

**SAVONIA**

ammattikorkeakoulu

OPINNÄYTETYÖ - AMMATTIKORKEAKOULUTUTKINTO  
TEKNIIKAN JA LIIKENTEEN ALA

# IE4-ENERGIATEHOKKUUSVAATIMUS TEOLLISUUDEN KUNNOSSAPIDOSSA: OIKOSULKUMOOTTORIN HYÖTYSUHTEEN OPTIMOINNIN VAIKUTUKSET

Koulutusala Tekniikan ja liikenteen ala			
Tutkinto-ohjelma Sähkö- ja automaatiotekniikan tutkinto-ohjelma			
Työn tekijä Joonas Sjöblom			
Työn nimi IE4-energiatehokkuusvaatimus teollisuuden kunnossapidossa: Oikosulkumoottorin hyötysuhteen optimoinnin vaikutukset			
Päiväys	27.5.2024	Sivumäärä/Liitteet	67/4
Toimeksiantaja/Yhteistyökumppani Yara Suomi Oy			
Tiivistelmä			
<p>Uuden IE4-energiatehokkuusvaatimuksen myötä teollisuuden kunnossapidossa alettiin lisäämään paremman hyötysuhteen prosessimoottoreita. Toisinaan on havaittu tilanteita, jotka ovat pitkittäneet ja vaikeuttaneet vakiintunutta prosessimoottoreiden vaihtotyötä. Opinnäytetyössä tutkittiin, miten 1.7.2023 käyttöön otettu IE4-energiatehokkuusvaatimus vaikuttaa teollisuuden kunnossapitoon. Samalla selvitettiin, kuinka moneen prosessilaitekohteeseen tämä vähimmäisvaatimus vaikuttaa.</p> <p>Opinnäytetyön tilaajana oli Yara Suomi Oy ja tutkimus toteutettiin Siilinjärven toimipaikalla. Tutkimus suoritettiin perehtymällä perusteellisesti oikosulkumoottoreiden hyötysuhteen muodostumiseen. Tämän pohjalta haettiin tietää, miten IE4-hyötysuhdeluokka on mahdollisesti saavutettu nykyajan oikosulkumoottoreissa ja millä tekijöillä voidaan hyötysuhdetta optimoida. Kunnossapitoon vaikuttavien tekijöiden etsinnässä verrattiin eri hyötysuhdeluokkien prosessimoottoreiden mittakuvia ja teknisiä tietoja toisiinsa.</p> <p>Selvitettyjen tietojen pohjalta tehtiin dokumenttianalyysi kerätyille tiedoille. Eri hyötysuhdeluokkien prosessimoottoreiden vertailuun käytettiin apuna laitevalmistajan ohjekirjaa, sähkömoottoreiden vertailua helpottavaa palvelua ja erillisiä itsetehtyjä Excel-tiedostoja. Toimipaikan omistamien prosessimoottoreiden kartoitukseen ja teknisten tietojen selvitykseen käytettiin SAP-toiminnanohjausjärjestelmää.</p> <p>Lopputuloksena kartoitettiin kappalemääräisesti kaikki toimipaikan prosessimoottorit, joihin uusi IE4-energiatehokkuusvaatimus vaikuttaa ja tuottaa ongelmia. Lisäksi suoritettiin tehdaskierros Siilinjärven toimipaikan fosforihappotehtaalle, jonka aikana etsittiin kyseisiä prosessilaitekohteita, joissa tulee ilmenemään näitä ongelmia tulevaisuudessa. Kierroksen tulokset dokumentoitiin ja analysoitiin tarkemmin. Tämän jälkeen lopullinen selvitysraportti luovutettiin tuotantolaitoksen asiantuntijoiden käyttöön. Dokumenttianalyysin pohjalta koottiin laaja kokonaisuus erilaisista oikosulkumoottorin hyötysuhteeseen vaikuttavista tekijöistä. Prosessimoottoreiden mittakuvien ja teknisten tietojen vertailuun tarkoitettuja Excel-tiedostoja julkaistiin toimipaikan yhteistyöalustalle.</p>			
Avainsanat hyötysuhde, IE4, oikosulkumoottori, prosessimoottori			

Field of Study Technology, Communication and Transport	
Degree Programme Degree Programme in Electrical and Automation Engineering	
Author Joona Sjöblom	
Title of Thesis IE4 Energy Efficiency Requirement in Industrial Maintenance: Impacts of Optimizing the Efficiency of an Induction Motor	
Date 27.5.2024	Pages/Appendices 67/4
Client Organisation /Partner Yara Suomi Oy	
<p>Abstract</p> <p>With the introduction of the new IE4 energy efficiency requirement, higher efficiency process motors have begun to be incorporated into industrial maintenance. However, situations have been encountered that have extended and complicated the established process of motor replacement work. The goal of this thesis was to investigate how the IE4 energy efficiency requirement, implemented on July 1, 2023, affects industrial maintenance. Additionally, the aim was to determine how many process equipment locations are affected by this minimum requirement.</p> <p>The client for this thesis is Yara Suomi Oy, and the research was conducted at the Siilinjärvi site. The research began with a thorough examination of the efficiency formation in squirrel-cage motors. The objective was to understand how the IE4 efficiency class has potentially been achieved in modern squirrel-cage motors and the factors by which motor efficiency can be optimized. In the search for factors affecting maintenance, the dimensions and technical specifications of process motors from different efficiency classes were compared.</p> <p>Based on the information gathered, a document analysis was conducted. To compare process motors of different efficiency classes, a manufacturer's manual, an online service for comparing electric motors, and separate self-made Excel files were used. The SAP enterprise resource planning system was used to map and identify the technical details of the process motors owned by the site.</p> <p>As a result, all process motors at the site affected by the new IE4 energy efficiency requirement and the problems it causes were mapped. A factory tour of the Siilinjärvi site's phosphoric acid plant was also conducted, during which specific process equipment locations that will face these problems in the future were identified. The findings of the tour were documented and analyzed in detail. The final report was then provided to the production plant's experts. From the document analysis, a comprehensive overview of the factors affecting the efficiency of squirrel-cage motors was compiled. The Excel files created for comparing the dimensions and technical details of process motors were published on the client's collaboration platform.</p>	
<p>Keywords efficiency, IE4, induction motor, process motor</p>	

## SISÄLTÖ

1	JOHDANTO .....	7
2	YARA SUOMI OY .....	7
2.1	Historia .....	8
2.2	Siilinjärven toimipaikka .....	8
3	SÄHKÖMOOTTOREIDEN EKOSUUNNITTELUDIREKTIIVIT .....	10
3.1	Komission asetus 640/2009 .....	10
3.2	Komission asetus 2019/1781 .....	12
4	OIKOSULKUMOOTTORI JA ENERGIATEHOKKUUS.....	14
4.1	Hyötysuhteen mittaaminen .....	15
4.2	Hyötysuhteeseen vaikuttavat tekijät ja niiden optimointi.....	16
4.2.1	Staattorin käämityshäviöt.....	17
4.2.2	Staattorin ja roottorin rautahäviöt.....	20
4.2.3	Roottorin käämityshäviöt.....	23
4.2.4	Kitka- ja ilmavastushäviöt.....	29
4.3	Häviöjakauma.....	32
4.4	Rakenteelliset muutokset.....	34
5	ENERGIATEHOKKUUSVAATIMUKSEN VAIKUTUS TEOLLISUUDEN KUNNOSSAPIDOSSA .....	37
5.1	Kunnossapidossa ilmennyt ongelma .....	37
5.2	Tutkimuskohteet ja -tulokset .....	41
5.2.1	Varastonimikkeet .....	41
5.2.2	Tehdaskierros.....	46
5.2.3	Käynnistysvirtojen tutkiminen .....	51
6	YHTEENVETO.....	53
7	POHDINTA.....	54
	LÄHTEET .....	55
	LIITE 1: KOMISSION ASETUS 640/2009 - NIMELLISHYÖTYSUHTEIDEN VÄHIMMÄISARVOT .....	59
	LIITE 2: KOMISSION ASETUS 2019/1781 - NIMELLISHYÖTYSUHTEIDEN VÄHIMMÄISARVOT .....	61
	LIITE 3: KÄYNNISTYSVIRTOJEN VERTAILUTAULUKOT.....	64
	LIITE 4: OIKOSULKUMOOTTORIN HYÖTYSUHTEESEEN VAIKUTTAVAT TEKIJÄT .....	67

## KUVALUETTELO

Kuva 1. Yara Suomi Oy, Siilinjärven tehtaat – Ilmakuva (Yara 2022) .....	8
Kuva 2. Yara Suomi Oy, Siilinjärven kaivosalue - Ilmakuva (Yara 2022) .....	9
Kuva 3. Komission asetuksen 640/2009 vähimmäisvaatimukset ajanjaksoittain (ABB Library Download Center: hakusana EU Ecodesign Regulation. 2023.) .....	11
Kuva 4. Komission asetuksen 2019/1781 vähimmäisvaatimukset ajanjaksoittain (ABB Library Download Center: hakusana EU Ecodesign Regulation. 2023.) .....	13
Kuva 5. Oikosulkumoottorin leikkauskuva (Autoserviceworld 2023) .....	14
Kuva 6. Oikosulkumoottorin tehonjakokaavio (Aho 2007, 24).....	16
Kuva 7. Oikosulkumoottorin pääosa – Staattori (ARCHI INDUSTRIES 2021) (AAWVA 2016) .....	17
Kuva 8. Pyörö- ja muotolangan leikkauspiirustus (Pyrhönen ym. 2014, 512, 514).....	18
Kuva 9. Pyörö- ja muotolangallinen Litz-lanka, sekä Roebel-tanko (Elektrisola 2024) (Pyrhönen ym. 2014, 278–279) .....	19
Kuva 10. Staattorikäämyksessä esiintyvä hajavuo, a) vyyhdenpään alue, b) urien välillä (Pyrhönen ym. 2014, 236, 261).....	20
Kuva 11. Staattorin ja roottorin sähkölevyt (POLARISLASERLAMINATIONS 2012) (CDZ 2024) (ECPLAZA 2024).....	20
Kuva 12. Pyörrevirta ja magneettikenttä, a) muodostuminen (MEDIUM 2023), b) optimointi (MOTIONCONTROLTIPS 2024) .....	21
Kuva 13. Oikosulkumoottorin pääosa - Häkkikäällinen roottori (ALAMY 2024) .....	24
Kuva 14. Yhden häkin käämytys ja kaksoishäkkikäämytys (Ocak 2017, 4) .....	25
Kuva 15. Tutkimuksen erilaiset yhden häkin käämytysauva muodot (Maloman ym. 2017) .....	25
Kuva 16. Tutkimuksen erilaisia kaksoishäkkikäämytysauvoja ja niiden virran jakautuminen (Nardo ym. 2020).....	26
Kuva 17. Tutkimuksen kuvaajat kaksoishäkkikäämytysauvan muodon optimoimisesta hyötysuhteen kannalta (Kirtley 2004).....	27
Kuva 18. Roottorin käämytysuran muodon vaikutus hyötysuhteeseen (Nardo ym. 2021) (Tong 2017, 85) ...	27
Kuva 19. Roottorikäämyksen urassa esiintyvä hajavuo (Pyrhönen ym. 2014, 23, 236) .....	28
Kuva 20. Pääosien käämyksien välillä esiintyvä hajavuo (Pyrhönen ym. 2014, 238) .....	29
Kuva 21. Kuulalaakeri ja sen osat, sekä sijainti oikosulkumoottorin D-päässä (JTEKT 2024) (ABB 2024) .....	30
Kuva 22. ABB 315 runkokoon oikosulkumoottori ja sen osat (ABB Library Download Center: hakusana Low voltage Process performance cast iron motors. Catalog 2024, 93).....	31
Kuva 23. Häviöjakaumien vertailu - ABB 4 kW ja 45 kW oikosulkumoottorit .....	32
Kuva 24. Häviöjakauman muutos nimellistehon suhteen (Pyrhönen ym. 2014, 381) .....	33
Kuva 25. Nimelliset IE-luokkien hyötysuhde raja-arvot IEC 60034-30-1 mukaan (ABB Library Download Center: hakusana Motor starting and protection for premium-efficiency motors. 2023, 7).....	33
Kuva 26. Kaksi prosessilaitekohdetta, a) jalkamoottori, kytkin ja pumppu, b) jalkamoottori, kiilahihnakäyttö ja sekoittaja (FLOWTECH 2024).....	40

Kuva 27. ABB Optimizer-palvelu (ABB 2024) .....	42
Kuva 28. Prosessimoottoreiden SAP varastonimikkeiden muutokset teholuokassa 0,12–800 kW .....	43
Kuva 29. SAP prosessimoottori kohteiden muutokset teholuokassa 75–200 kW .....	44
Kuva 30. SAP prosessimoottori kohteiden muutokset teholuokassa <75 kW ja >200 kW .....	45
Kuva 31. Pituusluokka muuttuu 200 kW teholuokan prosessimoottorissa (Sjöblom 2024) .....	46
Kuva 32. Pituusluokka tai runkokoko muuttuu 110 kW teholuokan prosessimoottoreissa (Sjöblom 2024)....	47
Kuva 33. Runkokoko muuttuu 75 kW teholuokan prosessimoottorissa (Sjöblom 2024).....	48
Kuva 34. Runkokoko muuttuu 400 kW teholuokan prosessimoottorissa (Sjöblom 2024).....	49
Kuva 35. Runkokoko muuttuu 53 kW teholuokan prosessimoottorissa (Sjöblom 2024).....	50
Kuva 36. ABB IE3/IE4 sähkömoottoreiden käynnistysvirtakuvaaja (ABB Library Download Center: hakusana Motor starting and protection for premium-efficiency motors. 2023, 8) .....	52

