on yli sähkökäytön nimellisvääntömomentin. Sähkökäytön ollessa lähellä maksimivääntömomenttirajaa pienikin kuorman lisäys voi johtaa pyörimisnopeuden laskuun ja ratakatkoon. Kasvaneen kuormituksen myötä ilmenevä sähkömoottorin korkea lämpötila myös lyhentää käämitysten eristeiden elinikää huomattavasti.



Kuva 2.8. 1. Kuivatusryhmän sähkökäytön pyörimisnopeus, vääntömomentti, virta ja sähkömoottorin staattorikäimityksen lämpötila käyttöryhmän kuormitustestin aikana. Kuvasta havaitaan, että erillisjäähdytetyllä sähkömoottorilla pyörimisnopeuden kasvu ei juuri laske moottorin lämpötilaa.

1. Kuivatusryhmän ajettavuutta olisi mahdollista parantaa kehittämällä kuivatussylinterien kaavinratkaisuja tai lisäämällä käyttöryhmän sähkökäyttöjen tehokapasiteettia.

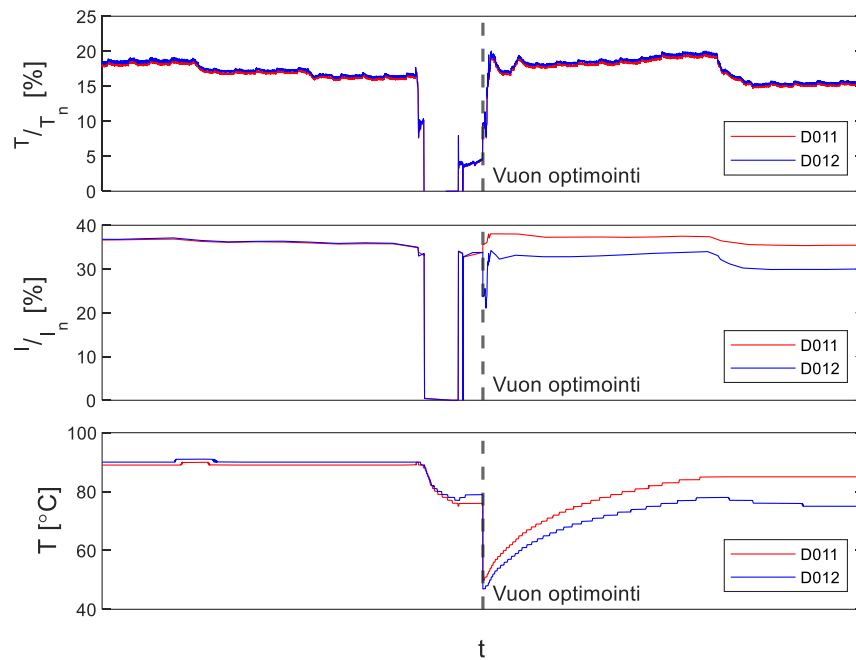
Tehokapasiteetin lisäys on tehtävissä esimerkiksi joko suurentamalla olemassa olevia sähkökäyttöjä tai lisäämällä käyttöryhmään kokonaan uusi sähkökäyttö. Ryhmän sylinterien vesikuorman määrä olisi myös perusteltua tarkistaa.

2.6.1 Energiatehokkuus

Paperikoneen sähkökäytöt toimivat laajalla nopeusalueella nykyisillä ajomalleilla. Ratanopeus on hyvin riippuvainen paperikoneella ajettavasta paperilaadusta ja ratanopeutta rajoittavia tekijöitä voivat olla mm. kuivatusteho, massan saatavuus tai tuotetun paperin laatu. Paperikoneen sähkökäytöt ovat mitoittettava suurimman ratanopeuden asettamien vaatimusten mukaisesti. Ideaalisesti valitulla sähkökäytöllä tulee olla korkea hyötysuhde kaikissa paperikoneen tuotanto-olosuhteissa. Sähkökäytön korkea hyötysuhde laajalla toiminta-alueella voi edellyttää kompromissia muiden muuttujien valossa.

Sähkömoottorin päivittämisellä tai sähkökäytön uudelleen mitoittamisella on mahdollista parantaa käytön energiatehokkuutta. Esimerkiksi vaurioitunutta sähkömoottoria vaihtaessa tulisi punnita, onko moottorin nykyinen mitoitus perusteltu. Sähkömoottoreiden teho- ja virtamittaukset tarjoavat hyvän työkalun kuormituksen arviointiin. Moottorin koon muuttamisessa täytyy kuitenkin huomioida mm. petirakenteiden ja kytkinten yhteensopivuutta eri moottoreiden välillä.

Menetelmät olemassa olevan laitteiston energiatehokkuuden parantamiseen ovat rajalliset. Sähkökäyttöjen ajoparametrien, kuten kuormanjakojen tai vetoerojen optimoiminen sähkökäyttöjen kuormituksen kannalta ei tyypillisesti ole perusteltua, mikäli sillä on negatiivisia vaikutuksia paperikoneen tuotantoon. Taajuusmuuttajalla toteutettava moottorin käämivuon optimoinnilla on kuitenkin mahdollista pienentää erityisesti viira- ja puristinosan kevyesti kuormitettujen oikosulkumoottoreiden häviöitä. Käämivuon optimoinnin vaikutusta viiran imutelan sähkökäytöllä on havainnollistettu kuvassa 2.9. Viiran imu- ja vetotelojen sähkökäyttöjä operoidaan 49,5 % kuormanjaolla, mikä tarkoittaa, että käyttöjen kuormitus on lähes identtistä. Vuon optimoinnin käyttöönoton myötä viiran imutelan sähkökäytön käämivuo pieneni 20–30 % moottorin nimellisarvosta riippuen kuormitustilanteesta. Tämän seurauksena viiran vetotelan moottorin virta on kuormitustilanteesta riippuen myös 10–50 % pienempi imutelan käyttöön verrattuna. Moottorin virran pieneneminen ilmenee myös moottorista mitatun lämpötilan laskuna, joka on suuruudeltaan noin 10 °C.



Kuva 2.9. Viiran imu- ja vetotelan sähkökäyttöjen vääntömomentti, virta ja moottorin lämpötila ennen ja jälkeen vuon optimoinnin käyttöönoton. Vuon optimoinnin vaikutus viiran imutelan sähkökäytöllä on havaittavissa moottorin pienentyneenä virtana ja alentuneena lämpötilana.

Vuon optimoinnin myötä viiran imutelan sähkönkulutus on tavanomaisessa ajotilanteessa noin 2 % pienempi kuin vetotelan käytöllä. Käyttöjen kuormanjako huomionottaen kuormitushistorian avulla voidaan karkeasti arvioida, että vuon optimoinnin avulla viiran imutelan sähkökäyttö kuluttaa vuodessa noin 6–8 MWh vähemmän sähköenergiaa vetotelan käyttöön verrattuna. Vuon optimoinnin ei myöskään havaittu haittaavan viiraosan toimintaa, joka koneenosana on herkkä käyttöjen nopeusvaihteluille.

2.6.2 Laitteiden elinkaari ja käytettävyys

Paperikoneen sähkömoottoreille on olemassa yhtiön omistuksessa vahva varaosakanta. Välipuristimen, kalanterin ja rullaimen tasavirtakäytöt ovat käytännössä ainoat kohteet, joiden sähkömoottorimallien valmistus on lopetettu. On kuitenkin huomionarvoista, että edellisten sähkökäyttöjen modernisointien yhteydessä vanhat tasavirtamoottorit ovat säästetty varaosiksi jäljelle jääneisiin tasavirtakäyttöä hyödyntäviin kohteisiin. Sähkömoottorin koosta ja

vaurion laajuudesta riippuen on myös tyypillisesti kustannustehokasta kunnostaa vaurioitunut moottori uuden varaosan hankkimisen sijasta. Tämä mahdollistaa varaosakannan ylläpitämisen myös rajoitetun saatavuuden laitteisiin.

Paperikoneen sähkökäyttöjen suuntaajien kohdalla on yleensä noudatettu laitevalmistajan käyttökartoitusten mukaisia huolto- ja päivityssuosituksia. Myös suuntaajien kohdalla tasavirtakäyttöjen tyristorisuuntaajat edustavat vanhinta laitekantaa. Yleisesti ottaen valmistajien tuotannosta poistuneet laitekokonaisuudet sisältävät oman riskinsä, mikäli niihin ei ole saatavilla varaosia tai tarvittavia päivityksiä. Taajuusmuuttajien ja muiden suuntaajien tapauksessa on myös olennaista, että laitteistoihin on tarvittaessa saatavilla asiantunteva tekninen tuki. Tasavirtakäyttöjen suuntaajat siirtyvät valmistajan elinkaarimallin mukaisesti vanhentumistilaan vuonna 2026. Tämän jälkeen suuntaajien valmistaja ei enää lupaa laitteille varaosa- tai tukipalveluita. Muiden paperikoneen sähkökäyttöjen elinkaari on tuettu ainakin vuoteen 2028 asti valmistajan toimesta.

Paperikoneen tasavirtakäyttöjen modernisointi lähivuosina olisi perusteltua sähkökäyttöjen tuetun elinkaaren lähestyessä loppuaan. Modernisointi toisi mukanaan myös muita hyötyjä. Tasavirtakäyttöjen pienestä määrästä huolimatta, ne sitovat kunnossapidon resursseja huoltoseisakeissa, jotka ovat luonteeltaan työhuippuja. Tasavirtakäyttöistä luopumisella nykyistä laitekantaa voitaisiin myös virtaviivaistaa ja luopua tasavirtakäyttöihin varatuista varaosista. Mahdollisen modernisoinnin yhteydessä tulisi myös arvioida välipuristimen rooli tulevaisuudessa. Välipuristin olisi mahdollista korvata esimerkiksi sähkökäyttöisellä johtotelalla, mikäli laitteisto koetaan tarpeettomaksi sen suunnitellussa käyttötarkoituksessa.