## TAULUKKOLUETTELO

Taulukko 1. Staattorin ja roottorin käämitysurayhdistelmiä napapareille 1 ja 2 (Pyrhönen ym. 2014, 371) ..	22
Taulukko 2. Staattorin ja roottorin optimaaliset käämitysurayhdistelmät (Pyrhönen ym. 2014, 373) .....	23
Taulukko 3. ABB sähkömoottorin IEC-tunnuksen muodostuminen .....	35
Taulukko 4. ABB M3BP-sarjan 200–500 kW prosessimoottoreiden sama runkokoko (ABB Library Download Center: hakusana Low voltage Process performance cast iron motors. Catalog 2024, 20).....	36
Taulukko 5. Kolme esimerkkiä prosessimoottorista, joissa tapahtuu rakenteellisia muutoksia saavutettuaan IE4-hyötysuhdeluokan, sekä prosessimoottoreiden pituusluokat esitettynä. ....	38
Taulukko 6. Kolmen esimerkin prosessimoottoreiden mittatiedot ja M3BP-sarjan prosessimoottoreiden mittakuvapiirros kirjainkoodeineen .....	39

## 1 JOHDANTO

Oikosulkumoottorit ovat teollisuuden tuotantolaitoksien toiminnallisuuden kannalta erittäin yleisiä ja tärkeitä voimanlähteitä. Globaalilla tasolla oikosulkumoottoreiden tärkein ominaisuus on niiden energiatehokkuus kustannuksien ja ympäristön säästämiseksi. Energiatehokkuuden kehittäminen on jatkuva parantamisprosessi, jonka tavoitteena on oikosulkumoottoreiden häviöiden minimointi. Kestävän kehityksen vuoksi Euroopan komissio asettaa aika ajoin ekosuunnittelua tukevia vähimmäisvaatimuksia energiaa käyttävillä tuoteryhmille energiatehokkuuden tehostamiseksi.

Tämän opinnäytetyön ensisijaisena tavoitteena on selvittää, miten 1.7.2023 käyttöön otetun ekodirektiivin 2019/1781 IE4-vähimmäisvaatimus vaikuttaa teollisuuden kunnossapitoon. Opinnäytetyön toimeksiantajana toimii Yara Suomi Oy ja aihe perustuu uuden IE4-vähimmäisvaatimuksen myötä huomattuihin kunnossapidon ongelmiin, jotka hyötysuhteen parantumisesta johtuvat moottorien muutokset aiheuttavat. Tutkimuksen kohdealueena on koko Siilinjärven toimipaikan varastonimikkeellä olevat prosessimoottorit kaikissa teholuokissa, napapareissa, runkokoissa ja hyötysuhdeluokissa. Tavoitteena on selvittää, kuinka moneen prosessilaitekohteeseen vähimmäisvaikutus vaikuttaa ja millä tavoin. Aihetta on rajattu jättämällä tutkimuksesta pois toimipaikan yksivaihemoottorit ja räjähdysvaarallisten tilojen Ex eb -sertifioidut sähkömoottorit ja niiden vähimmäisvaatimukset.

Työn teoreettisessa osuudessa tutustutaan Euroopan komission asettamiin ekodirektiiveihin ja niiden vaatimuksiin. Tämän jälkeen työssä perehdytään siihen, millä tavoin oikosulkumoottoreiden hyötysuhdetta pystyy optimoimaan rakenteellisesti vastaten siihen, mitkä tekijät vaikuttavat oikosulkumoottorin lopulliseen hyötysuhteeseen. Työtä rajattiin ottamalla teoreettiseen katselmukseen pelkkä kolmivaiheinen häkkikäämillinen oikosulkumoottori ja täten jättämällä pois yksivaiheiset oikosulkumoottorit ja muut sähkömoottorityypit.

## 2 YARA SUOMI OY

Yara on maailmanlaajuinen lannoitteiden, ympäristönsuojelutuotteiden ja teollisuuskemikaalien tuottaja. Suomessa Yaralla on tuotantolaitokset Siilinjärvellä, Uudessakaupungissa ja Kokkolassa sekä kierrätyslannoitteita valmistavat tuotantolaitokset Nokiolla ja Viitasaarella (Yara Toimipaikat 2024). Maailmanlaajuisesti Yara International ASA:lla on yli 18 000 työntekijää ja toimintaa yli 60 maassa (Yara. Tietoa Yarasta 2024). Yaralla on tuotantolaitoksia ympäri maailmaa yhteensä 26 kappaletta, joissa tuotanto keskitetään lannoitteiden ja teollisuuskemikaalien valmistukseen (Yara Where we operate 2024). Yara työllistää Suomessa noin 900 eri alojen asiantuntijaa.

## 2.1 Historia

Yara Suomen juuret juontavat vuoteen 1920, jolloin valtion omistamat Rikkihappo- ja Superfosfaatti-tehtaat aloittivat lannoitteiden valmistuksen. Vuonna 1961 yrityksen nimi muuttui Rikkihappo Oy:ksi, ja vuonna 1972 se sai uuden nimen, Kemira Oy. 1970-luvun lopulla Kemira jakoi lannoiteliiketoiminnan ja kemianteollisuuden erillisiksi yksiköiksi, ja lannoiteliiketoiminta jatkoi toimintaansa nimellä Kemira Agro Oy. Vuonna 2004 Kemira Agro Oy irtaantui emoyhtiöstään, otti käyttöön nimen Kemira GrowHow ja listautui Helsingin pörssiin. Suomen valtio luopui omistuksestaan Kemira GrowHow:ssa vuonna 2007 myymällä osuutensa Yaralle, minkä seurauksena Kemira GrowHow:sta tuli Yara International ASA:n tytäryhtiö (Yara Historia 2024).

## 2.2 Siilinjärven toimipaikka

Siilinjärven toimipaikka on yksi Yaran kolmesta Suomessa toimivasta tuotantolaitoksesta Uudenkaupungin ja Kokkolan lisäksi. Siilinjärven toimipaikalla on neljä kemianteollisuuden tuotantolaitosta, kuten lannoite-, fosfori-, rikkihappo- ja typpihappotehdas. Lannoitetehtaalla valmistetaan lannoitteita maatalouden käyttöön. Fosforihappoa valmistetaan rehuteollisuuteen ja lannoitteiden raaka-aineeksi. Typpi- ja rikkihappoa valmistetaan myös lannoitteiden raaka-aineiksi. Tuotannossa muodostuu sivutuotteina, kipsiä, sivukiveä, fluoripihappoa, biotiittia, sekä pasutetta, kunnes rikkihappotuoannon uudistus valmistuu. Toimipaikalla on oma voimalaitos, josta prosessihyöryä kuljetetaan kaikille tehtaille tuotantoprosessin vuoksi. Tuotantoprosessihyöryllä tuotetaan voimalaitoksella myös sähköenergiaa. Lähes 100 % Siilinjärven kaukolämmöstä tulee Yara Siilinjärven tehtaiden hukkalämmöstä. Kuvasta 1 voidaan nähdä, miltä Siilinjärven toimipaikan tehdasalue näyttää.



Kuva 1. Yara Suomi Oy, Siilinjärven tehtaas – Ilmakuva (Yara 2022)

Kaivosalueella toimii EU-alueen ainoa fosfaattikaivos, joka tunnetaan myös Suomen yhtenä suurimpana avolouhoksena. Kaivoksella sijaitsee myös rikastamo, jossa malmista erotetaan fosfaatti. Siilinjärven toimipaikka työllistää kumppanit mukaan lukien noin 700 henkilöä. Lomakauden aikana alueella työskentelee yli 50 kesätyöntekijää. Kevään ja syksyn kunnossapitoseisokeissa määrä nousee useiden viikkojen ajaksi lähes 1000 henkilöön. Kokonaisvaikutus alueen työllisyyteen on 2200 henkilötyövuotta (Yara Siilinjärven uutisia 2021). Kuvasta 2 voidaan nähdä osa Siilinjärven toimipaikan kaivosaluetta, kuten aikaisemmin mainittu avolouhos, sekä rikastamon alue.



Kuva 2. Yara Suomi Oy, Siilinjärven kaivosalue - Ilmakuva (Yara 2022)

### 3 SÄHKÖMOOTTOREIDEN EKOSUUNNITTELUDIREKTIIVIT

Ilmastonmuutos ja liikakäytöllä olevat uusiutumattomat luonnonvarat ovat globaali uhka ympäristölle ja ihmiskunnalle. Tästä juurisyystä Euroopan komissio on asettanut jo vuosien ajan ekologisen suunnittelun vaatimuksia energiaa käyttäville tuotteille, joita myydään EU-alueella suuria määriä (yli 200 000 kpl). Näillä vaatimuksilla pyritään vaikuttamaan tuotteisiin, joilla on merkittäviä ympäristövaikutuksia esimerkiksi päästöjen, materiaalitehokkuuden, kestävyys- tai korjattavuuden suhteen. Direktiivien vaatimukset ovat suunniteltu myös siten, että ympäristövaikutuksia voidaan vähentää kohtuullisin kustannuksin (Ilmasto-opas 2018).

Yksi ensimmäisistä ekosuunnitteludirektiiveistä oli vuoden 2005 energiaa käyttävien tuotteiden EuP-direktiivi (2005/32), joka loi yleiset kehysvaatimukset tuotteiden energiatehokkuudelle ja ympäristövaikutuksille. EuP-direktiivin tuotteita ovat ne, jotka käyttävät, siirtävät, tuottavat tai mittaavat energiaa, esimerkiksi kodinkoneet, jäähdytyslaitteet ja valaisimet. Tämän ekosuunnitteludirektiivin pohjalta muodostettiin jatkossa monia tuoteryhmäkohtaisia säädöksiä ja uudelleen laadittiin vuonna 2009 ErP-direktiiviksi (2009/125), jossa otettiin huomioon aiemmin pois jääneet energiaan liittyvät tuotteet. Näitä ovat tuotteet, jotka eivät käytä energiaa, mutta vaikuttavat energiatehokkuuteen ja täten edistävät ympäristövaikutuksia (Eurolab 2024).

#### 3.1 Komission asetus 640/2009

Tuoteryhmäkohtaisista säädöksistä yksi ensimmäisistä sähkömoottoreiden myyntiin ja käyttöön vaikuttava direktiivi oli vuonna 2009 laadittu komission asetus 640/2009. Tässä direktiivissä käsiteltiin sähkömoottoreiden ekologiseen suunnitteluun liittyvät vaatimukset ja erilaiset tuotetietovaatimukset, kuten uudet IE-hyötysuhdeluokat. Kesäkuun 16. päivästä 2011 alkaen siirryttiin vuoden 1998 EFF-luokituksesta IE-standardiin 60034–30:2008, joka määrää uudet nimellishyötysuhteen mukaiset hyötysuhdeluokat IE2 ja IE3. Tämän asetuksen sähkömoottoreiden nimellishyötysuhteiden vähimmäisarvot on esitetty liitteen 1 taulukoissa 1 ja 2.

Komission asetuksen 640/2009 mukaisille ekosuunnitteluvaatimuksille oli muodostettu määräajat, jolloin uudet tuotetieto- ja suunnittelumääräyksen otetaan käyttöön. Nämä määräajat ja ekosuunnitteluvaatimukset ovat seuraavanlaiset:

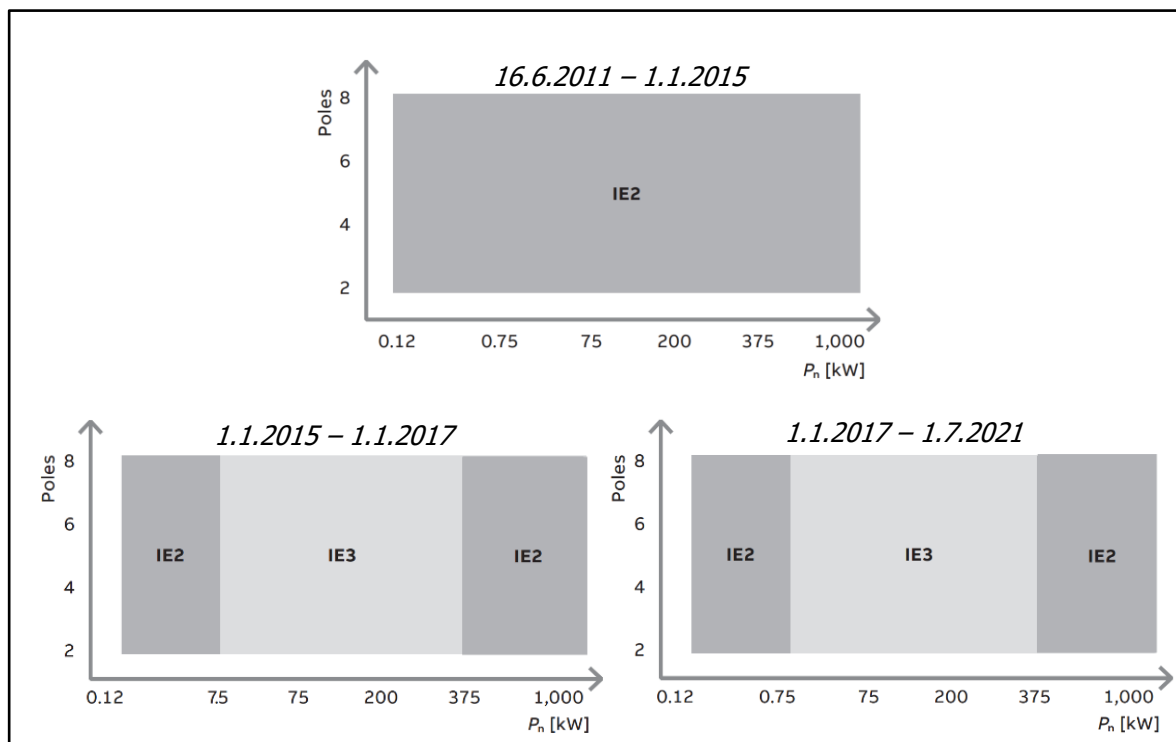
- a) 16 päivästä kesäkuuta 2011 alkaen
  - i) moottoreiden hyötysuhteen on vastattava vähintään liitteen 1 taulukossa 1 määriteltyä hyötysuhdetasoa IE2;
- b) 1 päivästä tammikuuta 2015
  - i) moottoreiden, joiden nimellisteho on 7,5–375 kW, hyötysuhteen on vastattava vähintään liitteen 1 taulukossa 2 määriteltyä hyötysuhdetasoa IE3 tai täytettävä liitteen 1 taulukon 1 määritelty hyötysuhdetaso IE2 ja oltava varustettu taajuusmuuttajalla.

c) 1 päivästä tammikuuta 2017

- i) moottoreiden, joiden nimellisteho on 0,75–375 kW, hyötysuhteen on vastattava vähintään liitteen 1 taulukossa 2 määriteltyä hyötysuhdetasoa IE3 tai täytettävä liitteen 1 taulukon 1 määritelty hyötysuhdetaso IE2 ja oltava varustettu taajuusmuuttajalla.

(Asetus 640/2009/EU. Euroopan parlamentin ja neuvoston direktiivi 2005/32/EY täytäntöönpanemista sähkömoottoreiden ekologista suunnittelua koskevien vaatimusten osalta, 3 artikla).

Ekosuunnitelman kohdan a) vähimmäisvaatimus määrittelee, että vuoden 2011 kesäkuusta alkaen laitevalmistajien myymien sähkömoottoreiden on saavutettava vähintään direktiivin määrittelemä hyötysuhdeluokkaa IE2. Vuodesta 2015 alkaen ekodirektiivi käyttöönotti kohdan b) vähimmäisvaatimukset, joka vaatii laitevalmistajien 7,5–375 kW teholuokan sähkömoottoreilta IE3-hyötysuhdeluokan, ellei kohde ole varustettu taajuusmuuttajalla. Vuonna 2017 ekodirektiivin vähimmäisvaatimus laajensi IE3-hyötysuhdevaatimustaan 0,75 kW teholuokkaan asti. Jos laitevalmistajien sähkömoottorit eivät täytä ekodirektiivin ajanjaksoisia vähimmäisvaatimuksia, ei niitä saa tuoda markkinoille. Jo hankitut energiatehottomat sähkömoottorit saa hyötykäyttää laiteuusinoissa. Kuvassa 3 on visualisoitu ekodirektiivin 640/2009 sähkömoottoreiden myyntiä ja käyttöä ohjaavat vähimmäisvaatimukset ajanjaksoittain.



Kuva 3. Komission asetuksen 640/2009 vähimmäisvaatimukset ajanjaksoittain (ABB Library Download Center: hakusana EU Ecodesign Regulation. 2023.)

### 3.2 Komission asetus 2019/1781

Sähkömoottoreiden määrä jatkoi kasvuaan Euroopassa, sekä sähköteollisuuden laitevalmistajat olivat onnistuneet kehittämään niiden energiatehokkuutta laajassa teholuokassa niin, että uusi IE4-hyötysuhdeluokka oli pystytty saavuttamaan. Euroopan komission vuoden 2009 asetuksessa on maininta, että sähkömoottoreihin liittyvää asetusta olisi tarkasteltava uudelleen ottaen huomioon sekä sähkömoottoreiden, että taajuusmuuttajien teknologinen kehitys (Asetus 640/2009/EU, 7 artikla).

Uuden ekodirektiivin suunnittelua varten komissio järjesti uudelleentarkastelun, jossa selvitettiin sähkömoottorikäyttöisten järjestelmien sähkönkulutus. Tarkastelusta oli saatu selville, että sähkömoottorikäyttöiset järjestelmät kuluttavat noin puolet unionissa tuotetusta sähköstä. Vuonna 2015 sähkömoottorit muunsivat vuoden aikana 1425 TWh sähköä mekaaniseksi energiaksi ja lämmöksi. On arvioitu, että vuoteen 2020 mennessä lukema tulee nousemaan noin 1470 TWh:iin vuodessa, sekä noin 1500 TWh:iin vuoteen 2030 mennessä. Sähkömoottoreiden energiatehokkuuden parantaminen on yksi keskeinen osa ympäristövaikutusten vähentämistä, sillä globaalissa mittaskaalassa pienikin hyötysuhteen parantuminen oikosulkumoottorissa vaikuttaa merkittävästi maailmanlaajuisiin energiasäästöihin (Asetus 2019/1781/EU. Euroopan parlamentin ja neuvoston direktiivin 2009/125/EY mukaisten ekologisen suunnittelun vaatimusten asettamisesta sähkömoottoreille ja taajuusmuuttajille, asetuksen (EY) N:o 641/2009 muuttamisesta erillisten ja tuotteisiin integroitujen akselitiivisteettömien kiertovesipumppujen ekologista suunnittelua koskevien vaatimusten osalta sekä komission asetuksen (EY) N:o 640/2009 kumoamisesta, (6)).

Ympäristövaikutuksien minimointia varten uusien ja ajantasaisien sähkömoottoreiden ekologista suunnittelua ohjaava ekodirektiivi on komission asetus 2019/1781. Tässä direktiivissä päivitettiin sähkömoottoreiden nimellishyötysuhteiden vähimmäisarvoja esittävät taulukot niin, että uusi IE4-hyötysuhdeluokka on otettu huomioon. Tämän asetuksen sähkömoottoreiden nimellishyötysuhteiden vähimmäisarvot on esitetty liitteen 2 taulukoissa 1–3.

Komission asetuksen 2019/1781 mukaisille ekosuunnitteluvaatimuksille oli muodostettu määräajat, jolloin uudet kunnossapitoon ja laitevalmistukseen vaikuttavat määräyksen otetaan käyttöön. Nämä määräajat ja ekosuunnitteluvaatimukset ovat seuraavanlaiset:

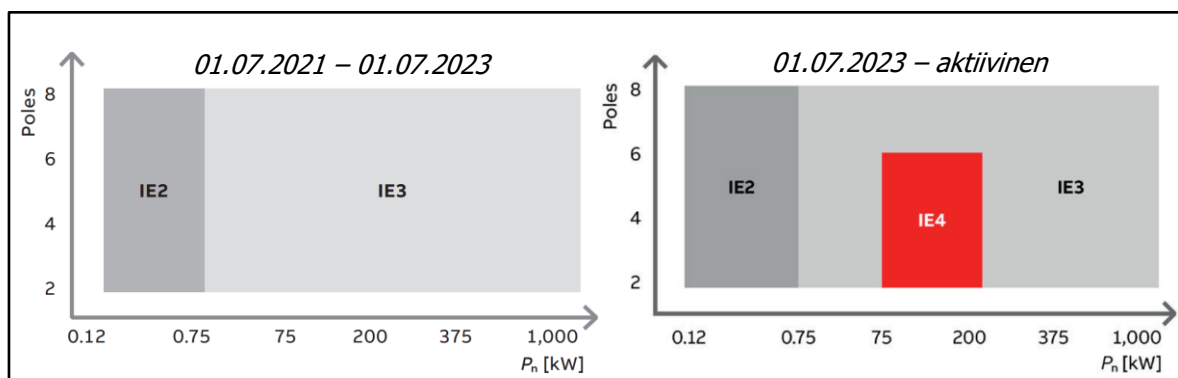
- a) 1 päivästä heinäkuuta 2021 alkaen
  - i) kolmivaihemoottoreiden, joiden nimellisteho on 0,75–1 000 kW, joilla on kaksi, neljä, kuusi tai kahdeksan napaa ja jotka eivät ole Ex eb -tyypin korotetun räjähdysuojamoottoreita, energiatehokkuuden on vastattava vähintään liitteen 2 taulukossa 2 määriteltyä hyötysuhdetasoa IE3;
  - ii) kolmivaihemoottoreiden, joiden nimellisteho on vähintään 0,12 kW ja alle 0,75 kW, joilla on kaksi, neljä, kuusi tai kahdeksan napaa ja jotka eivät ole Ex eb -tyypin korotetun räjähdysuojamoottoreita, energiatehokkuuden on vastattava vähintään liitteen 2 taulukossa 1 määriteltyä hyötysuhdetasoa IE2;

## b) 1 päivästä heinäkuuta 2023

- i) Ex eb -tyypin korotetun räjähdysuojan moottoreiden, joiden nimellisteho on 0,12–1 000 kW ja joilla on kaksi, neljä, kuusi tai kahdeksan napaa, sekä yksivaihemoottoreiden, joiden nimellisteho on vähintään 0,12 kW, on vastattava vähintään liitteen 2 taulukossa 1 määriteltyä hyötysuhdetasoa IE2;
- ii) kolmivaihemoottoreiden, jotka eivät ole jarrumoottoreita, Ex eb -tyypin korotetun räjähdysuojan moottoreita tai muita räjähdysuojattuja moottoreita ja joiden nimellisteho on 75–200 kW ja joilla on kaksi, neljä tai kuusi napaa, energiatehokkuuden on vastattava vähintään liitteen 2 taulukossa 3 määriteltyä hyötysuhdetasoa IE4;

(Asetus 2019/1781/EU, liite 1).

Näiden vaatimuksien perusteella esimerkiksi nimellisteholtaan 75 kW, kolmivaiheinen, nelinapainen sähkömoottori täytyi olla 1.7.2021 alkaen hyötysuhdeluokkaa IE3 ja 1.7.2023 alkaen hyötysuhdeluokkaa IE4 tullessaan markkinoille. Laittevalmistajat eivät saa näiden vähimmäisvaatimuksien määräysten mukaisesti myydä Euroopassa energiatehottomampia sähkömoottoreita näissä kyseisissä teholuokissa. Aiemmassa direktiivissä oli sallittu nimellisteholtaan 0,75–375 kW hyötysuhdeluokan IE2 sähkömoottorien käyttö, jos ne oli varustettu taajuusmuuttajalla. Tämä ei kuitenkaan enää päde uusien ekosuunnitteluvaatimusten myötä, vaan nimellisteholtaan 0,75–75 kW ja 200–375 kW sähkömoottorit pitää olla hyötysuhdeluokkaa IE3. Uutena kestävää kehitystä edistävänä askeleena nimellisteholtaan 75–200 kW, kaksi-, neljä-, ja kuusinapaiset sähkömoottorit tulee olla 1.7.2023 alkaen hyötysuhdeluokkaa IE4. Alla olevassa kuvassa 4 on yksinkertaistettu nämä komission asetuksen viimeisimmät vähimmäisvaatimukset.

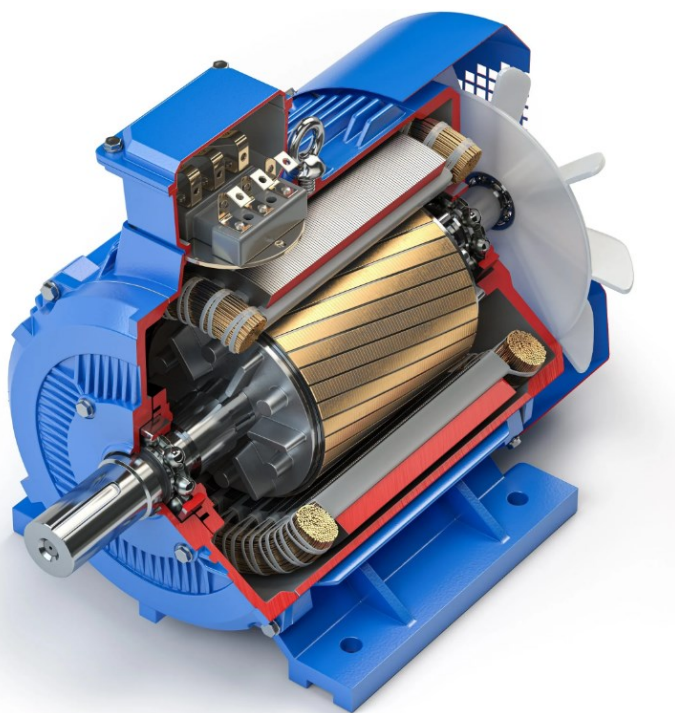


Kuva 4. Komission asetuksen 2019/1781 vähimmäisvaatimukset ajanjaksoittain (ABB Library Download Center: hakusana EU Ecodesign Regulation. 2023.)

#### 4 OIKOSULKUMOOTTORI JA ENERGIATEHOKKUUS

Teollisuuden globaalin kehityksen, kasvavan energiankulutuksen ja nousevien energiakustannusten myötä yliopistot, tutkimuslaitokset ja laitevalmistajat ovat entistä enemmän keskittyneet löytämään uusia ratkaisuja sähkömoottoreiden energiatehokkuuden parantamiseksi. Teollisuudessa yleisin sähkömoottorityyppi on oikosulkumoottori.