3 Kunnossapito ja käyttövarmuus

Teollisuuden laitteistot edellyttävät kunnossapitoa, jolla varmistetaan, että laitteet toimivat oikein ja luotettavasti. Kunnossapito käsitteenä voidaan laajentaa sisältämään kaikki kohteen elinkaaren aikana suoritettavat tekniset ja hallinnolliset toimenpiteet, joilla ylläpidetään tai palautetaan kohteen toimintakyky tilaan, jossa se pystyy suorittamaan siltä vaaditut toiminnot (SFS-EN 13306, 2019).

3.1 Kunnossapidon motiivit, käytänteet ja strategiat

Kunnossapidettävälle laitteille suoritettavat huollot ja korjaukset mielletään yleisesti kunnossapidon ydintoiminnoiksi. Miltei kaikki laitteistot vaativat jonkin tasoista kunnossapitoa niiden kuluessa käytön aikana. Kunnossapito-ohjelmien tavoitteena on ylläpitää laitosten toimintakykyä mahdollisimman kustannustehokkaalla tavalla. Suunnitelmallisen kunnossapidon tuomat taloudelliset hyödyt realisoituvat mm. vähentyneen seisokkiajan ja parantuneen laadun muodossa. (Stephens, 2022.)

Eri standardit määrittelevät suoritettavat kunnossapitotoimet eri kunnossapitolajeihin kunnossapitotoimenpiteen luonteen mukaan. Standardeihin perustuvien määrittelyjen hyödyntäminen tekee mm. laitosten välisistä kunnossapitotilastoista vertauskelpoisia. Määritelmien oikeaoppinen käyttö yhdessä aktiivisen raportoinnin kanssa on perusta kunnossapidon toiminnan analysointiin ja kehittämiseen. Esimerkiksi PSK 6201 (2022) standardissa määritetään viisi eri kunnossapitolajia, jotka ovat korjaava, kuntoon perustuva, jaksotettu, parantava ja muu kunnossapito. Stephens (2022) esittää kunnossapitolajien erittelylle yksinkertaiseman jaottelun, jossa kunnossapitolajit jaetaan kolmeen kategoriaan; korjaavaan, ehkäisevään ja ennakoivaan kunnossapitoon. Korjaava kunnossapito käsittää korjaukset, joilla jo vikaantunut laite palautetaan toimintakuntoon. Tyypillisesti korjaavaa kunnossapitoa ja ns. häiriökorjauksia pyritään vähentämään suunnitelmallisen kunnossapidon avulla. Ennakoiva kunnossapito pitää sisällään toimet, joilla ennaltaehkäistään laitteen vikaantuminen ennen sen tapahtumista. Käytännössä tämä tarkoittaa rutiinimaisia tarkastuksia, puhdistamista ja huoltoja. Ennustavassa kunnossapidossa hyödynnetään erilaisia mittauksia ja analyysseja, joiden avulla pyritään ennustamaan laitteen mahdollinen vikaantuminen. Tällöin

laitteistojen korjaukset ja huollot pyritään suorittamaan ennen laitteen vikaantumista. (Stephens, 2022.)

Kunnossapitostrategia määrittää liikkeenjohdolliset keinot, jolla saavutetaan laitoksen kunnossapidolliset tavoitteet (SFS-EN 13306, 2019). Kunnossapitostrategia on tarkoituksenmukainen suunnitelma, jonka avulla pyritään harjoittamaan laitokselle ja sen toimialalle soveltuva kunnossapitotoimintaa. Kunnossapitostrategia voi perustua esimerkiksi kokemuseräisiin tai alakohtaisiin käytäntöihin. Toimiva kunnossapitostrategia sisältää perustellun määrän korjaavaa, ehkäisevää ja ennakoivaa kunnossapitoa. Laitteiden kriittisyydellä on suuri vaikutus siihen, kuinka paljon resursseja niiden ylläpitoon tulee keskittää. (Stone et al., 2004.) Laitekohtainen kriittisyys on perusteltavissa esimerkiksi laiterikon aiheuttaman tuotannonmenetyksen ja sen taloudellisten vaikutusten kautta.

3.2 Sähkömoottorien vikaantuminen ja kunnonvalvonta

Kolmivaiheinen oikosulkumoottori on yleisin teollisuudessa käytetty konetyyppi. Tämän takia oikosulkumoottorien vikaantumisen ymmärtäminen on keskeistä suurien laitekantojen ylläpidossa. Oikosulkumoottorien viat voidaan yleisesti jakaa sähköisiin ja mekaanisiin viikoihin. Moottorin vikaantumisen ilmenemismuoto ei kuitenkaan välttämättä osoita suoraan vian juurisyitä (Tavner, 2008). Vikaantumisen todellinen juurisyy voi olla hankalasti hahmotettavissa ilman tarkkaa vaurioanalyysia ja moottorin purkamista. Moottorin elinikään ja sen vikaantumisen todennäköisyyteen vaikuttavat mm. ympäristön likaisuus, lämpötila ja kuormituksen luonne. Ideaalisti, moottorin korjaaminen suoritetaan juuri ennen sen vikaantumista, jotta välttyään laajemmilta vahingoilta.

Oikosulkumoottorien sähköisistä vioista merkittävimpiä ovat käämitysten eristeiden vikaantumisten aiheuttamat oikosulut ja kierrossulut. Staattorikäämityksessä oikosulku voi muodostua esimerkiksi vaihekäämin kierrosten välille, vaiheen ja maan välille tai kahden eri vaiheen välille. Vaikkei eristeiden pettäminen aiheuttaisi suoraan täydellistä moottorin hajoamista, niiden myötä lisääntyvä virta ja lämpenemä edesauttavat eristeiden heikkenemistä. (Faiz et al., 2017.) Sähkökoneen toimiessa sen eristeet altistuvat mekaanisille, sähköisille ja termisille rasituksille, jotka yhdessä heikentävät eristeaineen rakennetta ja sen ominaisuuksia ajan myötä. Sähkökoneissa käytettävät eristeaineet on jaettu lämpötilaluokkiin niiden suurimman sallitun rajalämpötilan mukaan. Yleisin sähkökoneiden eristeissä käytetty

lämpötilaluokka on 155 (F), jota käytettäessä eristeen suurin sallittu lämpötila on 155 °C. Pitkällä aikavälillä pelkästään 10 °C lämpötilan nousu eristeaineessa voi jopa puolittaa eristeen odotetun eliniän. (Stone et al., 2004.)

Sähkökoneen eristyksen kuntoa voidaan arvioida erilaisilla sähköisillä kunnonvalvontamittauksilla. Mittausten avulla voidaan luoda karkea ennuste eristyksen jäljellä olevasta käyttöiästä, joka on oleellinen tieto ennakoivan kunnossapidon kannalta. Sähkömoottorien sähköisistä kunnonvalvontamittauksista yleisin on staattorikäymitysten eristysvastusmittaus. Testissä koestettavaan osiin kytketään 500–5000 V tasajännite moottorin nimellisjännitteestä riippuen. Eristysvastus R_e määrittyy käytetyn testijännitteen ja käämitykseen muodostuvan vuotovirran mukaan Ohmin lain mukaisesti. Mittauksen aikana eristettyyn käämitykseen muodostuvasta virrasta voidaan erottaa ainakin neljä eri virtakomponenttia, jotka ovat kapasitiivinen, konduktio-, absorptio- ja vuotovirta. Mittauksen alussa virtapiirissä esiintyy suuri kapasitiivinen varausvirta, jonka arvo pienenee ajan myötä eksponentiaalisesti. Eristysvastusmittauksen ensimmäinen mittausarvo tulee kirjata ylös vasta kun kapasitiivinen virran arvo on pienentynyt. Konduktiovirta syntyy käämijohtimen ja koneen rungon lävitse kulkevasta virrasta ja sen arvo on mittauksen aikana vakio. Suuri konduktiovirta viittaa tyypillisesti vaurioihin ja epäpuhtauksiin käämityksen eristyksessä. Vuotovirran suuruus on myös ajan suhteen vakio ja sen aiheuttaa eristyksen pinnalla olevat johtavat epäpuhtaudet. Absorptiovirta on seurausta eristeaineen molekyylien polarisoitumisesta testijännitteen synnyttämässä sähkökentässä. Absorptiovirta käyttäytyy RC-piirin tavoin ja sen arvo pienenee ajan myötä nolnaan. (Stone et al., 2004.) Eristyksen kunnan kannalta mielenkiintoisimmat virtakomponentit ovat tyypillisesti konduktio- ja vuotovirta, jonka takia eristysvastuksen mittauslukema luetaan vasta kun mittaus on suoritettu esimerkiksi yhden minuutin ajan.

PSK 7704 (2000) standardissa määritetään sähkömoottorista mitatun eristysvastuksen R_e hyväksymisrajaksi

$$R_e > 1 \text{ M}\Omega + \left(\frac{U_n}{\text{kV}}\right)\text{M}\Omega \quad (3.1)$$

U_n on moottorin nimellisjännite. Useimmille pienjännitemoottoreille hyväksyttävät käämityksen eristysvastuksen rajat ovat täten 1,4–1,7 MΩ. Jotta eri ajankohtina suoritettavat mittaukset olisivat vertauskelpoisia, täytyy käämityksen lämpötilan vaikutus mittaukseen myös ottaa huomioon. Käämityksen polarisaatioindeksi $P.I.$ määritetään

$$P. I. = \frac{R_{10}}{R_1} \quad (3.2)$$

R_{10} on mitatun eristysvastuksen arvo, kun jännitettä on syötetty 10 minuutin ajan ja R_1 on eristysvastuksen arvo, kun jännitettä on syötetty 1 minuutin ajan (IEEE 43-2000, 2000). Polarisaatioindeksin tarkoituksena on vähentää eri ajankohtina suoritettujen eristysvastusmittausten lämpötilariippuvuutta. Stonen ym. (2004) mukaan alle yhden polarisaatioindeksi viittaa likaantuneeseen tai kosteaan käämitykseen ja polarisaatioindeksin arvon ollessa yli kaksi käämityksen voidaan olettaa olevan puhdas ja kuiva.