Oikosulkumoottoreiden suosio perustuu siihen, että se on toimintaperiaatteeltaan hyvin yksinkertainen ja koostuu vain kahdesta pääosasta – staattorista ja roottorista. Näiden pääosien rakennetta muuttamalla on pystytty vaikuttamaan sähkömoottorin nimellisarvoihin, kuten pyörimisnopeuteen, nimellistehoon ja hyötysuhteeseen. Monet laitevalmistajat ovat myös onnistuneet sarjatuottamaan oikosulkumoottoreita suuria määriä erilaisin teknisin nimellisarvoihin, jolloin niiden markkinahinta on saatu edulliselle tasolle. Näin oikosulkumoottorista on tullut yksi kustannustehokkaimmista sähkömoottoreista markkinoilla ja tällä tavoin yleisin prosessimoottorina käytetty sähkömoottori (Hietalahti 2011, 59).



Kuva 5. Oikosulkumoottorin leikkauskuva (Autoserviceworld 2023)

Laitevalmistajille on määritelty tiukat säännöt oikosulkumoottoreiden valmistamista varten. Nämä säännöt on antanut maailmanlaajuinen sähköalan standardointijärjestö IEC, jonka standardit toimivat myös eurooppalaisen ja kansainvälisen standardointitöiden pohjana (Sesko 2024). Kaikki oikosulkumoottoreiden valmistukseen ja suunnitteluun, sekä merkintään vaikuttavat säädökset on koottu standardikokonaisuuteen IEC 60034, jossa on yhteensä 31 eri osaa. Oikosulkumoottoreiden käyttötehoa ja suorituskykyä ohjaa tarkalleen standardi IEC 60034-30-1, jossa määritellään myös kaikki IE-hyötysuhdeluokat vähimmäisarvoineen kaikissa nimellisissä teholuokissa ja pyörimisnopeuksissa (ABB Library Download Center: hakusana Low voltage Process performance cast iron motors. Catalog 2024, 5).

#### 4.1 Hyötysuhteen mittaaminen

Oikosulkumoottorin hyötysuhde kertoo sen kyvystä muuntaa sen ottama sähköenergia mekaaniseksi energiaksi. Hyötysuhde lasketaan moottorin sähköenergian tulotehon ja mekaanisen energian lähtötehon suhteella. Jos oikosulkumoottorin hyötysuhdetta ei ole leimattu moottorin arvokilpeen, niin sen voi laskea arvokilven muista leima-arvoista kaavan 1 mukaisesti (Aura & Tonteri 1996, 330).

$$\eta = \frac{P_n}{P_1} = \frac{P_n}{\sqrt{3} \cdot U_n \cdot I_n \cdot \cos \varphi_n} \quad ( 1 )$$

missä,  $\eta$  on hyötysuhde,  $P_n$  oikosulkumoottorin antama mekaaninen hyötyteho,  $P_1$  oikosulkumoottorin ottama sähköteko,  $U_n$  pääjännite,  $I_n$  vaihevirta ja  $\cos \varphi_n$  tehokerroin.

Laskukaavan avulla saatu prosentuaalinen arvo kertoo, kuinka paljon sähköenergiaa kuluu oikosulkumoottorin rakenteissa mekaanisen energian tuottamiseksi moottorin akselille. Jotta oikosulkumoottoreita saa myydä EU:n alueella tulee niiden hyötysuhdeluokka määrittää erilaisin mitallisoin menetelmin. Laitevalmistajia varten on kehitetty IEC-standardi 60034-2-1, joka kertoo keinot sähkömoottorin hyötysuhteen määrittämiseksi. Standardin määrittämiä hyötysuhteen laskentatapoja on kaksi erilaista, suora ja epäsuora menetelmä.

Suora menetelmä perustuu sähkömoottorin sähköenergisestä tulotehon mittaamiseen tehoanalysointilaitteilla samaan aikaan, kun moottorin mekaaninen lähtöteho mitataan dynamometrillä pyörimisnopeuden ja momentin avulla. Tämän menetelmän avulla saadut hyötysuhdearvot eivät kuitenkaan ota huomioon ympäristön ja moottorin lämpötilaa mittauservoissa.

Epäsuora menetelmä perustuu oikosulkumoottorin häviöiden määrittämiseen ja tätä kautta kokonaishäviön laskemiseen. Kun kokonaishäviöt vähennetään oikosulkumoottorin ottamasta tulotehosta, saadaan tarkempi arvio sähkömoottorin hyötysuhteesta. Oikosulkumoottorin tehohäviöt lasketaan kuudesta standardin määrittämästä kuormituspisteestä ja niiden laskennassa käytetään myös tarvittavia laskukaavoja ympäristön ja moottorin lämpötilan huomioimiseksi. Sähkömoottoreita valmistava ABB Oy määrittelee heidän prosessimoottoreidensa hyötysuhteet epäsuoralla menetelmällä, johon lisätään vielä standardin määrittämät lisähäviöt erillisellä laskukaavalla. Tämä menetelmä onkin standardin suosittama, sillä se takaa todenmukaisimman hyötysuhdearvon.

Standardissa on tunnistettu, missä oikosulkumoottorin tehohäviöt pääosin muodostuvat ja ne on pystytty jakamaan neljään eri ryhmään. Oikosulkumoottorin tehohäviöt perustuvat:

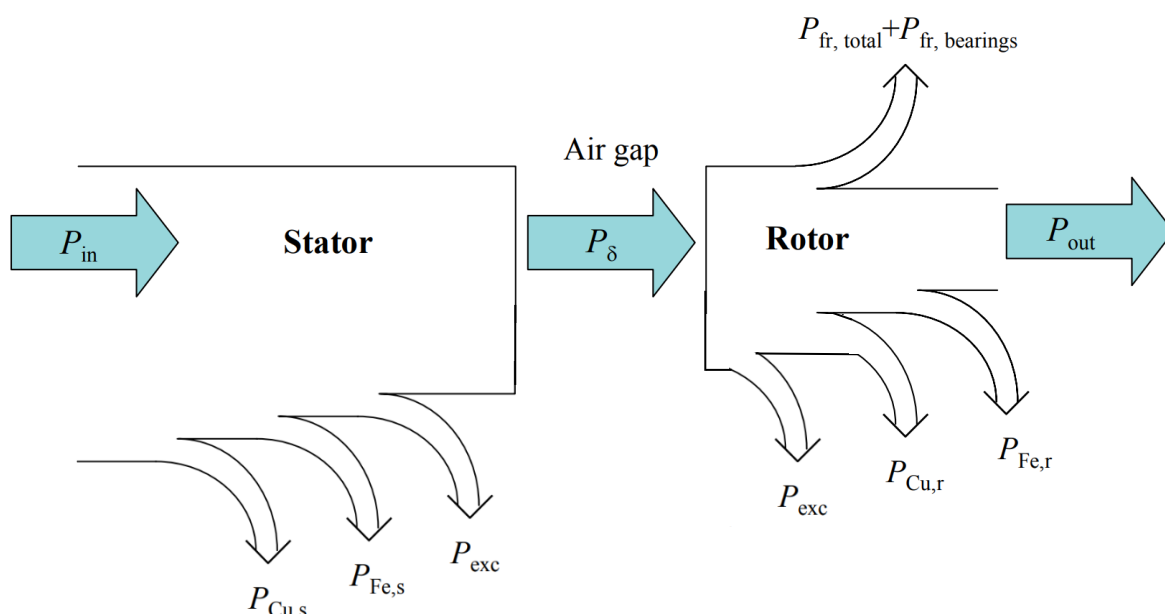
- Kuormitushäviöihin, jotka muodostuvat staattorin ja roottorin käämityksissä
- Rautahäviöihin
- Kitka- ja tuuletushäviöihin
- Kuormituksesta aiheuttamiin lisähäviöihin

(ABB Library Download Center: hakusana IEC 60034-2-1 standard on efficiency measurement methods for low voltage AC motors. Leaflet 2024).

Seuraavassa luvussa avataan näihin ryhmiin kuuluvia hyötysuhteeseen vaikuttavia tekijöitä ja niiden optimointia.

## 4.2 Hyötysuhteeseen vaikuttavat tekijät ja niiden optimointi

Oikosulkumoottori muuntaa ottamansa sähköenergian mekaaniseksi energiaksi staattorin ja roottorin välisellä vuorovaikutuksella. Tässä vuorovaikutuksessa staattori luo vaihtovirran avulla pyörivän magneettikentän sen kehän sisälle, johon sijoitetaan laakerien varaan roottori. Häkkikämillisen roottorin tilanteessa staattorin pyörivä magneettikenttä indusoi roottorin häkkikämiin oikosulkuvirran, joka muodostaa roottoriin magneettiset navat. Nämä navat pyrkivät seuraamaan magneettikentän liikettä, joka saa aikaan roottorin pyörimisen ja tietyn vääntömomentin muodostumisen (Hieta-lahti 2011, 60). Tässä sähkömagneettisessa induktiossa tapahtuu häviöitä staattorissa ja roottorissa erilaisin tavoin. Kuvassa 6 on esitetty, mitä erilaisia tehohäviöitä ilmenee oikosulkumoottorin sähköisen tulotehon ja mekaanisen lähtötehon välillä.

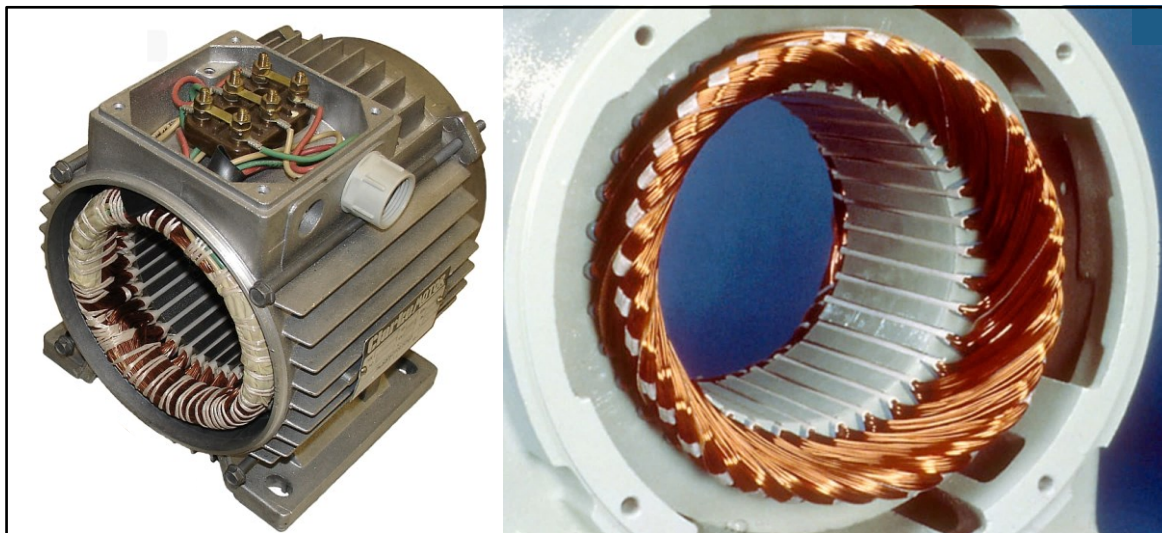


Kuva 6. Oikosulkumoottorin tehonjakokaavio (Aho 2007, 24)

Kuvassa on esitetty, kuinka sähköisestä tulotehosta ( $P_{in}$ ) häviää ensimmäisenä tietty osa energiaa staattorissa pyörivän magneettikentän muodostamiseksi. Näitä tehohäviöitä tapahtuu staattorin käämityksessä ( $P_{Cu,s}$ ) ja sähkölevyissä ( $P_{Fe,s}$ ). Korkeataajuuskäytöt aiheuttavat lisähäviöiden ( $P_{exc}$ ) muodostumista staattorissa ja roottorissa. Niitä on kuitenkin vaikea ennustaa ja mitata verrattuna muihin häviöihin (Aura & Tonteri 1996, 328). Staattorihäviöiden jälkeen jäljelle jäävää pyörivän magneettikentän tehoa kutsutaan ilmvälitehoksi ( $P_{\delta}$ ), joka indusoi lopulta roottorille. Roottorissa ilmenee mekaanisen voiman ( $P_{out}$ ) muodostumisessa myös käämityshäviöitä ( $P_{Cu,r}$ ), rautahäviöitä ( $P_{Fe,r}$ ), että kitka- ja tuuletushäviöitä ( $P_{fr, total} + P_{fr, bearings}$ ) (Aura & Tonteri 1996, 330). Oikosulkumoottorin lopulliseen hyötysuhteeseen vaikuttaa myös monet sähkömoottorin ulkopuoliset tekijät, kuten ympäristönlämpötila tai ajotapa.

#### 4.2.1 Staattorin käämityshäviöt

Staattorissa ilmenee resistiivisiä käämityshäviöitä ja magneettivuon muutoksesta aiheutuvia rautahäviöitä. Käämityshäviöitä syntyy aina, kun käämityksessä kulkee sähkövirta pyörivän magneettikentän muodostamiseksi. Staattori koostuu kuvan 7 mukaisesti moottorin rungosta, rautasydämmestä ja staattorikäämityksestä.