Eristysvastusmittausten suorittaminen edellyttää, että mitattava kohde on jännitteetön ja täten myös pois käytöstä. Tämä rajoittaa mittausten hyödynnettävyyttä eristysten kunnonvalvonnassa. Sähköisten on-line kunnonvalvontamittausten avulla sähkömoottorin kuntoa voidaan valvoa sen käydessä. Esimerkiksi oikosulkumoottorin vaurioitunut roottori tai ilmavälin epäsymmetria voidaan havaita staattorivirran taajuusanalyysillä. (Stone et al., 2004) On-line mittausten hyödyntäminen edellyttää kuitenkin sijoittamista asianmukaisiin mittauslaitteistoihin, sekä mahdollisesti myös kunnossapitohenkilökunnan kouluttamista näiden käyttöä varten.

Oikosulkumoottorien mekaanisia vikoja ovat mm. linjausvirheet ja laakeriviat. Laakeriviat aiheuttavat jopa 40 % kaikista moottorien mekaanisista vioista. Vierintälaakerin tapauksessa yleisimmin vikaantuvat komponentit ovat laakerin vierintäradat ja itse vierintäelimet. Laakerien vikaantuminen ilmenee värähtelynä, joka voidaan mitata esimerkiksi pietsosähköisellä kiihtyvyyssanturilla. Vierintälaakerin eri osien vauriot tuottavat värähtelyä omilla ominaistuuksillaan. Tietyllä taajuudella tapahtuvan värähtelyn amplitudin kasvu voidaan täten yhdistää laakerin eri osien vaurioihin. (Tavner et al., 2008.)

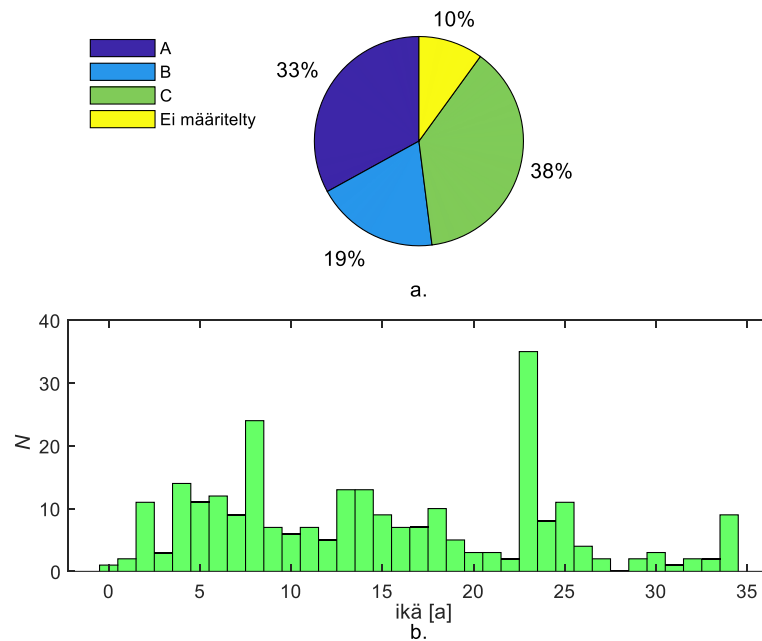
3.3 Paperikonelinjan sähkökäyttöjen laitekanta

Tehtaan kunnossapitojärjestelmän tietokannan mukaan paperikoneella ja sellutehtaalla on yhteensä 845 sähkömoottoria, joista 319 on taajuusmuuttajakäyttöisiä. Käsiteltävästä alueesta on rajattu pois tehtaan voimaosasto. Noin 60 % paperikonelinjan sähkökäyttöistä voidaan lukea kuuluvan ns. perinteisiin sähkökäyttösovelluksiin, joita ovat pumput, puhaltimet, sekoittimet ja kuljettimet. Loput 40 % paperikonelinjan sähkökäyttöistä käsittävät mm. jauhinten, sulkusyöttimien ja sihtien sähkömoottoreita.

Tehtaalla on käytössä PSK 6800 (2008) standardin mukainen laitteiden kriittisyysluokittelu, jossa laitteen kriittisyys arvioidaan sen vaurioitumisen vaikutusten kautta. Luokittelussa punnitaan mahdollisen laiterikon seuraukset turvallisuuden, ympäristön ja tuotannon näkökulmasta. Laitteille on määritetty kriittisyyden osaindeksi K_x

$$K_x = p(W_x M_x) \quad (3.3)$$

p on laitteen arvioitu vikaantumisväli, W_x on kriittisyyskohteen painoarvo ja M_x on kriittisyyskohteen valintakriteereihin perustuva kerroin. Eri osaindeksien summasta muodostetaan laitteen kriittisyysindeksi, jonka suuruus lopulta määrittää laitteen kriittisyysluokan. Kotkan tehtailla laitteille on määritetty kolme eri kriittisyysluokkaa; A, B ja C, joista A edustaa korkeinta kriittisyysluokitusta. Korkean kriittisyysluokituksen myötä kohteen ylläpitoon tulee kiinnittää erityishuomiota ja tämä ilmenee mm. valmiiksi resursoituina varaosina. Kuvassa 3.1 a. on esitetty paperikonelinjan sähkömoottoreiden kriittisyysluokituksen jakaumaa, jonka mukaan noin kolmannes olemassa olevasta konekannasta kuuluu korkeimman kriittisyysluokituksen piiriin. Esimerkiksi tuotannolle kriittisissä pumppaussovelluksissa sähkömoottorin vikaantuminen usein johtaa suoraan tuotannon alenemaan.



Kuva 3.1. Paperikonelinjan sähkömoottoreiden a. kriittisyysluokitukset ja b. A-kriittisten sähkömoottorien ikäjakauma asennusajankohdan mukaan.

Asennetun laitekannan ikä voidaan laskea kunnossapitojärjestelmään kirjatun asennusajan kohdan avulla. Paperikonelinjan A-kriittisyysluokan sähkömoottorien ikäjakaumaa on havainnollistettu kuvassa 3.1 b. A-kriittiseksi luokiteltujen sähkömoottorien mediaani-ikä on 14 vuotta ja noin 32 % A-kriittisistä sähkömoottoreista on palvellut kohteessaan yli 20 vuotta.

3.3.1 Häiriöraportointi

Häiriöraportoinnin sisällön analysoimista varten käsiteltävä aikaväli rajattiin vuosiin 2014–2024. Häiriöraporteista etsittiin tapaukset, jotka ovat vaatineet, että sähkömoottori vaihdetaan häiriökorjauksena tai ennakoivasti sopivan tilaisuuden tullen. Tällä aikavälillä paperikonelinjalla on tehty 93 kunnossapitoilmoitusta, joissa ilmennyt vikaantumisen on johtanut sähkömoottorin korvaamiseen uudella. Sähkömoottorien vikaantumisia paperikonelinjalla tapahtuu täten noin yhdeksän kappaletta vuodessa. Laitekannan vikaantumistaajuus on noin 0,011, Tavnerin ym. (2008) mukaan vertauskelpoinen vikataajuus oikosulkumoottoreille on 0,040.

Sähkömoottorien vikaantumisista 66 % on vian ilmenemismuodon kautta todennettu mekaanisiksi vioiksi. Useimmissa tapauksissa vika on ensin havaittu aistinvaraisesti poikkeavana käyntiäänänenä, kohonneena lämpötilana tai tärinänä, minkä jälkeen vika on todennettu värähtelymittauksin. 34 % kaikista sähkömoottorien vioista on todennettu olevan peräisin vikaantuneesta laakerista. 92 % mekaanisista vioista on korjattu ennakoivalla kunnossapidolla aikatauluttamalla sähkömoottorin vaihto seuraavaan seisokkiin.

30 % sähkömoottorien vikaantumisista on ollut peräisin moottorin sähköisestä vikaantumisesta ja lopuissa 4 % tapauksissa vikaantumisen aiheuttajaa ei ole kuvattu. Sähköiset vikaantumiset ovat olleet poikkeuksetta häiriökorjauksia, ja vian ilmenemistapa on tyypillisesti ollut sulakkeen tai moottorisuojan toimimisesta aiheutunut järjestelmähälytys. Sähköiset vikaantumiset ovat poikkeuksetta myös johtuneet eristevauriosta, joka on todennettu eristysvastusmittauksella.

3.4 Käyttövarmuuden kehityskohteita

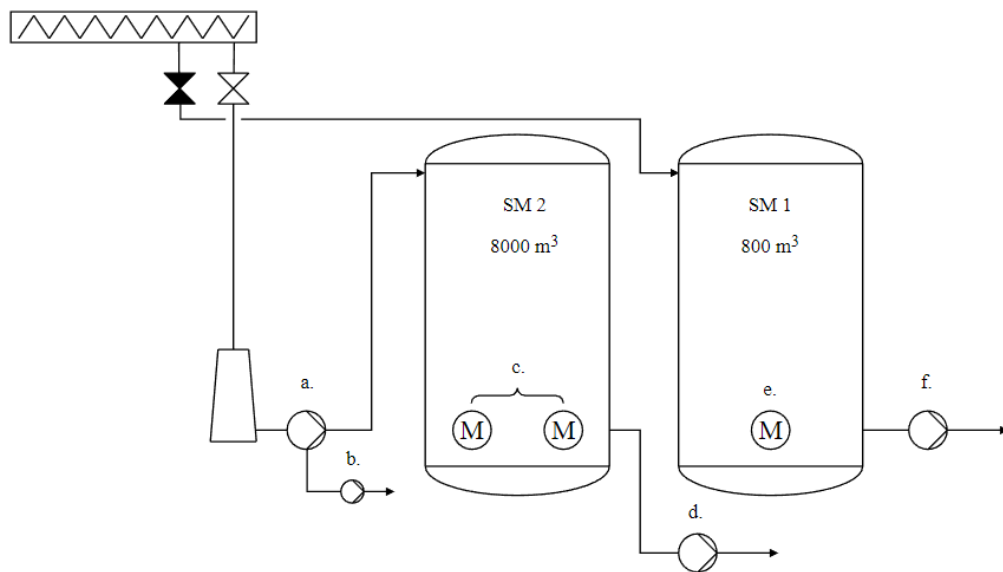
Laitteiden ja prosessien käyttövarmuutta voidaan kehittää erilaisin menetelmin. Käyttövarmuuteen investoimalla on mahdollista vähentää laitteistojen vikaantumisesta aiheutuvaa häiriöaikaa ja tästä seuraavaa tuotannonmenetystä. Seuraavaksi esitetään kaksi erilaista käytännön järjestelyä, joilla voitaisiin parantaa paperikonelinjan sähkökäyttöjen käyttövarmuutta.