Kuva 7. Oikosulkumoottorin pääosa – Staattori (ARCHI INDUSTRIES 2021) (AAWVA 2016)

Staattorin virrasta johtuvia käämitystehohäviöitä kutsutaan myös kuparihäviöiksi. Staattorin käämityshäviöt voidaan laskea seuraavalla kaavalla 2

$$P_{Cu} = m \cdot I^2 \cdot R_{Cu} \quad ( 2 )$$

jossa,  $m$  on oikosulkumoottorin vaiheiden määrä,  $I$  käämitysvaihevirta ja  $R_{Cu}$  käämityksenvaiheresistanssi. Käämityshäviöitä pystyy vähentämään staattorissa erilaisin rakenteellisin muutoksia, joiden tavoitteena on vähentää käämityksen kokonaisresistanssia. Käämitysvyyhtien resistanssiin vaikuttavat monet tekijät ja nämä on esitetty tarkemmin alla olevassa kaavassa 3

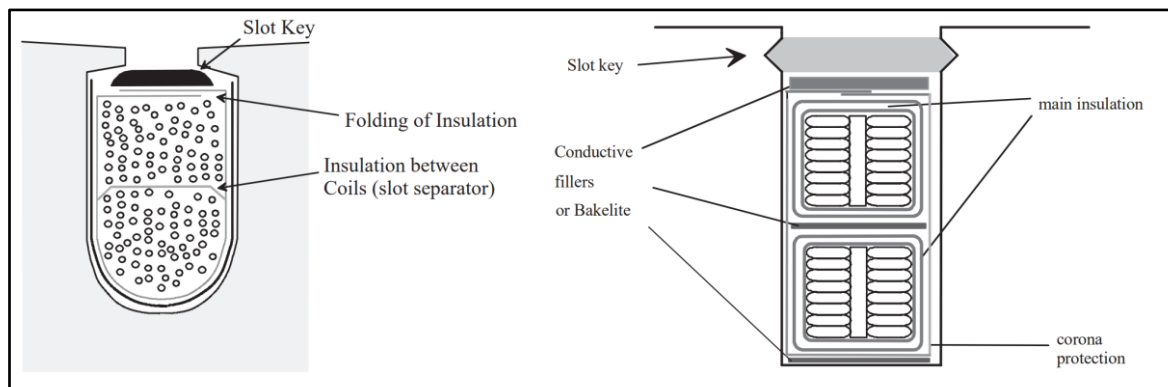
$$R_{Cu} = k_R \cdot \frac{N \cdot l_{av}}{\sigma \cdot S_c} \quad ( 3 )$$

jossa,  $k_R$  on virranahdon kerroin,  $N$  on vyyhtien kappale määrä urassa,  $l_{av}$  on keskimääräinen vyyhdin pituus,  $S_c$  on vyyhdin halkaisija ja  $\sigma$  on vyyhtityypin ominainen sähkönjohtavuus, johon vaikuttaa käämityksessä käytetty materiaali (Pyrhönen, Jokinen & Hrabovcova 2014, 524–525).

#### *Staattorin käämityslanka*

Kokonaisresistanssiin ja kuparikäämityksen määrään täten vaikuttaa staattorin urien tehotiheyttä edistävät tekijät, joilla pystyy vähentämään käämityksen materiaalimäärää. Oikosulkumoottorin teholuokka huomioiden käämityksen resistanssia pystyy vähentämään kasvattamalla vyyhtien halkaisijaa ja pienentämällä vyyhtien kappalemäärää ja pituutta. Staattorin urien tehotiheyden maksimoinnilla voidaan vähentää tarvittavan kuparikäämityksen määrää, jolloin kokonaisresistanssi pienenee ja

hyötysuhde paranee (Tong 2017, 242). Samalla tehotehden maksimointi vähentää virtalämpöhäviöitä, kun käämityksien lämmönjohtavuus staattorin rautalevyihin paranee. Tehotehden maksimointiin vaikuttaa käytetty käämityslanka, jolla pystyy täyttämään staattorien urat mahdollisimman tehokkaasti. Yleisimpänä käytetty käämityslanka on kuvan 8 vasemmalla puolella oleva pyörölanka, joka koostuu toisistaan eristetyistä kuparijohtimista ilman erillistä huomiota niiden muotoilun suhteen. Toinen staattorien käämityksessä käytetty käämityslanka on kuvan 8 oikealla puolella oleva muotolanka, joka on rakenteeltaan eristettyä kuparilevyä pinottuna päällekkäin.



Kuva 8. Pyörö- ja muotolangan leikkauspiirustus (Pyrhönen ym. 2014, 512, 514)

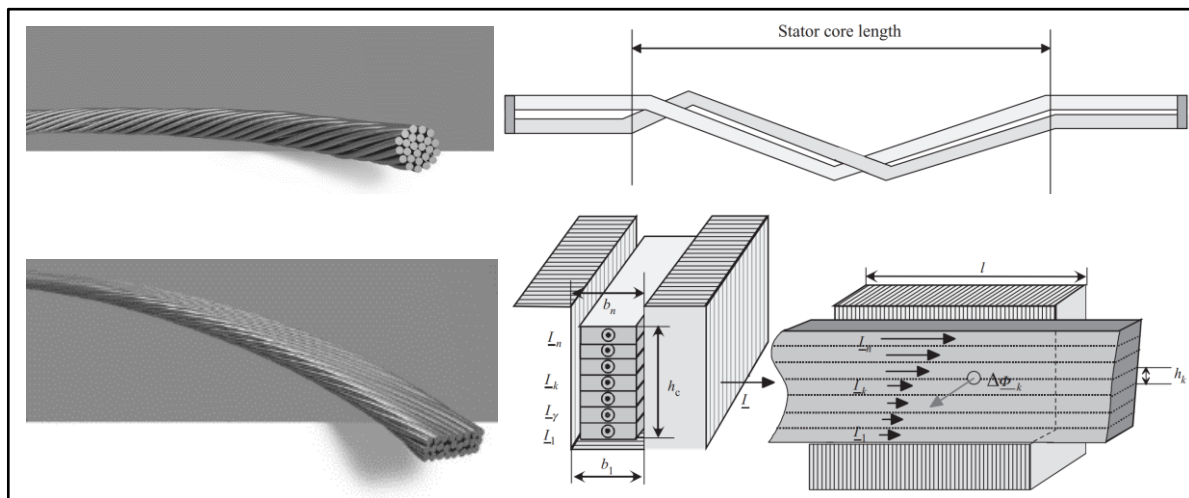
Näiden käämityslankojen erona on niiden uran täyttökerroin, jolla staattorin tehotehden voidaan saada mahdollisimman hyväksi ja täten vähentää resistiivisiä häviöitä. Pyörölanka on näistä esimerkeistä joustavin ja halvin, mutta sen uran täyttökerroin on vain 60 %. Muotolangalla pystyy saavuttamaan >80 % täyttökertoimen ja siksi sitä on käytetty varsinkin korkean teholuokan sähkömoottoreissa, sekä korkeamman hyötysuhteen ja nimellismomentin tavoittelemiseksi (Metsberg 2006, 7).

Valitulla staattorin käämitystavalla on myös väliä hyötysuhteen kannalta. Esimerkiksi taso- tai ristikäämityksellä voidaan vaikuttaa käämityksen materiaalmäärään. Kolmivaiheisen oikosulkumoottorin staattorin käämitys täytyy olla myös täysin symmetrinen resistanssiltaan ja kuormitukseltaan. Staattorin käämitysurien geometrisella muodolla voidaan tehostaa käämityslankojen urien täyttökertoimta ja vaikuttamaan magneettivuon kulkuun.

### *Staattorikäämityksen virranahdo*

Taajuusmuuttajakäytöt aiheuttavat virranahtoa staattorin käämityksessä ja tämän vaikutusta voidaan ehkäistä käyttämällä kierrettyä johdinmallia vyyhtien tekoon. Virranahtoa voi minimoida käyttämällä pyörö- tai muotolangallista Litz-lankaa staattorin käämityksessä. Korkea tehoisimmissa oikosulkumoottoreissa voidaan käämitys tehdä myös Roebel-tangosta. Näissä käämityksissä johtimet ovat eristettyjä toisistaan ja symmetrisellä kierteellä, jotta johtimet vuorottelisivat mahdollisimman tasaisesti kuorman kanssa. Tämä on tunnetusti edistänyt virranahdon minimointia ja epätasapainoisuuksia käämityksen kuormituksessa (Pyrhönen ym. 2014, 278). Kuvassa 9 on esitetty nämä erilaiset virranahtoa vähentävät käämitykset, sekä visuaalinen kuvaus virranahdon muodostamasta käämitysvirran epätasaisesta jakautumisesta seitsemän muotolangan suhteen. Lähimpänä staattorin ja root-

torin ilmaväliä olevaan muotolankaan kohdistuu eniten käämitysvirtaa ja kauimmaiseen vähiten. Tämnäkaltaisten tilanteiden lisähäviöiden muodostumista on pystytty vähentämään käyttämällä symmetrisellä kierteellä olevaa käämitystä (Pyrhönen ym. 2014, 279–282).



Kuva 9. Pyörö- ja muotolangallinen Litz-lanka, sekä Roebel-tanko (Elektrisola 2024) (Pyrhönen ym. 2014, 278–279)

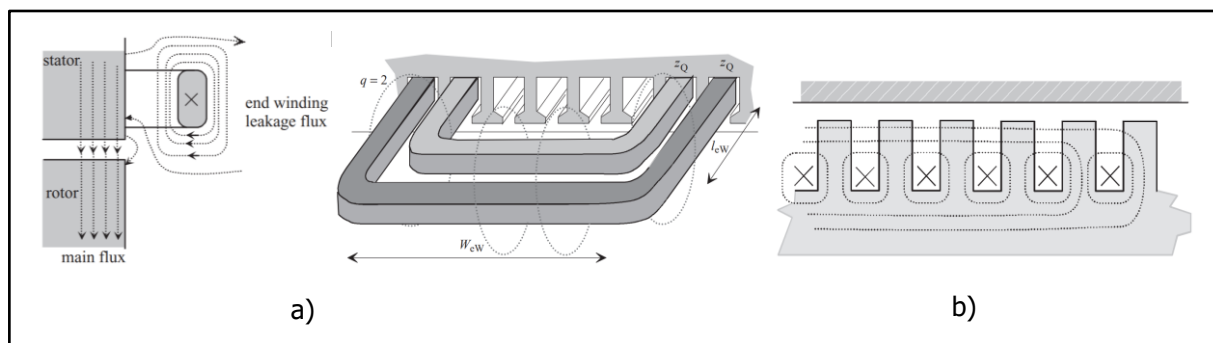
#### *Staattorikämmityksen hajavuo*

Staattorin pyörivä magneettikenttä muodostaa magneettisen päävuon, joka kulkee staattorista roottoriin ja roottorista takaisin staattoriin. Tämän aikana päävuo lävistää pääosien ilmavälin kahdesti, ja samoin staattori- ja roottorihampaan kahdesti, sekä staattori- ja roottoriselän kerran. Staattorin käämitys aiheuttaa päävuon lisäksi staattorin urien ympärille magneettivuon, joka oikaisee ilmavälin kautta menemättä roottoriin. Tämä vuo on nimeltään hajavuo, jota esiintyy ilmavälin lisäksi myös staattorin vyyhdenpään alueella kuvan 10 kohdan a) mukaisesti (Aura & Tonteri 1996, 319).

Oikosulkumoottorin pää- ja hajavuot kohtaavat magneettiipiireissään omat magneettiset vastukset, eli reluktanssit, jotka vaikuttavat staattorin ja roottorin pää- ja hajareaktanssin muodostumiseen. Staattorin käämityksen hajareaktanssin voi laskea kaavan 4 avulla

$$X_{\sigma 1} = 2 \cdot \pi \cdot f \cdot \frac{N_1^2}{R_{\sigma 1}} = \omega \cdot L_{\sigma 1} \quad (4)$$

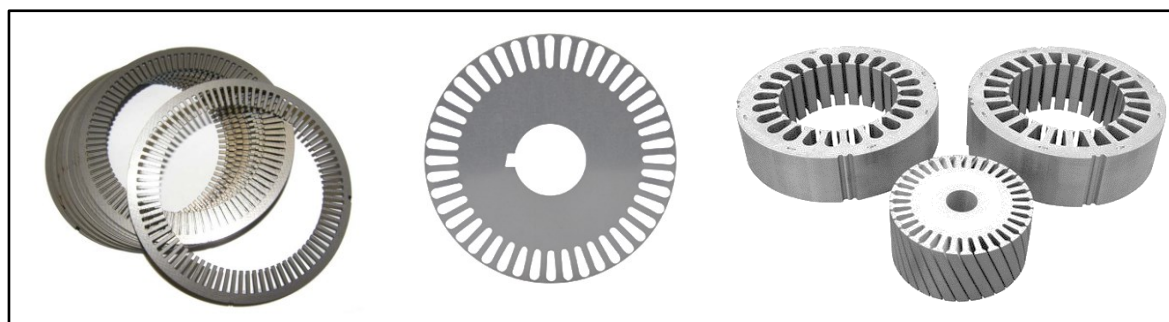
jossa,  $f$  on käämitykseen kohdistuva taajuus,  $N_1$  johdinkierrosten lukumäärä,  $R_{\sigma 1}$  hajavuon magneettiipiirin reluktanssi,  $\omega$  kulmataajuus ja  $L_{\sigma 1}$  staattorin hajainduktanssi. Hajareaktanssin muodostumista tulee minimoida, koska sillä on vaikutus oikosulkumoottorin lopulliseen hyötysuhteeseen (Aura & Tonteri 1996, 319). Hajareaktanssia ilmenee oikosulkumoottorissa staattorin ja roottorin ilmavälissä, staattorin vyyhdenpään alueella ja käämitysurien hampaiden ja niiden kärkien välillä kuvan 10 kohdan b) mukaisesti (Pyrhönen ym. 2014, 235).