3.4.1 Kuitulinjojen sähköjakeluhäiriöt

Aiemmin tapahtuneet sähköjakeluhäiriöt paperikoneella ovat johtaneet tilanteeseen, jossa sellutehtaalle on jouduttu suorittamaan alasajo. Sellutehtaalla on kaksi erillistä kuitulinjaa, joissa molemmissa on jatkuvatoimiset MD-purukeittimet. Kuitulinjojen ruskea massa pestään kahdella DD-pesurilla ja pesty massa saostetaan kahdella imurumpusuotimella. Normaaleissa olosuhteissa saostettu massa varastoidaan n. 10 % sakeudessa kuitulinjan ja paperikoneen välissä olevaan 8000 m³ sakeamassatorni 2:een, josta massa pumpataan paperikoneen jauhatuosaston kautta lyhyeen kiertoon. Tilanteen vaatiessa sakea massa voidaan myös varastoida varasäiliönä toimivaan sakeamassatorni 1:een. Sakean massan varastointia ja siihen liittyviä prosessilaitteita on havainnollistettu kuvassa 3.2. Massatornien suuri tilavuus toimii puskurina paperikoneen, sekä sellutehtaan huoltoseisakeissa ja häiriötilanteissa. Paperikoneen sähköjakelu jakautuu yhdeksän jakelumuuntajan kesken. Niitä syötetään samasta 20 kV kojeistosta (31B). Tunnetuissa häiriötilanteissa kiskosto 31B on ollut jännitteetön mm. kaapelipäätteen rikkoutumisen seurauksesta. Paperikoneen jauhatuosastolla on kaksi 500 V keskusta, 3000 ja 3100. Keskusten lähtöluetteloista ilmenee, että niistä syötetään seuraavia osastojen rajapinnassa olevien laitteiden sähkökäyttäjiä:

- Saostimien MC-pumppu ja MC-pumpun tyhjäpumppu
- Sakeamassatorni 2 sekoittimet 1 & 2
- Sakeamassatorni 1 pumppu ja sekoitin
- Sakeamassapumppu 3

Nykyisellä järjestelyllä sähkönjakeluhäiriöt ja huoltotoimenpiteet, jotka johtavat keskusten 3000 ja 3100 jännitteettömyyteen johtavat samalla em. laitteiden toimimattomuuteen. Tämän seurauksena saostettua massaa ei kyetä varastoimaan sakeamassasäiliö 2:en ja kuitulinjojen tuotanto on keskeytettävä.



Kuva 3.2. Yksinkertaistettu paperikonelinjan sakean massan varastoinnin prosessikaavio ja prosessilaitteet a. MC-pumppu, b. MC-pumpun tyhjöpumppu, c. sakeamassatorni 2 sekoittimet, d. sakeamassapumppu 3 e. sakeamassatorni 1 sekoitin ja f. sakeamassatorni 1 pumppu. Sakean massan varastoinnin sähkökäytöt on nykyisessä muodossaan kokonaan paperitehtaan sähkönjakelun alaisuudessa.

Prosessin häiriösietoisuuden parantamiseksi ehdotetaan, että saostimien MC-pumppu, MC-pumpun tyhjöpumppu ja sakeamassatorni 2:en sekoitin 1 siirretään sellutehtaan sähkönjakelun alaisuuteen. Tällöin paperitehtaan sähkönjakeluhäiriöiden aikana sellutehdas pystyy aiemmasta tilanteesta poiketen jatkamaan massan valmistusta varastosäiliöiden kapasiteetin rajoissa. Taulukoissa 3.1, 3.2 ja 3.3 on esitetty toimenpiteen edellyttämät muutokset sähkökäyttöjen ohjaus- ja valvontasignaaleihin.

MC-pumppu

Sähkökäytön moottorilähtö siirretään keskuksen 3000 lähdöstä 300602 keskuksen 0200 lähtöön 0202. Sähkökäytön ohjaus- ja valvontasignaalit siirretään taulukon 3.1 mukaisesti.

Taulukko 3.1. Yhteenveto MC-pumpun sähkökäytön siirrettävistä ohjaus- ja valvontasignaaleista.

Signaali	Vanha sijainti	Uusi sijainti
Ohjaus	AP01 2.9.5.3	BP02 2.4.7.6
Turvakytkin	AP01 2.9.6.3	BP02 2.4.8.6
Sähkökeskusvika	AP01 2.9.7.3	BP02 2.4.9.6
Käyntitieto	AP01 2.9.8.3	BP02 2.4.10.6
Nopeusohje	AP01 2.4.19.2	BP02 2.4.19.2
Virta	AP01 2.4.15.2	BP02 2.5.19.6

MC-pumpun tyhjöpumppu

Sähkökäytön moottorilähtö siirretään keskuksen 3000 lähdöstä 300506 keskuksen 0258 lähtöön 02580303. Sähkökäytön ohjaus- ja valvontasignaalit siirretään taulukon 3.2 mukaisesti.

Taulukko 3.2. Yhteenveto MC-pumpun tyhjöpumpun sähkökäytön siirrettävistä ohjaus- ja valvontasignaaleista.

Signaali	Vanha sijainti	Uusi sijainti
Ohjaus	AP01 2.9.5.2	BP02 2.5.7.1
Turvakytkin	AP01 2.9.6.2	BP02 2.5.8.1
Sähkökeskusvika	AP01 2.9.7.2	BP02 2.5.9.1
Käyntitieto	AP01 2.9.8.2	BP02 2.5.10.1

Sakeamassatorni 2 sekoitin 1

Sähkökäytön moottorilähtö siirretään keskuksen 3100 lähdöstä 311702 keskuksen 0200 lähtöön 0250. Sähkökäytön ohjaus- ja valvontasignaalit siirretään taulukon 3.3 mukaisesti.

Taulukko 3.3. Yhteenveto sakeamassatorni 2 sekoittimen 1 sähkökäytön siirrettävistä ohjaus- ja valvontasignaaleista.

Signaali	Vanha sijainti	Uusi sijainti
Ohjaus	AP01 2.5.13.5	BP02 2.4.15.0
Turvakytkin	AP01 2.5.14.5	BP02 2.4.16.0
Sähkökeskusvika	AP01 2.5.15.5	BP02 2.4.17.0
Käyntitieto	AP01 2.5.16.5	BP02 2.4.18.0
Virta	AP01 2.6.19.1	BP02 2.5.19.7

3.4.2 Sähkökäyttöjen häiriökorjausten vähentäminen

Tehtaan kunnossapitojärjestelmän häiriöraportoinnin perusteella suurin osa paperikonelinjan sähkömoottorien häiriökorjauksista on peräisin eristeaurion aiheuttamasta sähköisestä viasta. Tietoinen valinta suorittaa sähkömoottorien kunnossapitoa häiriökorjauksina voi olla tapauskohtaisesti perusteltua, mikäli laiterikon seuraukset eivät ole merkittäviä. Voidaan kuitenkin todeta, että paperikonelinjan tuotannolle kriittisten laitteiden häiriökorjauksia tulisi välttää pelkästään jo taloudellisin perustein.

Nykyinen, pääosin värähtelymittauksiin perustuva kunnonvalvonta onnistuu havaitsemaan suuren osan moottorien mekaanisista vioista ennen kuin ne vaikuttavat prosessiin. Kunnossapitotoiminta ei kuitenkaan sisällä ennalta määrättyä kunnonvalvontaa, jolla valvottaisiin sähkömoottorien käämitysten kuntoa. Täten häiriökorjausten ja niiden aiheuttamien tuotantokatkosten vähentämiseksi olisi perusteltua, että sähkömoottorien kunnossapidossa huomioidaisiin myös mahdollinen eristeiden ikääntymisen aiheuttamaa vikaantumista. Esimerkiksi määrääjain suoritetuilla eristysvastusmittauksilla voidaan valvoa käämitysten kuntoa ja ideaalissa tilanteessa vaurioituneet tai likaantuneet eristeet havaitaan ennen moottorin lopullista vikaantumista. Sähkömoottorien virta- ja lämpötilamittauksia voidaan myös tapauskohtaisesti hyödyntää kunnonvalvonnassa. Esimerkiksi merkittävä epäsymmetria moottorin vaihevirroissa tai käämien lämpötilassa voi viitata kierrosten välisiin oikosulkuihin. Lämpötilan nousu voi olla haastavaa yhdistää moottorin vikaantumiseen vaihtelevien kuormitusolosuhteiden takia.

Laitekannan koon ja rajallisten resurssien myötä kunnonvalvonnassa tulee priorisoida laitteet, joiden voidaan olettaa olevan käyttöikänsä loppupuolella. Karkea arvio sähkömoottorin käyntiajasta voidaan muodostaa asennusajankohdan ja kunkin sovelluksen mukaisen

arvioidun vuosittaisten käyntituntien avulla. Tämän lisäksi tulee myös huomioida muita kuormittavia tekijöitä, kuten ympäristöolosuhteita ja käynnistysten lukumäärää.

Tehtaan kunnossapitojärjestelmän käyttö nykymuodossaan tukee johdonmukaista laitteiden vikaantumisvälin seurantaa. Laitteen lyhyt vikaantumisväli voi viitata siihen, että laite ei täytä nykymuodossaan sovelluksen asettamia vaatimuksia. Sähkökäyttöjen häiriöraportoinnin tarkastelussa ei noussut esiin kohteita, jotka vikaantuisivat määräajoin.