Kuva 10. Staattorikäänityksessä esiintyvä hajavuuo, a) vyyhdenpään alue, b) urien välillä (Pyrhönen ym. 2014, 236, 261)

#### 4.2.2 Staattorin ja roottorin rautahäviöt

Staattorissa ja roottorissa on rautasydän, joka muodostuu ladotuista toisistaan eristetyistä sähkölevyistä, joihin on niiden valmistusvaiheessa rei'itetty käänityksien urat. Rantalan (2014, 18) mukaan sähkölevyt ovat materiaaliltaan pääasiassa terästä, joihin on seosaineena lisätty rautahäviöitä vähentäviä muita metalleja ja puolimetalleja, kuten kuparia ja piitä. Sähkölevyissä ilmenevät rautahäviöt koostuvat pyörrevirta- ja hystereesihäviöistä, että korkean taajuuden aiheuttamista lisähäviöistä. Kuvassa 11 on esitetty erilaisia rautasydämmien sähkölevyjä.



Kuva 11. Staattorin ja roottorin sähkölevyt (POLARISLASERLAMINATIONS 2012) (CDZ 2024) (ECPLAZA 2024)

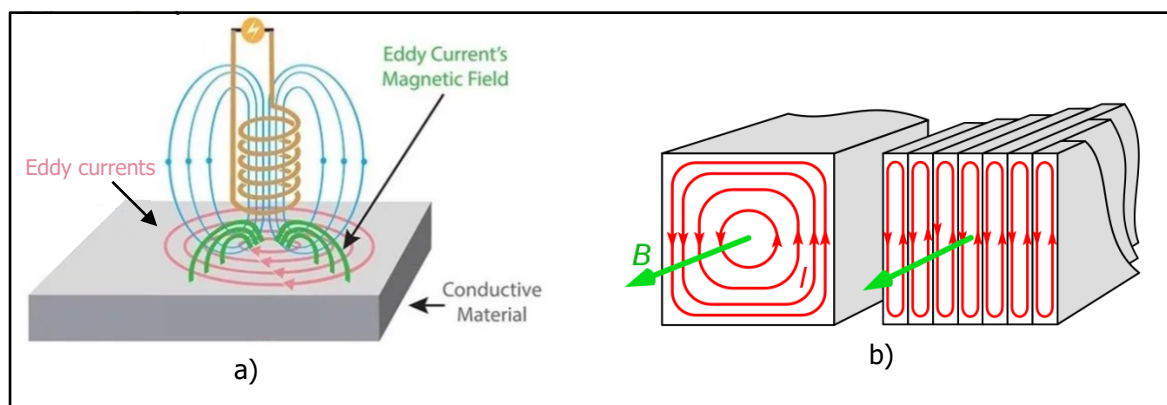
#### *Rautasydämmien pyörrevirrat*

Oikosulkumoottorin pyörivä ja jatkuvasti muuttuvat magneettikenttä aiheuttaa pyörrevirtojen synty-  
misen staattorin ja roottorin sähkölevyissä. Pyörrevirrat ovat muuttuvassa magneettikentässä johta-  
vaan kappaleeseen indusoituvia sähkövirtoja, jotka pyrkivät vastustamaan magneettivuon muutosta.  
Pyörrevirrat ilmenevät rautasydämmessä sähkölevyjä lämmittävänä häviönä. Pyörrevirtahäviöitä voi-  
daan arvioida seuraavalla kaavalla 5

$$P_{Fe, Ft} = \frac{V \cdot \pi^2 \cdot f^2 \cdot d^2 \cdot B_m^2}{6 \cdot \rho} \quad (5)$$

jossa  $P_{Fe, Ft}$  on pyörrevirtatehohäviö,  $V$  sähkölevyn tilavuus,  $f$  taajuus,  $d$  sähkölevyn paksuus,  $B_m$  vuontiheys ja  $\rho$  sähkölevyn materiaalin resistiivisyys (Pyrhönen ym. 2014, 200). Korkeataajuuskäytöt aiheuttavat enemmän pyörrevirtahäviöitä, kun suorakäytöt. Sähkölevyjien seosaineilla pystyy vähentämään sähkönjohtavuutta vaikuttamalla sähkölevyjien vuontiheyteen, jolloin staattori- ja rootto-

ripaketin pyörrevirtahäviöt pienenevät. Sähkölevyjien kokonaistilavuutta, pinta-alaa ja paksuutta pienentämällä pystyy vähentämään staattorin ja roottorin lämpöhäviöitä ja täten parantamaan hyötysuhdetta. Kuvan 12 kohdassa a) on yksinkertaisesti visualisoitu pyörrevirran ja sen magneettikentän muodostumista vaihtosähköpiirissä olevan käämin ja sen magneettikentän vaikutuksesta. Kohdassa b) on esitetty yhtenäisen rautakappaleen ja rautalevyistä tehdyn kappaleen pyörrevirtojen muodostuminen. Pyörrevirtoja syntyy yhden kappaleen sijaan nyt monessa kapeammassa kappaleessa. Niiden tehohäviöt ovat kuitenkin paljon pienempiä, kuin yhden yhtenäisen kappaleen tilanteessa (Tong 2017, 374).



Kuva 12. Pyörrevirta ja magneettikenttä, a) muodostuminen (MEDIUM 2023), b) optimointi (MOTIONCONTROLTIPS 2024)

### Sähkölevyjien hystereesi

Kun sähkölevyihin kohdistetaan jatkuvasti muuttuva magneettikenttä, niin se aiheuttaa materiaalin atomidipolit asettumaan aina muuttuvan magneettikentän mukaisesti. Magneettikentän suunnan äkillinen muutos materiaaliin nähden vaatii atomidipolien uudelleenjärjestäytymisen. Staattorin ja roottorin sähkölevyt säilyttävät tietyn määrän magnetisaatiota magneettikentän suunnan muuttuessa, jota kutsutaan magneettiseksi hystereesiksi. Tämän muodostuneen hystereesin muuttaminen vaihtelevan magneettikentän mukaiseksi aiheuttaa atomidipoleissa kitkaa ja tätä kautta lämpöhäviöitä (Tong 2017, 374). Hystereesihäviöitä voidaan arvioida seuraavalla kaavalla 6

$$P_{Fe,Hy} = c_{Hy} \cdot \frac{f}{100} \cdot m_{Fe} \cdot (B_{tan,1}^2 + B_{norm,1}^2) \cdot k_d \quad (6)$$

jossa,  $c_{Hy}$  on hystereesikerroin, joka vaihtelee sähkölevyn päämateriaalin ja seosaineiden mukaan. Suure  $m_{Fe}$  kuvaa staattorilevyn massaa,  $k_d$  on vuontiheyksistä laskettu jakaumakerroin ja  $B_{tan,1}$  sekä  $B_{norm}$  on staattorilevyjen erilaisia magneettivuontiheyksiä (Pyrhönen ym. 2014, 203). Tämän kaavan ja muiden tieteellisten lähteiden perusteella hystereesihäviöihin vaikuttaa monet tekijät, kuten taajuus, maksimivuontiheys, sähkölevyjien kokonaismateriaali ja magneettivuon suunta (Tong 2017, 374).

### Sähkölevyjien käämitysurien määrä

Staattorin ja roottorin sähkölevyjien käämitysurien määrä tulee valita ja optimoida niin, että haluttu teholuokka saavutetaan mahdollisimman energiatehokkaasti. Oikosulkumoottorin staattorin ja roottorin käämitysurien suhde ei ole vakio jokaiselle teholuokalle, vaan se voi vaihdella oikosulkumoottoreiden ja laitevalmistajien välillä. Käämitysurien suhteella on kuitenkin väliä oikosulkumoottorin toiminnan ja hyötysuhteen kannalta. Taulukossa 1 on esitetty erilaisia käämitysurayhdistelmiä staattorille ja roottorille erilaisilla napapariluvuilla, sekä niissä ilmeneviä haittoja.

Taulukko 1. Staattorin ja roottorin käämitysurayhdistelmiä napapareille 1 ja 2 (Pyrhönen ym. 2014, 371)

$Q_s$	Tens of rotor slot number	Number of pole pairs $p = 1$										Number of pole pairs $p = 2$									
		Ones of rotor slot number $Q_r$										Ones of rotor slot number $Q_r$									
		0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
24	1	-	x	o	x	+	x	-	x	o	x	-	x	o	x	+	x	+	x	x	
	2	+	x	-	x	o	x	+	x	-	x	-	x	-	x	o	x	+	x	+	x
	3	o	x	+	x	-	x	o	x	+	x	x	-	x		x	o	x		x	
36	1	-	x	o	x	+	x	-	x	o	x	x	o	x		x	±	x	o	x	
	2	+	x	-	x	o	x	+	x	-	x	±	x		x	o	x		x	+	x
	3	o	x	+	x	-	x	o	x	+	x	x	-	x	-	x	o	x	+	x	
	4	-	x	o	x	+	x	-	x	o	x	+	x		x	-	x		x	o	x
	5	+	x	-	x	o	x	+	x	-	x	x	+	x		x	-	x		x	
48	1	-	x	o	x	+	x	-	x	o	x	x	o	x		x	+	x		x	
	2	+	x	-	x	o	x	+	x	-	x	-	x	-	x	o	x	+	x	+	x
	3	o	x	+	x	-	x	o	x	+	x	x	-	x		x	o	x		x	
	4	-	x	o	x	+	x	-	x	o	x	+	x		x	-	x	-	x	o	x
	5	+	x	-	x	o	x	+	x	-	x	+	x	+	x		x	-	x		x
	6	o	x	+	x	-	x	o	x	+	x	o	x		x	+	x		x	-	x

**Only the combinations without a symbol are completely safe choices.**

---

A o symbol indicates the slot numbers that predict particularly harmful synchronous torques when the motor is held at stall.

---

A + sign indicates the slot numbers that predict particularly harmful synchronous torques at positive rotation speeds.

---

A - sign shows those slot numbers that predict particularly harmful synchronous torques at negative rotation speeds (in counter-current braking).

---

A x symbol indicates pairs of slot numbers with harmful mechanical vibrations.

Taulukossa on esitetty oikosulkumoottoreiden staattorin ja roottorin käämitysurayhdistelmiä napapariluvuille 1 ja 2, sekä niiden selitykset. Pyrhösen ja ym. (2014, 370) tekemässä tutkimuksessa oli selvinnyt, että tiettyjen käämitysurayhdistelmien yhteydessä ilmenee erilaisia haittoja oikosulkumoottorin toiminnan suhteen. Erilaisista käämitysurayhdistelmistä voidaan todeta, että roottorin käämitysurien määrän ollessaan pariton ilmenee silloin huomattavasti yleisemmin epätasapainoa oiko-

sulkumoottorin toiminnan puolesta ja täten enemmän ääntä. Vain tietyt yhdistelmät, joille ei ole mitään symbolia määritetty ovat täysin tasapainossa, eivätkä aiheuta mitään haittavaikutuksia oikosulkumoottorin toiminnassa. Oikosulkumoottorin toimintaa haittaavat ilmiöt vaikuttavat myös odotetusti energiatehokkuuteen.

Pyrhösen (2014) mukaan roottorin käämitysurien määrä täytyy valita oikosulkumoottorille niin, että toiminnallisia häiriöitä ilmenee mahdollisimman vähän. Taulukosta 1 voidaan kuitenkin todeta, että kaksinapainen oikosulkumoottori vaatii tarkempaa suunnittelua optimaalisen staattorin ja roottorin käämitysurayhdistelmän osalta, kuin nelinapaisen tilanteessa. Häiriöiden minimointi parantaa oikosulkumoottoreiden suorituskykyä ja samalla voi parantaa sen teknisiä ominaisuuksia, sekä esiintyvien häviöiden määrää. Ocak (2023) oli esittänyt artikkelissaan, kuinka roottorin käämitysurien määrän muuttamisella on vaikutus oikosulkumoottorin hyötysuhteeseen.

Käämitysurien suhde tulee kuitenkin optimoida laitekohtaisesti niin, että esiintyvät häviöt ja häiriöt minimoituvat. Tämän ja muiden oikosulkumoottorin optimaaliseen toimintaan vaikuttavien tekijöiden kautta on päädytty siihen, että taulukon 2 mukaiset käämitysurayhdistelmät ovat oikosulkumoottorin toiminnan kannalta parhaimmat.