4 Johtopäätökset

Diplomityössä tarkasteltiin vanhan paperikoneen sähkökäyttöjä tavoitteena selvittää mahdollisia kehityskohteita käyttöjen käytettävyydessä ja energiatehokkuudessa. Paperi- ja masateollisuus nojaa hyvän pitkälti toiminnassaan erilaisiin sähkökäyttösovelluksiin. Erityisesti paperikoneet ja niihin kuuluvat apujärjestelmät käsittävät suuren määrän erilaisia nopeussäädettyjä sähkökäyttöjä. Paperikoneen nykyisen laitekannan vanhinta sukupolvea edustavien tasavirtakäyttöjen uusiminen olisi perusteltua laitteiden elinkaaren kannalta. Tasavirtakäyttöjen päivittäminen oikosulku- tai kestopagneettitahtimoottoreihin pienentäisi myös käyttöjen kunnossapidollista kuormaa.

Paperikoneen sähkökäytön onnistunut suunnittelu edellyttää edistyksellistä ymmärrystä käytön kuorman dynamiikasta ja sen asettamista vaatimuksista. Paperikoneissa sähkökäyttö tulee mitoittaa koneenosan vaatiman suurimman kuormituksen mukaan, joka voi olla esimerkiksi suuren hitausmomentin kiihdytys, suurentunut vesikuorma tai suuri ajonopeus. Vaihtelevat kuormitusolosuhteet voivat kuitenkin heikentää etenkin oikosulkumoottorikäyttöjen energiatehokkuutta. Tällaisen sähkökäytön rautahäviöitä voidaan pienentää ns. vuon optimoinnilla, jossa moottorin käämivuota pienennetään sen nimellisarvosta tilanteen niin sallissa. Vuon optimoinnin vaikutusta kokeiltiin viiraosan suurella oikosulkumoottorikäytöllä, jossa sen todettiin onnistuneesti pienentävän käytön sähkönkulutusta vaikuttamatta prosessiin. Menetelmän käytettävyyttä tulisi tutkia laajemmin, sillä vuon optimointi on suoritettavissa yksinkertaisella taajuusmuuttajan parametrimuutoksella.

Tehtaan kunnossapitojärjestelmän häiriöraportoinnin perusteella valtaosa paperikonelinjan sähkökäyttöjen vikaantumisista on seurausta mekaanisesta vauriosta. Sähköisten vikojen kokonaismäärä on pieni, mutta niihin liittyvän kunnonvalvonnan puutteellisuuden takia ne suoritetaan pääosin häiriökorjauksina. Sähkömoottorien liittyvien häiriökorjausten määrää voitaisiin täten pienentää sisällyttämällä sähköinen kunnonvalvonta tehtaan kunnossapito-ohjelmaan. Tällöin sähkömoottorien käämitysten eristeiden kuntoa valvomalla moottorit voitaisiin vaihtaa ennen moottorin lopullista vikaantumista.

Lähteet

ABB. 2018. ACS880-perusohjausohjelma, ohjelmointiopas.

ABB. 2024. Motor data sheet, M3BP 450LA 8. [Verkkoaineisto]. [Viitattu 17.4]. Saatavissa: <https://wwwmotors.fi.abb.com/>

Akagi, 2005. Active Harmonic Filters. Proceedings of the IEEE. Volume 93, Issue, 12. s. 2128-2141.

Biermann, C. 1996. Handbook of pulping and papermaking, second edition. San Diego, Academic Press. ISBN 978-0-12-097362-0.

Ek, M., Gellerstedt, G. & Henriksson G. 2009. Pulp and Paper Chemistry and Technology. Volume 3, Paper Chemistry and Technology. Berlin, De Gruyter. ISBN 978-3-11-021343-0.

Euroopan komissio, 2024. Pulp and paper industry. [Verkkoaineisto]. [Viitattu 16.3.2024]. Saatavissa: https://single-market-economy.ec.europa.eu/sectors/raw-materials/related-industries/forest-based-industries/pulp-and-paper-industry_en

Euroopan komissio. 2019. KOMISSION ASETUS (EU) 2019/1781. [Verkkoaineisto]. [Viitattu 14.4.2024]. Saatavissa: <https://eur-lex.europa.eu/eli/reg/2019/1781/>

Faiz, J., Ghorbanian, V. & Joksimović, G. 2017. Fault diagnosis of induction motors. London, The Institution of Engineering and Technology. ISBN 978-1-78561-329-6.

FAO, 2022. Production of paper and paperboard worldwide from 2000 to 2021, by grade (in million metric tons). Statista. Statista Inc. [Viitattu 16.3.2024]. Saantitapa: <https://www.statista.com/statistics/1310899/production-volume-of-paper-paperboard-by-grade/>

FAO, 2023. Production volume of paper and paperboard worldwide from 1961 to 2022 (in million metric tons). Statista. Statista Inc. [Viitattu 16.3.2024]. Saantitapa: <https://www.statista.com/statistics/1333405/pulp-for-paper-production-worldwide/>

Holik, H. 2013. Handbook of Paper and Board. Second, Revised and Enlarged Edition. Weinheim, Wiley-VCH. ISBN 978-3-527-33184-0.

Holmberg, K., Siilasto, R., Laitinen, T., Andersson, P. & Jäsberg A. 2013. Global energy consumption due to friction in paper machines. *Tribology international*, 2013-06, Vol. 62, s. 58-77.

Hughes, A. & Drury, B. 2019. *Electric Motors and Drives: Fundamentals, Types and Applications*, Fifth Edition. San Diego, Elsevier Science & Technology. ISBN 978-0-08-102615-1.

IEEE 43-2000. IEEE Recommended Practice for Testing Insulation Resistance of Rotating Machinery

Jufer, M. 2010. *Electric Drives, Design Methodology*. Hoboken, John Wiley & Sons, Inc. ISBN 978-1-84821-217-6.

Karlsson, M. 2010. *Papermaking science and technology. Book 9, Papermaking: part 2, Drying*. Helsinki, Finnish Paper Engineers' Association. ISBN 978-952-5216-37-0.

Lipiäinen S., Kuparinen K., Sermyagina, E. & Vakkilainen E. 2022. Pulp and paper industry in energy transition: Towards energy-efficient and low carbon operation in Finland and Sweden. *Sustainable production and consumption*, Volume 29. s. 421–431.

Luonnonvarakeskus. 2023. *Metsäteollisuuden puunkäyttö 2022*. [Verkkoaineisto]. [Viitattu 14.1.2024]. Saatavissa: <https://www.luke.fi/fi/tilastot/puun-kaytto/metsateollisuuden-puun-kaytto-2022>

Melkebeek, J. 2018. *Electrical Machines and Drives, Fundamentals and Advanced Modelling*. ISBN 978-3-319-72730-1. Cham, Springer.

Paulapuro, H. 2008. *Papermaking science and technology. Book 8, Papermaking: part 1, Stock preparation and wet end*. Helsinki, Finnish Paper Engineers' Association. ISBN 978-952-5216-25-7.

PSK 6201. 2022. *Kunnossapito. Käsitteet ja määritelmät*. Helsinki, PSK Standardintyhdistys ry.

PSK 6800. 2008. *Laitteiden kriittisyysluokittelu teollisuudessa*. Helsinki, PSK Standardintyhdistys ry.

PSK 7704. 2000. *Kunnonvalvonnan sähköiset menetelmät. Pyörivät epätahtikoneet. Eristysvastusmittaus*. Helsinki, PSK Standardintyhdistys ry.

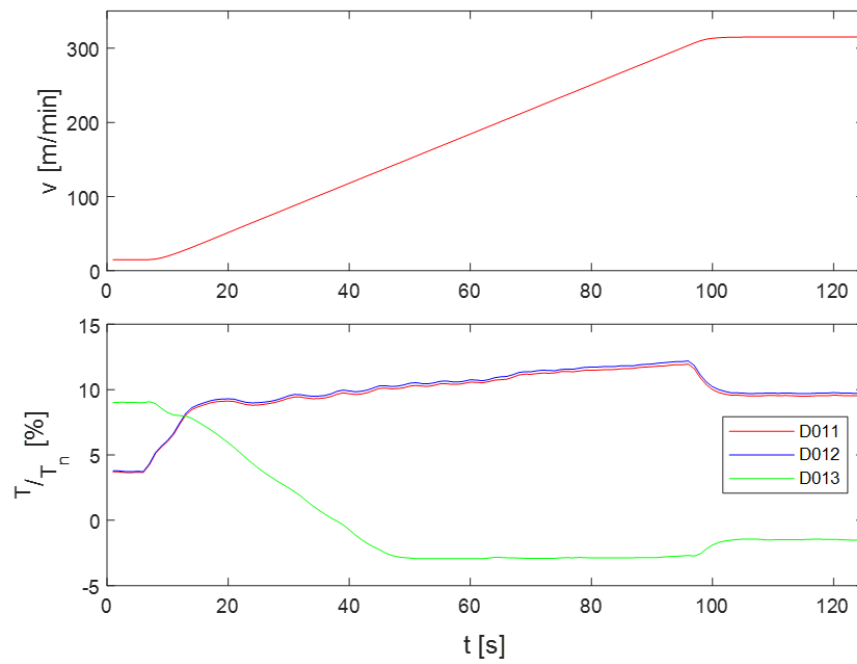
- Pyrhönen, J., Jokinen T. & Hrabovcová, V. 2008. Design of rotating electrical machines. Chichester, John Wiley & Sons Ltd. ISBN 978-0-470-69516-6.
- Pyrhönen, J., Hrabovcová, V. & Semken S. 2016. Electrical Machine Drives Control, An Introduction. Chichester, John Wiley & Sons Inc. ISBN 9781119260455.
- Pyökäri, T. 1971. Sähkökoneoppi. Tapiola, Weilin+Göös.
- Pöyhönen, O. 1975. Sähkötekniikan käsikirja 1, kuudes painos. Helsinki, KK kirjapaino. ISBN 951-30-2488-1.
- Rautiainen, P. 2009. Papermaking science and technology. Book 10, Papermaking: part 3, Finishing. Helsinki, Finnish Paper Engineers' Association. ISBN 978-952-5216-36-3.
- Saari, E. 2012. Suurnopeus-turbokoneroottoareiden termodynaaminen ja mekaaninen mallinnus sekä rakenneanalyysi. Väitöskirja. ISBN 978-952-265-311-6.
- SFS-EN 13306. 2019. Kunnossapito. Kunnossapidon terminologia. Helsinki: Suomen standardisoimisliitto.
- Smook, G. 2016. Handbook for Pulp & Paper Technologists, fourth edition. Peachtree Corners, GA, TAPPI. ISBN 978-1-59510-245-4.
- Stephens, M. 2022. Productivity and Reliability-Based Maintenance Management. Purdue University Press. ISBN 978-1-61249-751-8.
- Stone, G., Boulter, E., Culbert, I. & Dhirani, H. 2004. Electrical insulation for rotating machines. Design, evaluation, aging, testing and repair. Hoboken, Wiley-Interscience. ISBN 0-471-44506-1
- Suomen virallinen tilasto (SVT): Energian hankinta ja kulutus [Verkojulkaisu]. Viiteajankohta: 2022. ISSN=1799-795X. Helsinki: Tilastokeskus [Viitattu 13.1.2024]. Saantitapa: <https://stat.fi/julkaisu/cl8lmyfdcqgc70dukvv6dsrdd>
- Tavner, P., Ran, L., Penman, J. & Sedding H. 2008. Condition monitoring of rotating electrical machines. London, The Institution of Engineering and Technology. ISBN 978-0-86341-739-9.
- Valmet. 2011. Technical Paper Series, Doctoring 101.