Taulukko 2. Staattorin ja roottorin optimaaliset käämitysurayhdistelmät (Pyrhönen ym. 2014, 373)

$p$	$Q_s$	$Q_r$
1	24	28, 16, 22
	36	24, 28, 48, 16
	48	40, 52
	60	48
2	36	24, 40, 42, 60, 30, 44
	48	60, 84, 56, 44
	60	72, 48, 84, 44
3	36	42, 48, 54, 30
	54	72, 88, 48
	72	96, 90, 84, 54
4	36	48
	48	72, 60
	72	96, 84

#### 4.2.3 Roottorin käämityshäviöt

Roottorissa ilmenee staattorin kaltaisesti käämitys- ja rautahäviöitä oikosulkumoottorin toiminnan aikana. Roottorin rakennetta optimoimalla voi kuitenkin vaikuttaa sen tehohäviöihin ja oikosulkumoottorin erilaisiin tekniisiin ominaisuuksiin, kuten hyötysuhteeseen, käynnistys- ja nimellismomenttiin. Nykypäivänä yleisin teollisuudessa käytetty sähkömoottori on häkkikämillinen oikosulkumoottori. Roottori koostuu laminaattilevyistä ja nimensä mukaan häkkimäisestä käämitysrakenteesta, jonka pääosassa on käämityssauvat ja oikosulkurenkaat, jotka muodostavat kuvan 13 mukaisen häkin. Roottorin valmistusprosessissa rei'itetyt sähkölevyt pinotaan päällekkäin, josta koostuu häkkikämmitykselle urat. Pinotut levyt kiinnitetään toisiinsa esimerkiksi hitsaamalla, jonka jälkeen levyt

upotetaan sulaan alumiiniin. Jäähtyessä roottorin levyjen uriin muodostuu häkkikäämityksen sauvat ja päätyihin oikosulkurenkaat (Tong 2017, 88–89).



Kuva 13. Oikosulkumoottorin pääosa - Häkkikäämillinen roottori (ALAMY 2024)

Roottorin käämityssauvoissa ja oikosulkurenkaissa ilmenee samanlaisia käämityshäviöitä, kuin staattorissakin ja siksi samalla IEC-standardin määrittämällä kaavalla 2 on ohjeistettu roottorin käämityshäviöiden laskenta, kunhan staattorin käämitysvirran ja resistanssin tilalle sijoitetaan roottorin käämitysvirta ja resistanssi. Käytännössä tätä laskukaavaa ei kuitenkaan pysty käyttämään, sillä roottorin käämitysvirtaa on mahdotonta mitata. Tästä syystä roottorin käämityshäviöt yleensä päätellään laskukaavalla 7, jossa kerrotaan oikosulkumoottorin tulotehon ja staattorin häviötehon erotus oikosulkumoottorin jättämällä

$$P_{Cu,r} = P_{\delta} \cdot s = (P_{in} - P_S) \cdot \frac{n_s - n_r}{n_s} \quad (7)$$

jossa  $P_{Cu,r}$  on staattorissa ilmenevä käämityshäviö ja  $s$  on oikosulkumoottorin suhteellinen jättämä, joka lasketaan staattorikentän tahtinopeuden  $n_s$  ja akselin pyörimisnopeuden  $n_r$  avulla (Aura & Tonteri 1996, 329).

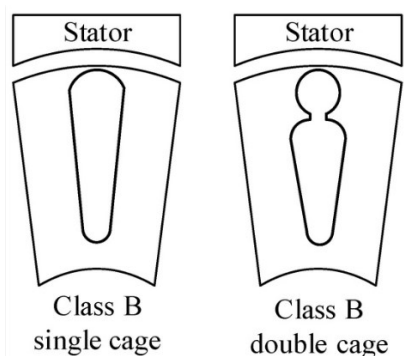
#### *Roottori käämityksien materiaali*

Nykypäivän oikosulkumoottoreiden häkkikäämitykset tehdään yleensä alumiinista, sen halvan hinnan ja helpon käsittelyn takia. Kuparista tehty häkkikäämitys vähentäisi huomattavasti roottorin käämityshäviöitä kuparin paremman sähkönjohtavuuden takia. Sen valmistus ei kuitenkaan ole vielä kannattavaa kuparin korkean hinnan ja vaikean käsittelyn takia, sillä se nostaisi liikaa moottoreiden valmistuskustannuksia. Kupari on alumiiniin verrattuna vaikeampaa käsitellä, sen korkean sulamispisteen takia. Alumiinisen häkkikäämillisen roottorin hyötysuhdetta on kuitenkin mahdollista parantaa käyttämällä sellaisia seosaineyhdistelmiä, jonka avulla käämityksen sähkönjohtavuus parantuisi. Seosaineilla pystyy myös edistämään valutekniikalla valmistettujen häkkikäämityksien laatua ja täten energiatehokkuutta (Tong 2017, 86, 89).

#### *Roottorin käämityssauvojen geometrinen muoto*

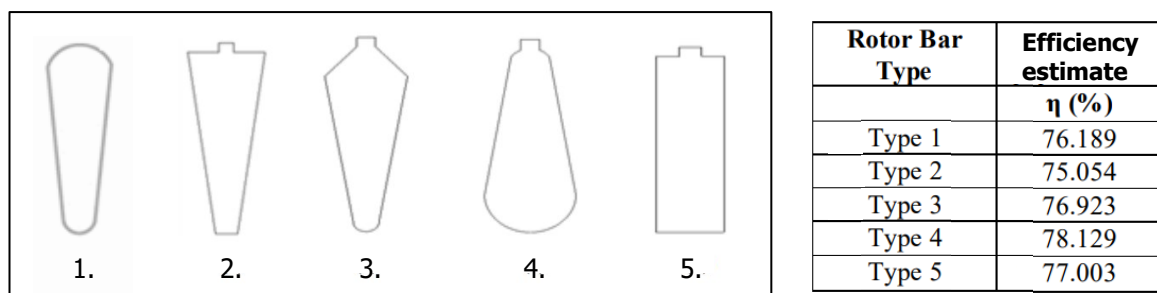
Roottorin käämityssauvojen pinta-alalla ja muodolla on vaikutusta oikosulkumoottorin hyötysuhteeseen. Oikosulkurenkaiden osalta hyötysuhteeseen vaikuttaa niiden kokonaispinta-ala ja tuuletusta edistävät siivekkeet, jotka aiheuttavat ilmanvastusta. Oikosulkumoottoreissa käämityssauvat ovat toteutettu joko yhden hakin käämitysrakenteella tai kaksoishäkkikäämityksellä kuvan 14 mukaisesti.

Nämä erilaiset käämitysrakenteet eroavat sillä, että yhden häkin käämitys koostuu yhtenäisestä käämitysauvasta ja kaksoishäkkikäämityksessä on tunnistettava ylä- ja alaosan erottava ns. kaula.



Kuva 14. Yhden häkin käämitys ja kaksoishäkkikäämitys (Ocak 2017, 4)

Yksittäisiä tieteellisiä tutkimuksia on tehty, joissa tutkitaan roottorin käämitysauvojen rakenteen optimointia hyötysuhteen kannalta. Maloman, Muteban & Nicolaen (2017) kirjoittamassa artikkelissa oli osatutkimus, jossa oli selvitetty, mikä yhden häkin käämitysauvojen muodoista tuottaa parhaimman hyötysuhteen oikosulkumoottorissa. Kuvassa 15 on esitetty tutkimuksen viisi erilaista roottorin käämitysauvatyyppiä ja niiden hyötysuhde tulokset.

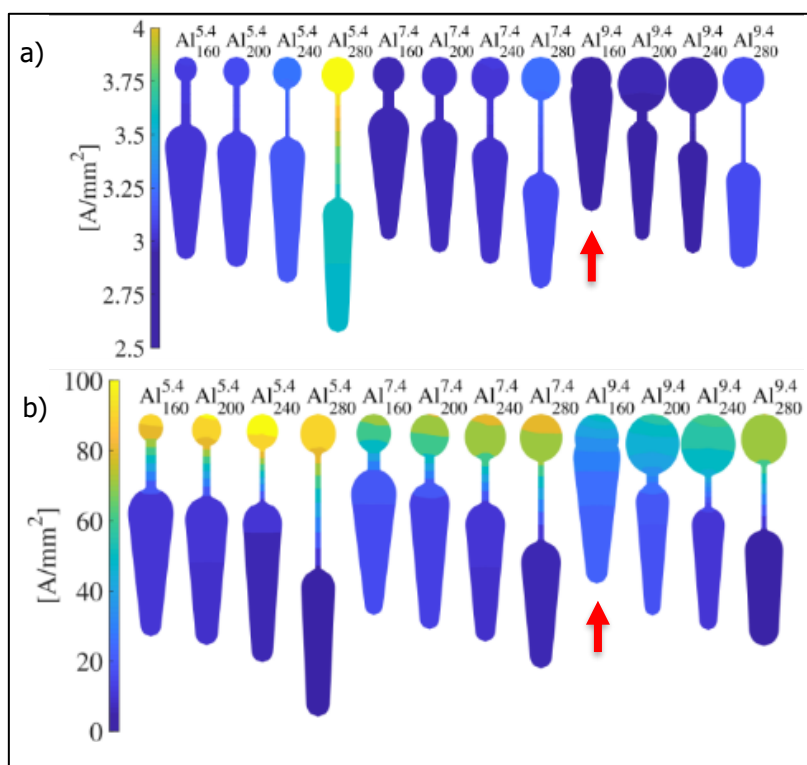


Kuva 15. Tutkimuksen erilaiset yhden häkin käämitysauva muodot (Maloman ym. 2017)

Tutkimuksessa esitettyjen tuloksien perusteella tyyppin 4 pisaramuotoisella käämitysauvalla saavutetaan paras hyötysuhde muihin sauvamuotoihin nähden. Tyyppin 4 käämitysauvalla oli toisaalta myös huonoin käynnistysmomentti muihin sauvarakenteisiin nähden. Käämitysauvan muodon optimointi on tästä syystä tärkeää, vaikka se on monimutkainen ja varsin tarkkaa testausta vaativa prosessi. Hyötysuhteen kannalta optimaalisin käämitysauvan muoto jakaa induktiovirran mahdollisimman tasaisesti koko sauvan pinta-alalle käyttäen samalla vähiten materiaalia sen teholuokan saavuttamiseksi. Lopullinen käämitysauvan muodon valinta jää laitevalmistajalle.

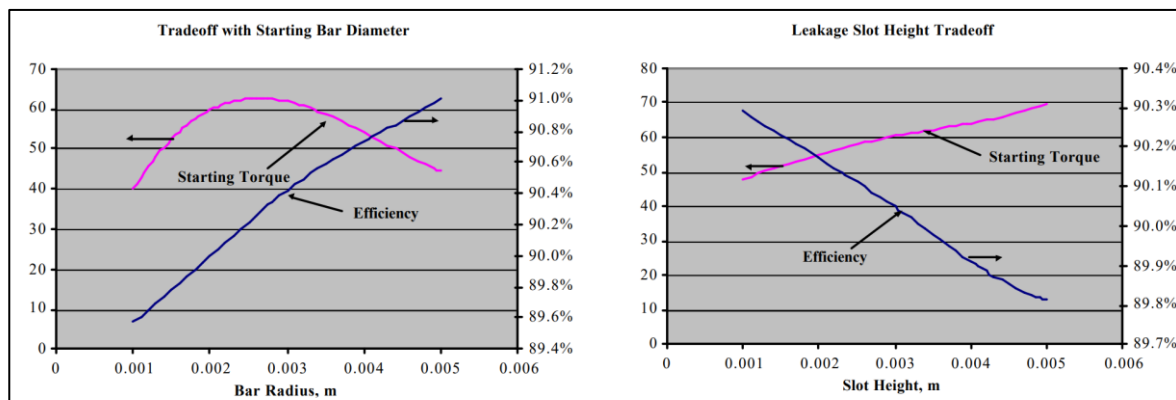
Yhden häkin käämitysrakenteen on hyvä valinta hyötysuhteen kannalta, mutta oikosulkumoottorilla on tällöin nimellis- ja käynnistysmomenttia rajallisesti. Jos oikosulkumoottorin momenttia halutaan parantaa pitämällä teholuokka samana, tulee sen roottori tehdä kaksoishäkkikäämityksellä. Yhden häkin käämitysrakenteeseen verrattuna sillä on toisaalta vaikeampi saavuttaa yhtä hyvä hyötysuhde, sillä kaksoishäkkikäämitys vaatii enemmän pinta-alaa ja muodon optimointia. Pidemmällä käämitys-

sauvalla pystyy muodostamaan korkeamman momentin, mutta samalla roottorin rautahäviöt kasvavat ja käämitysvirta jakaantuu koko sauvan pinta-alalle huonommin, joka vaikuttaa sen energiatehokkuuteen (Tong 2017, 86–88). Tästä oli Nardo ym. (2020) tehnyt tutkimuksen, jossa erilaisia kaksoishäkkikäimitys sauvamuotoja oli testattu nimellisessä toiminnassa ja käynnistystilanteessa. Virran jakautumisen visuaaliset mittaustulokset on esitetty kuvassa 16 erilaisille kaksoishäkkikäimitys sauvuille. Vasemman reunan värikartta indikoi, kuinka paljon virtaa kohdistuu sauvarakenteen eri kohtiin nimellisen toiminnan (a) ja käynnistystilanteen (b) aikana. Kaikkien erilaisten sauvamuotojen yläpuolella on merkintä niiden ominaisesta valmistusmateriaalista, käynnistysvirtakertoimesta ja tuotetusta käynnistysmomentista. Punaisella nuolella on merkitty vertailuksi enemmän yhden häkin käämitysrakennetta muistuttava käämityssauva.