Williams, A. 2022. Industrial Energy Systems Handbook. Aalborg, River Publishers. ISBN 9788770226592.

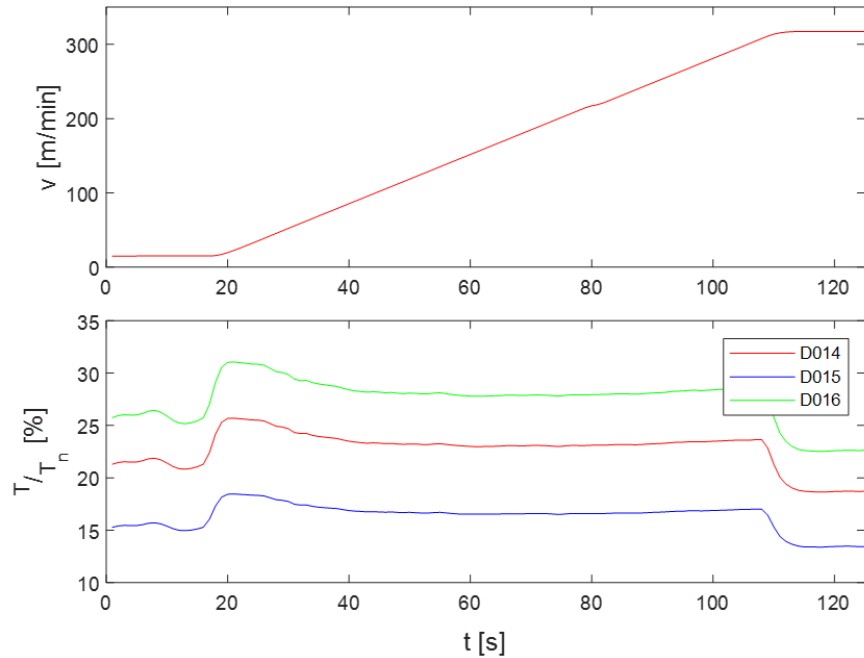
Qu, Z., Ranta, M., Hinkkanen M. & Luomi J. 2012. Loss-minimizing flux level control of induction motor drives. IEEE Transactions on Industry Applications. Volume 48, Issue 3. s. 952-961.

Liitteet

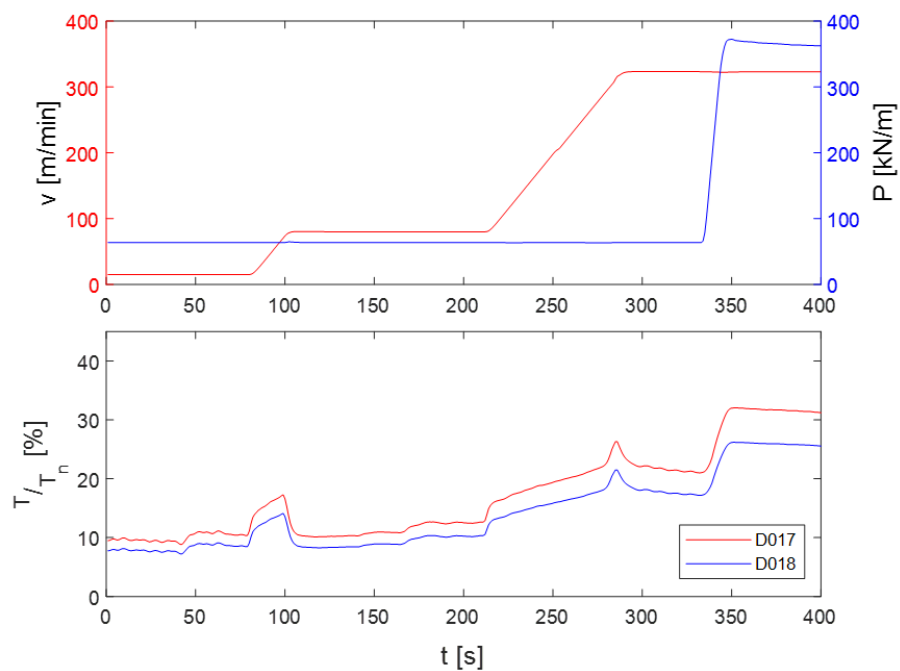
Liite 1. Viiraosan pääkäytön nopeus ja käyttöryhmän käyttöjen vääntömomentit kiihdyttäessä 15 m/min ryömintänopeudesta 315 m/min ajonopeuteen.



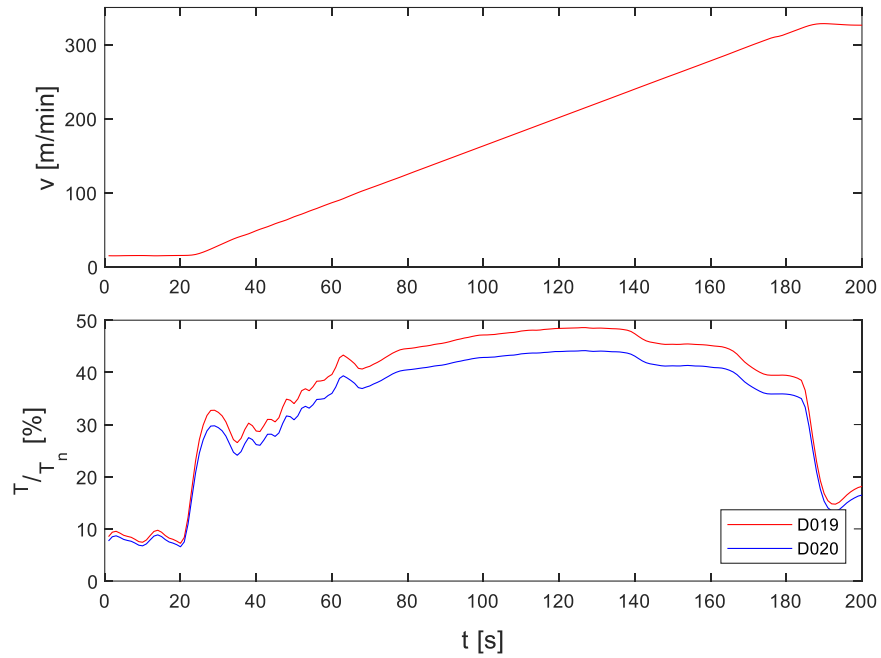
Liite 2. 1. Puristimen pääkäytön nopeus ja käyttöryhmän käyttöjen vääntömomentit kiihdyttäessä 15 m/min ryömintänopeudesta 315 m/min ajonopeuteen.



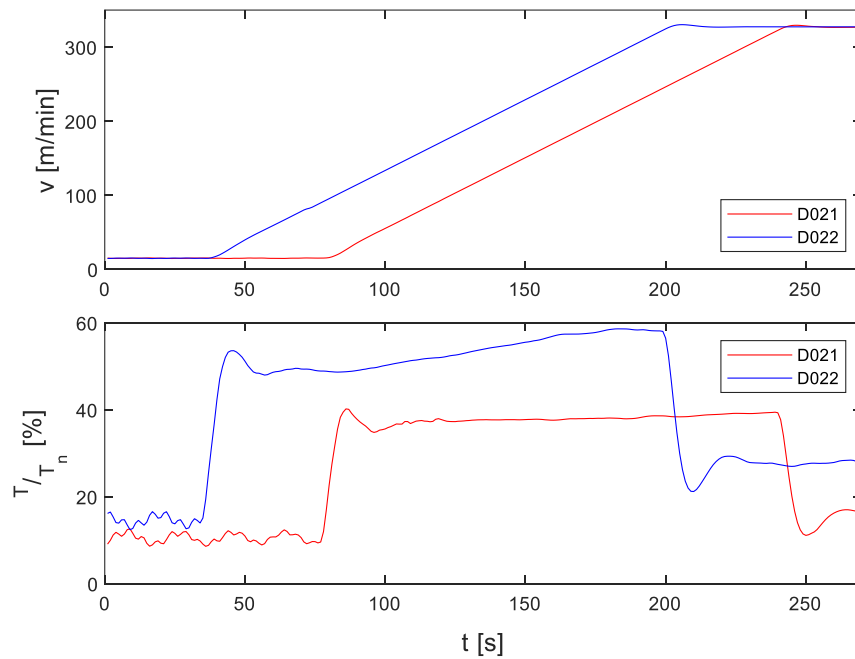
Liite 3. 2. Puristimen pääkäytön nopeus, kenkäpuristimen nipin viivakuorma ja käyttöryhmän vääntömomentit, kun ryhmä kiihdytetään portaittain 15 m/min ryömintänopeudesta 315 m/min ajonopeuteen.



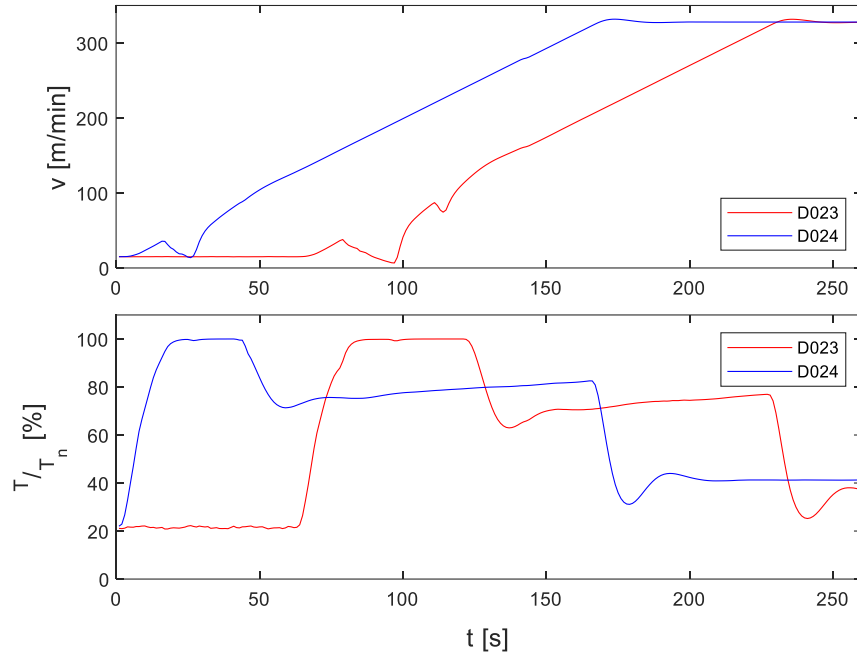
Liite 4. 1. Kuivausryhmän pääkäytön nopeus ja käyttöryhmän käyttöjen vääntömomentit kiihdyttäessä 15 m/min ryömintänopeudesta 315 m/min ajonopeuteen.



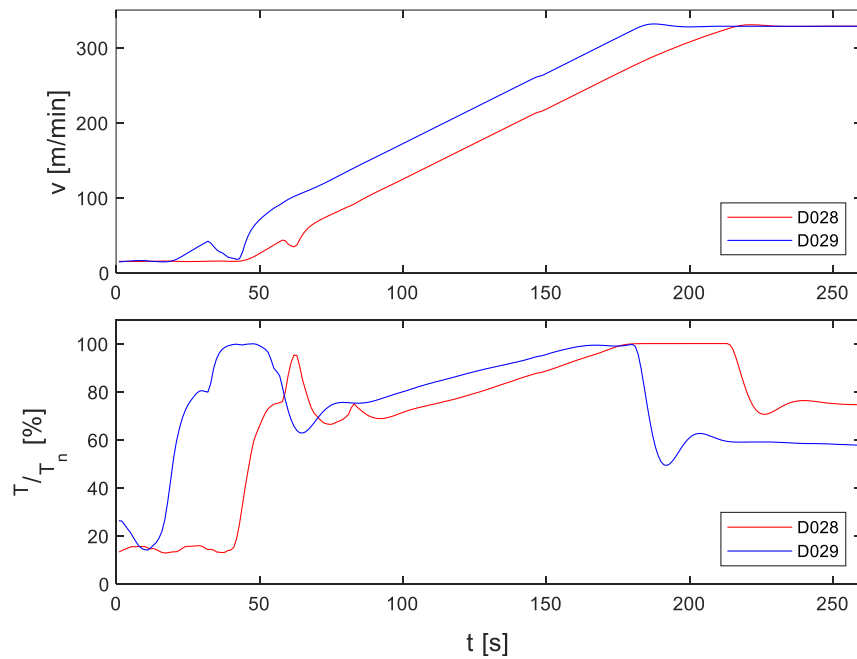
Liite 5. 2A. ja 2B. Kuivausryhmien käyttöjen nopeudet ja vääntömomentit kiihdyttäessä 15 m/min ryömintänopeudesta 315 m/min ajonopeuteen.



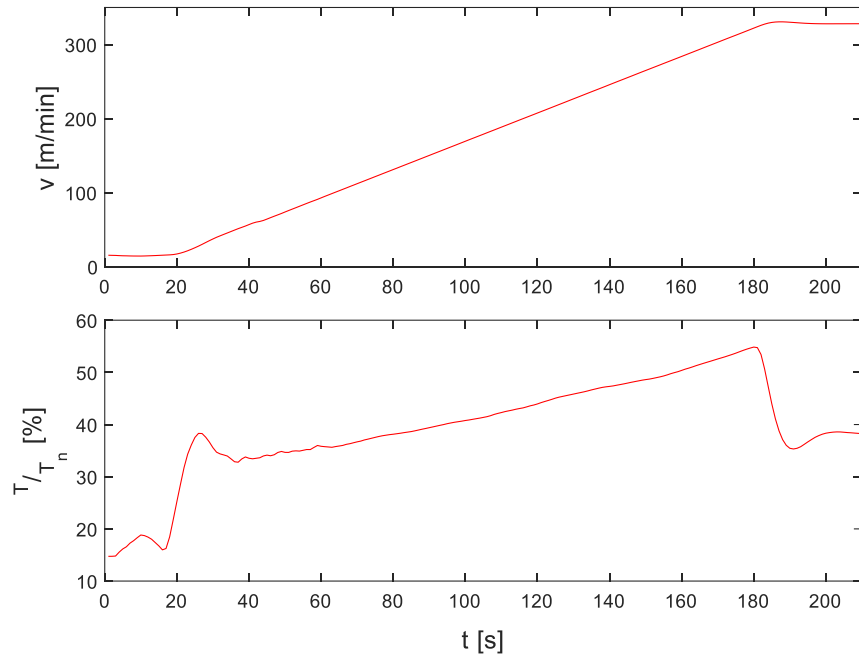
Liite 6. 3. ja 4. Kuivausryhmien käyttöjen nopeudet ja vääntömomentit kiihdyttäessä 15 m/min ryömintänopeudesta 315 m/min ajonopeuteen.



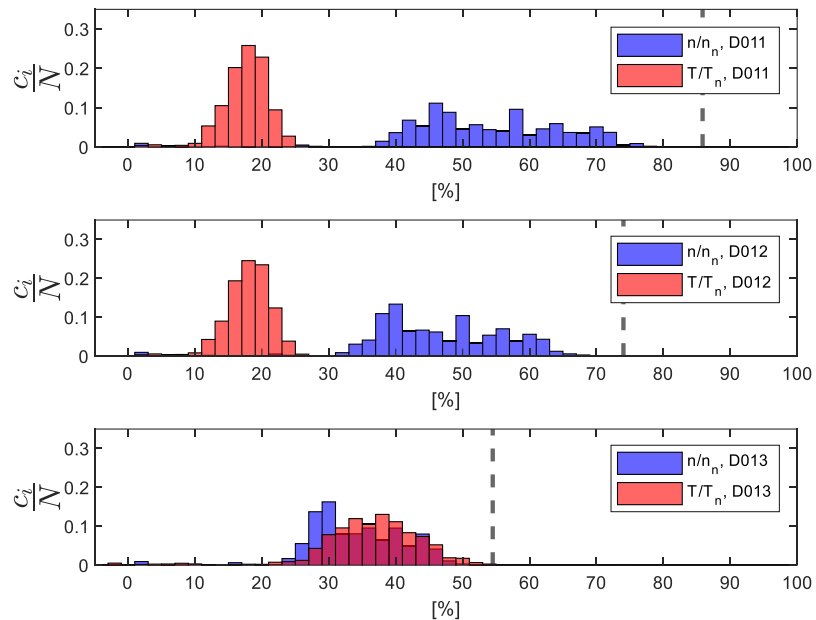
Liite 7. 5. ja 6. Kuivausryhmien käyttöjen nopeudet ja vääntömomentit kiihdyttäessä 15 m/min ryömintänopeudesta 315 m/min ajonopeuteen.



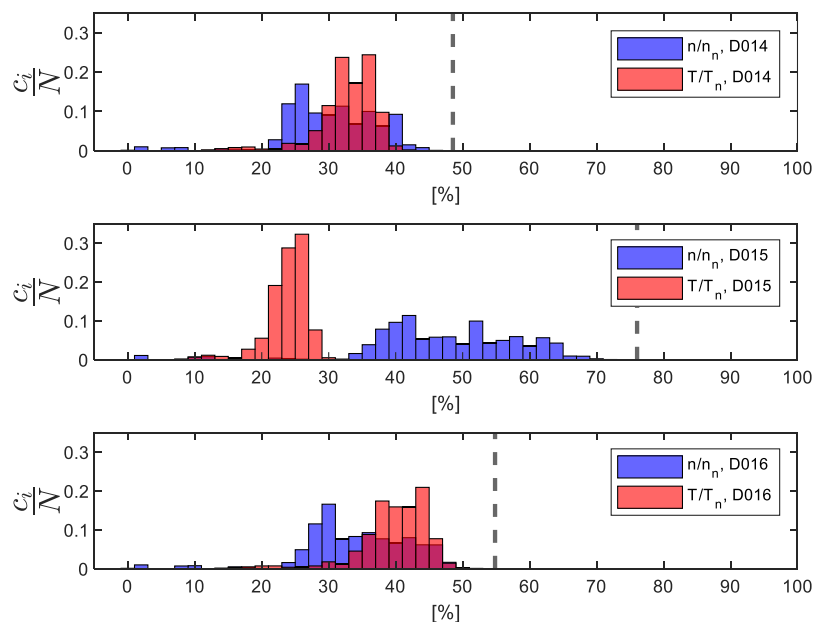
Liite 8. 7. Kuivausryhmän käytön nopeus ja vääntömomentti kiihdyttäessä 15 m/min ryömintänopeudesta 315 m/min ajonopeuteen.



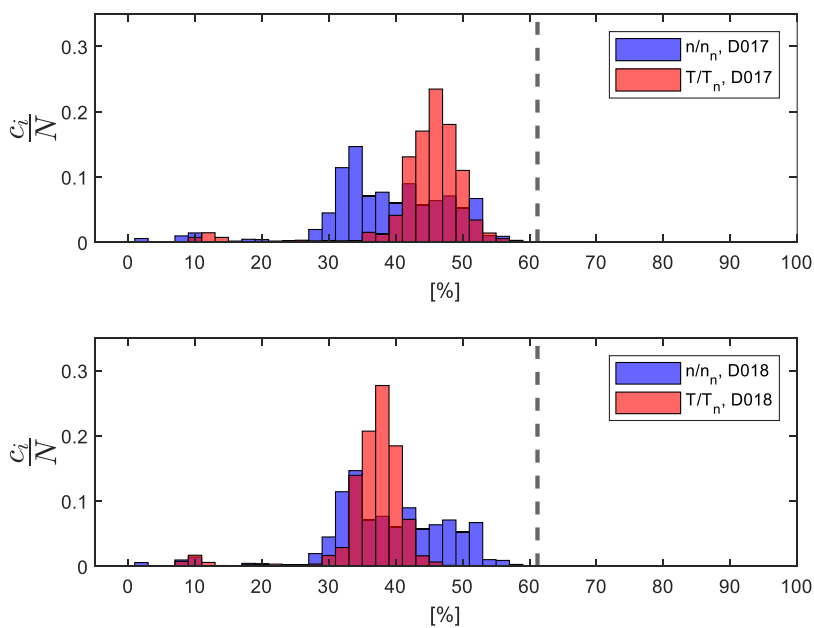
Liite 9. Viiraosan käyttöjen nopeus- ja vääntömomenttijakauma vuoden tarkastelujakson ajalta. Nykyinen ratanopeuden maksimi 600 m/min on kuvassa merkittynä katkoviivalla.



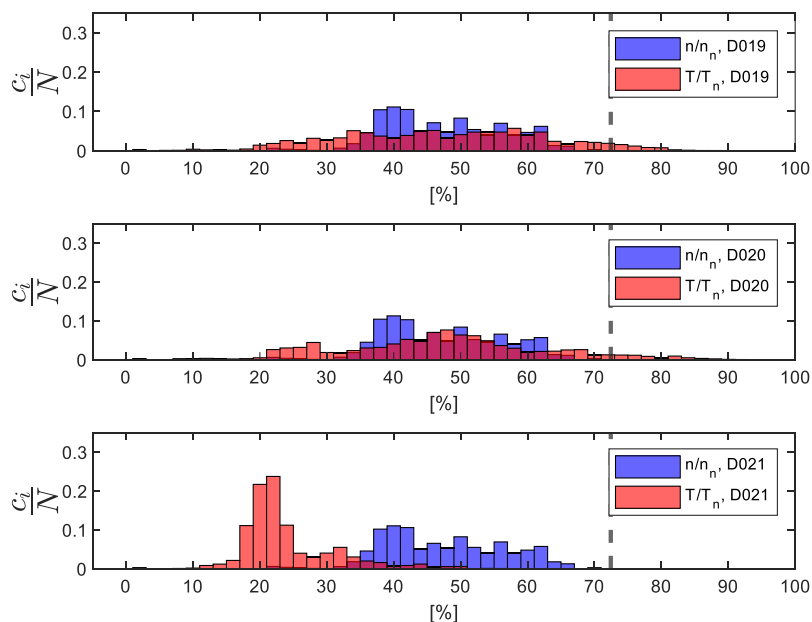
Liite 10. 1. Puristimen käyttöjen nopeus- ja vääntömomenttijakauma vuoden tarkastelujakson ajalta. Nykyinen ratanopeuden maksimi 600 m/min on kuvassa merkittynä katkoviivalla.



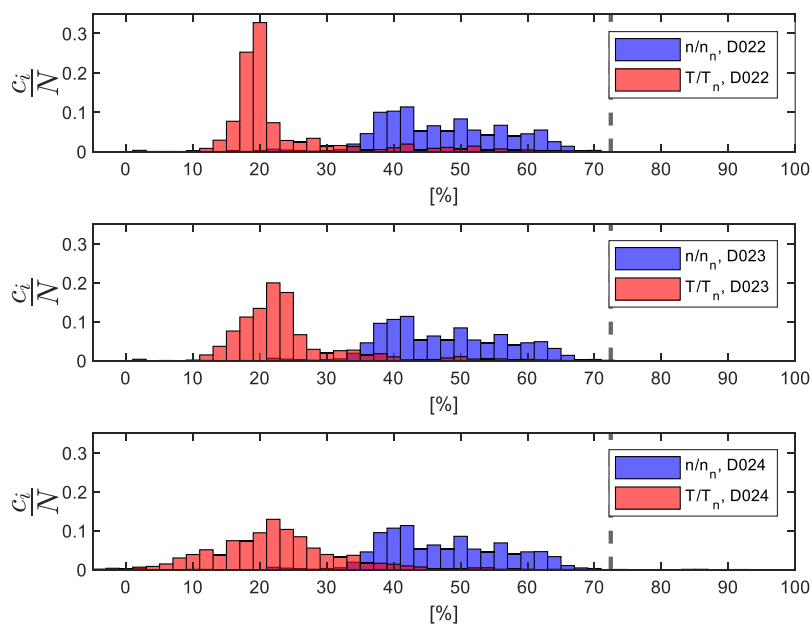
Liite 11. 2. Puristimen käyttöjen nopeus- ja vääntömomenttijakauma vuoden tarkastelujakson ajalta. Nykyinen ratanopeuden maksimi 600 m/min on kuvassa merkittynä katkoviivalla.



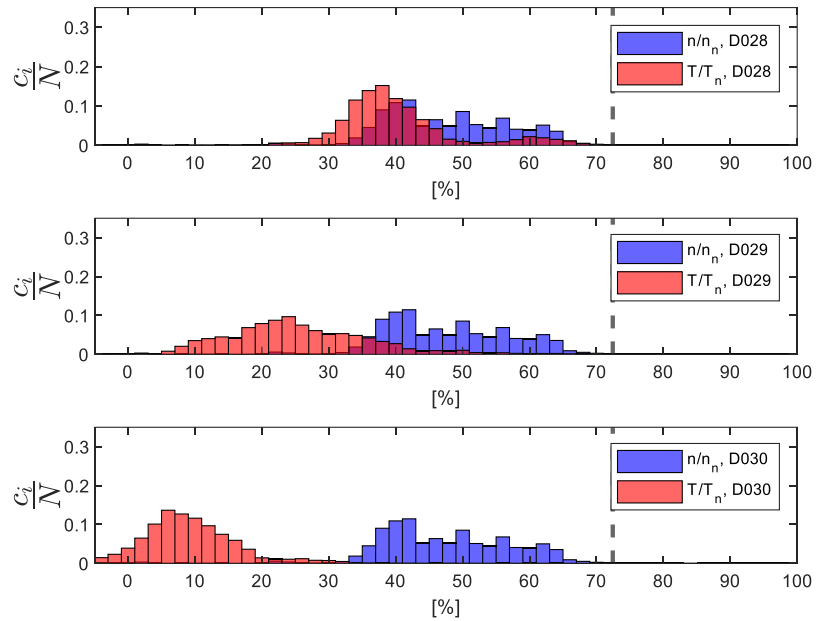
Liite 12. 1. ja 2A. kuivausryhmien käyttöjen nopeus- ja vääntömomenttijakauma vuoden tarkastelujakson ajalta. Nykyinen ratanopeuden maksimi 600 m/min on kuvassa merkittynä katkoviivalla.



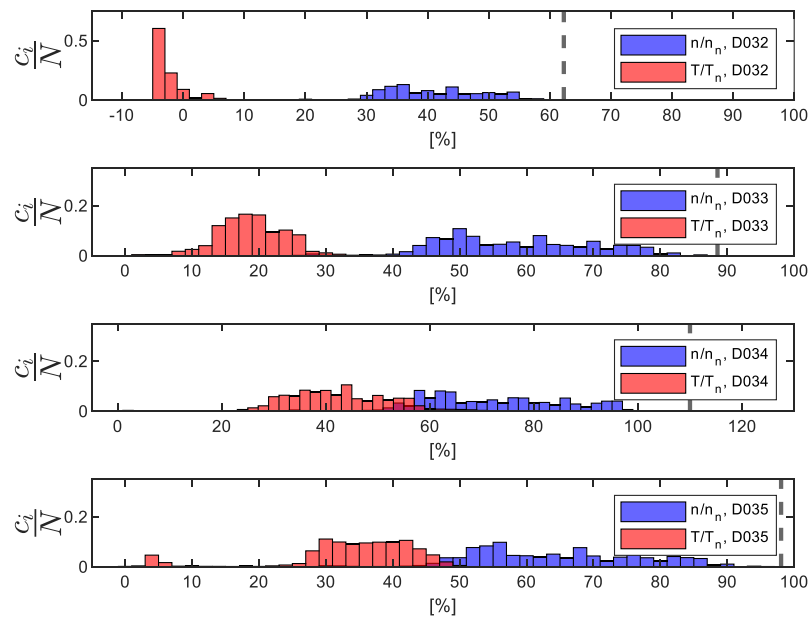
Liite 13. 2.B, 3. ja 4. kuivausryhmien käyttöjen nopeus- ja vääntömomenttijakauma vuoden tarkastelujakson ajalta. Nykyinen ratanopeuden maksimi 600 m/min on kuvassa merkittynä katkoviivalla.



Liite 14. 5., 6. ja 7. kuivausryhmien käyttöjen nopeus- ja vääntömomenttijakauma vuoden tarkastelujakson ajalta. Nykyinen ratanopeuden maksimi 600 m/min on kuvassa merkittynä katkoviivalla.



Liite 15. Konekalanterin käyttöjen nopeus- ja vääntömomenttijakauma vuoden tarkastelujakson ajalta. Nykyinen ratanopeuden maksimi 600 m/min on kuvassa merkittynä katkoviivalla.



Liite 16. Rullaimen käyttöjen nopeus- ja vääntömomenttijakauma vuoden tarkastelujakson ajalta. Nykyinen ratanopeuden maksimi 600 m/min on kuvassa merkittynä katkoviivalla.