Kuva 16. Tutkimuksen erilaisia kaksoishäkkikäimityssauvoja ja niiden virran jakautuminen (Nardo ym. 2020)

Mittaustuloksista voidaan todeta, että yhden häkin käämityssauvaan kohdistuva virta jakaantuu tasaisemmin sauvarakenteelle, kuin kaksoishäkkikäimityssauvojen tilanteessa. Parempi virran jakautuminen tarkoittaa parempaa hyötysuhdetta. Kuvasta on myös tärkeää huomata, kuinka pitkissä kaksoishäkkikäimityksissä käynnistysvirta ei jakaudu koko sauvarakenteelle tasaisesti, vaan kohdistuu enemmän sauvan yläosaan. Tämänkaltainen sauvarakenne heikentää käämityssauvojen elinikää ja energiatehokkuutta. Erillisessä Kirtleyn (2004) tekemässä tutkimuksessa oli todettu sama ilmiö ja hän esitti kaksoishäkkikäimityksen rakenteellisten muutoksien vaikutuksen hyötysuhteeseen seuraavalla kuvalla 17.



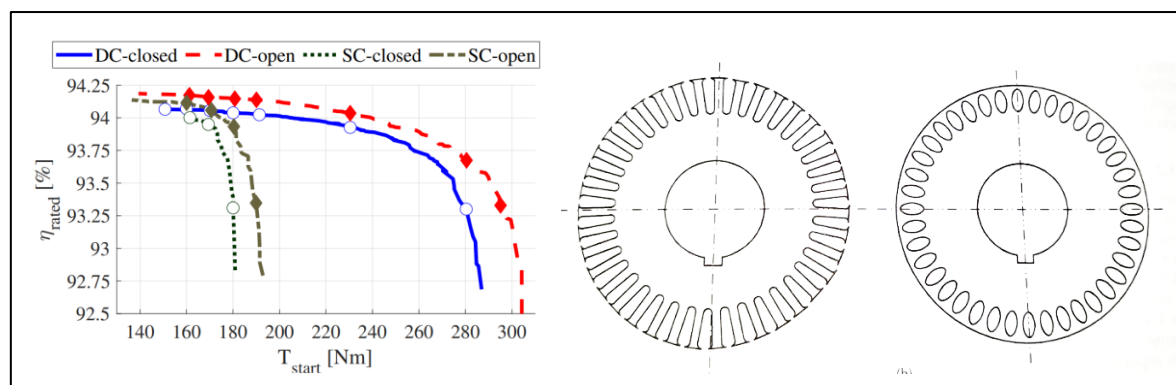
Kuva 17. Tutkimuksen kuvaajat kaksoishäkkikäännyssauvan muodon optimoimisesta hyötysuhteen kannalta (Kirtley 2004)

Tutkimustulokset osoittavat, että kaksoishäkkikäännyksen yläosan halkaisijaa kasvattamalla hyötysuhde kasvaa, mutta oikosulkumoottorin käynnistysmomentti lähtee laskuun tietyn halkaisijakoon saavutettua. Kaksoishäkkikäännyksen kaulan pituudella on myös vaikutus oikosulkumoottorin hyötysuhteeseen. Mitä lyhyempi on kaula ja mitä enemmän se muistuttaa yhden häkin käännyssauvan rakennetta, niin sitä parempi on käännyssauvan hyötysuhde.

Kaksoishäkkikäännyksiä käytetään kuitenkin siksi, että oikosulkumoottorin nimellis- ja käynnistysmomenttia saadaan sen avulla parannettua, vaikka käännyksen hyötysuhdetta uhrattaisiinkin samalla. Hyötysuhdetta on mahdollista parantaa muita oikosulkumoottorin osia optimoimalla, jolloin on mahdollista valmistaa saman teholuokan ja hyötysuhteen prosessimoottori, jolla on vain parempi nimellis- ja käynnistysmomentti (Tong 2017, 87). Esimerkiksi laitevalmistaja ABB myy erikseen Genelec- ja High-output-mallin prosessimoottoreita, joilla on samat hyötysuhde arvot, mutta erilaiset nimellis- ja käynnistysmomentit.

#### *Roottorin käännyksien muoto*

Roottorin sähkölevyt voivat olla käännyksuriltaan avonaisia, osittain suljettuja ja täysin suljettuja. Roottorin sähkölevyjen käännyksien muotoa optimoimalla pystyy saavuttamaan myös aavistuksen paremman hyötysuhteen. Kuvassa 18 on esitetty tietyn teholuokan oikosulkumoottorilla, kuinka kaksoishäkkikäännyksen (DC) ja yhden häkin käännyksen (SC) käynnistysmomentit ja hyötysuhde eroaa avonaisella ja suljetulla käännyksurilla rakenteella (Nardo ym. 2021).

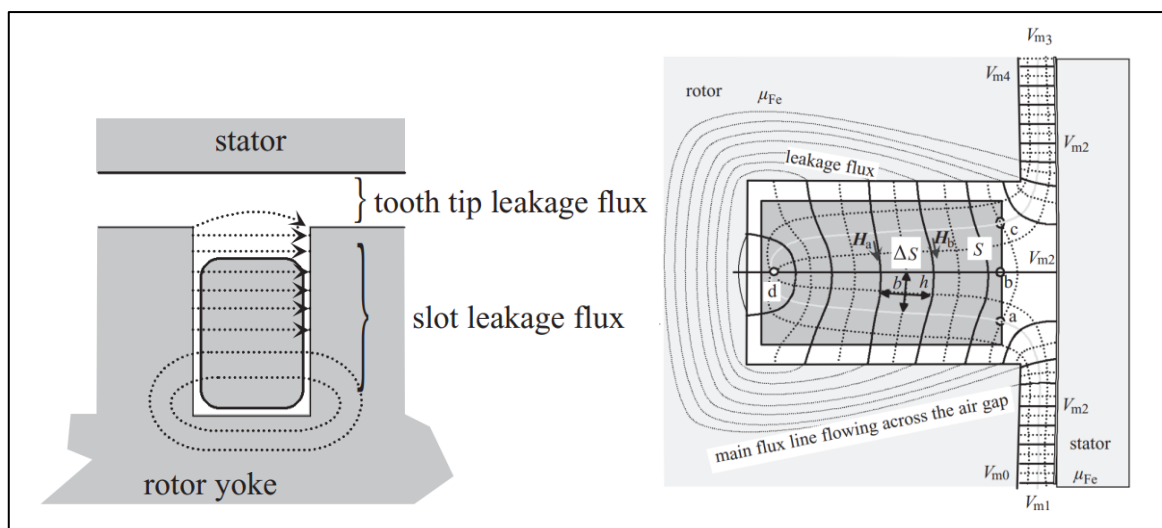


Kuva 18. Roottorin käännyksurien muodon vaikutus hyötysuhteeseen (Nardo ym. 2021) (Tong 2017, 85)

Tuloksista voidaan todeta, että yhden häkin käämitysrakenteessa ja kaksoishäkkikäämyksessä avonaisilla käämitysurilla on parannusta oikosulkumoottorin nimelliseen hyötysuhteeseen ja käynnistysmomenttiin. Tämä johtuu siitä, että käämitysurien avaaminen vähentää vuotovuon muodostumista ja sallii suuremman magneettisen voiman muodostumisen. Toisaalta oikosulkumoottorin käynnistysvirta kasvaa ja käämityssauvojen valmistus vaikeutuu. Tong (2017, 222) mukaan suljetut käämitysurat vähentävät taajuusmuuttajakäyttöjen aiheuttamia harmonisia yliaalto häviöitä roottorissa ja staattorissa. Näiden hyötyjen ja haittojen kompromissina on käytetty osittain suljettuja käämitysuria, jotka voivat tuoda tasapainoa ja monikäyttöisyyttä laitevalmistajille.

### Roottorikäämyksen hajavuo

Roottorin tehohäviöihin kuuluvat hajavuot staattorin tavoin. Hajavuoita ilmenee roottorin käämitysurien välillä ja ympärillä enemmän, kuin staattorissa sillä käämityssauvoja ei ole eristetty roottorin rautasydämmestä. Kuvassa 19 on esitetty hajavuon muodostuminen roottorin käämyksessä.



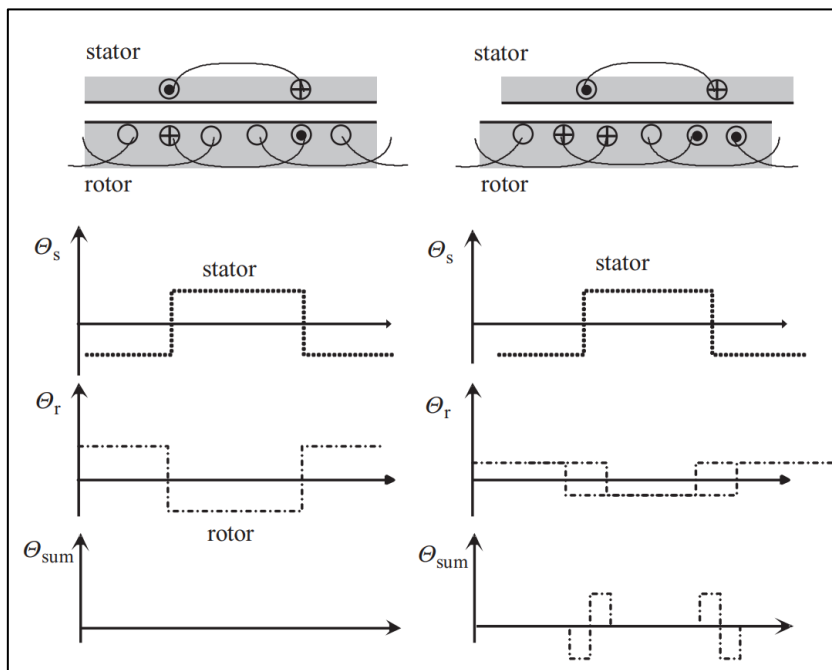
Kuva 19. Roottorikäämyksen urassa esiintyvä hajavuo (Pyrhönen ym. 2014, 23, 236)

Roottorin käämyksen hajareaktanssin laskemiseen käytetään samaa kaavaa 4, kuin staattorinkin osalta. Poikkeuksena tässä kaavassa käytetään roottorin suureita. Roottorin hajareaktanssi vaihetta kohti staattorin kulmataajuudella lasketaan kaavan 8 mukaisesti, jossa

$$X_{\sigma 2} = 2 \cdot \pi \cdot f \cdot \frac{N_2^2}{R_{\sigma 2}} = \omega \cdot L_{\sigma 2} \quad (8)$$

jossa,  $f$  on roottorin käämykseen kohdistuva taajuus,  $N_2$  roottorin vaihekäämi,  $R_{\sigma 2}$  roottorin hajavuon magneettipiirin reluktanssi ja  $L_{\sigma 2}$  roottorin hajainduktanssi. Hajareaktanssin muodostumista tulee roottorinkin tilanteessa minimoida, koska sillä on vaikutus oikosulkumoottorin lopulliseen hyötysuhteeseen (Aura & Tonteri 1996, 321).

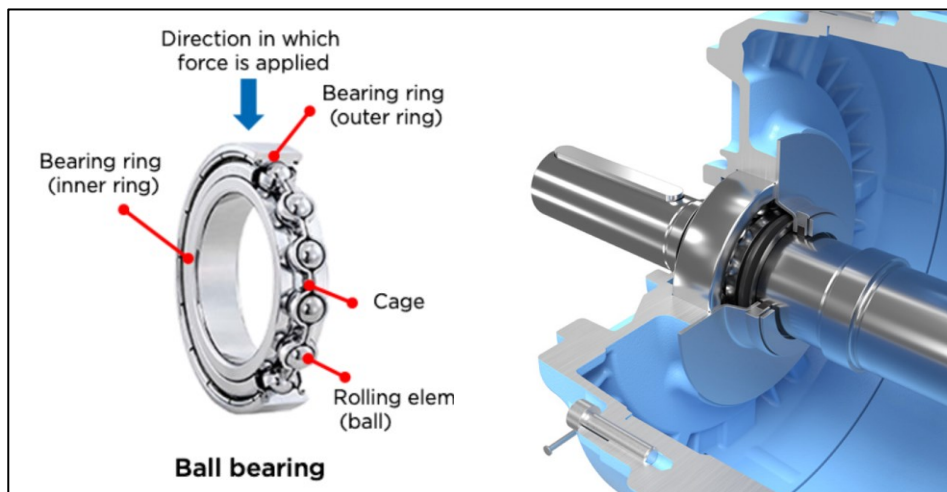
Staattorin ja roottorin välillä hajavuoto esiintyy myös silloin, kun pääosien käämityksen eivät ole linjassa toistensa suhteen. Tämän hajavuon esiintymistä ja mahdolliseen roottorin sähkömagneettinen lukkiutumiseen voi vaikuttaa suunnittelemalla roottorin sauvat hieman vinoon, jotta roottorin liike olisi mahdollisimman sujuvaa. Näin myös vähennetään oikosulkumoottorista muodostuvia harmonisia yliaaltoja (Pyrhönen ym. 2014, 239). Kuvasta 20 voi nähdä, kuinka hajavuota ei esiinny, kun käämitykset ovat linjassa ja kuinka sitä esiintyy, kun ne eivät ole linjassa toisiinsa nähden. Roottorin ja staattorin käämitysurien hajavuo vaikuttaa negatiivisesti oikosulkumoottorin käynnistysmomenttiin, tehokertoimeen ja hyötysuhteeseen (Nardo ym. 2021, 2).



Kuva 20. Pääosien käämityksien välillä esiintyvä hajavuo (Pyrhönen ym. 2014, 238)

#### 4.2.4 Kitka- ja ilmavastushäviöt

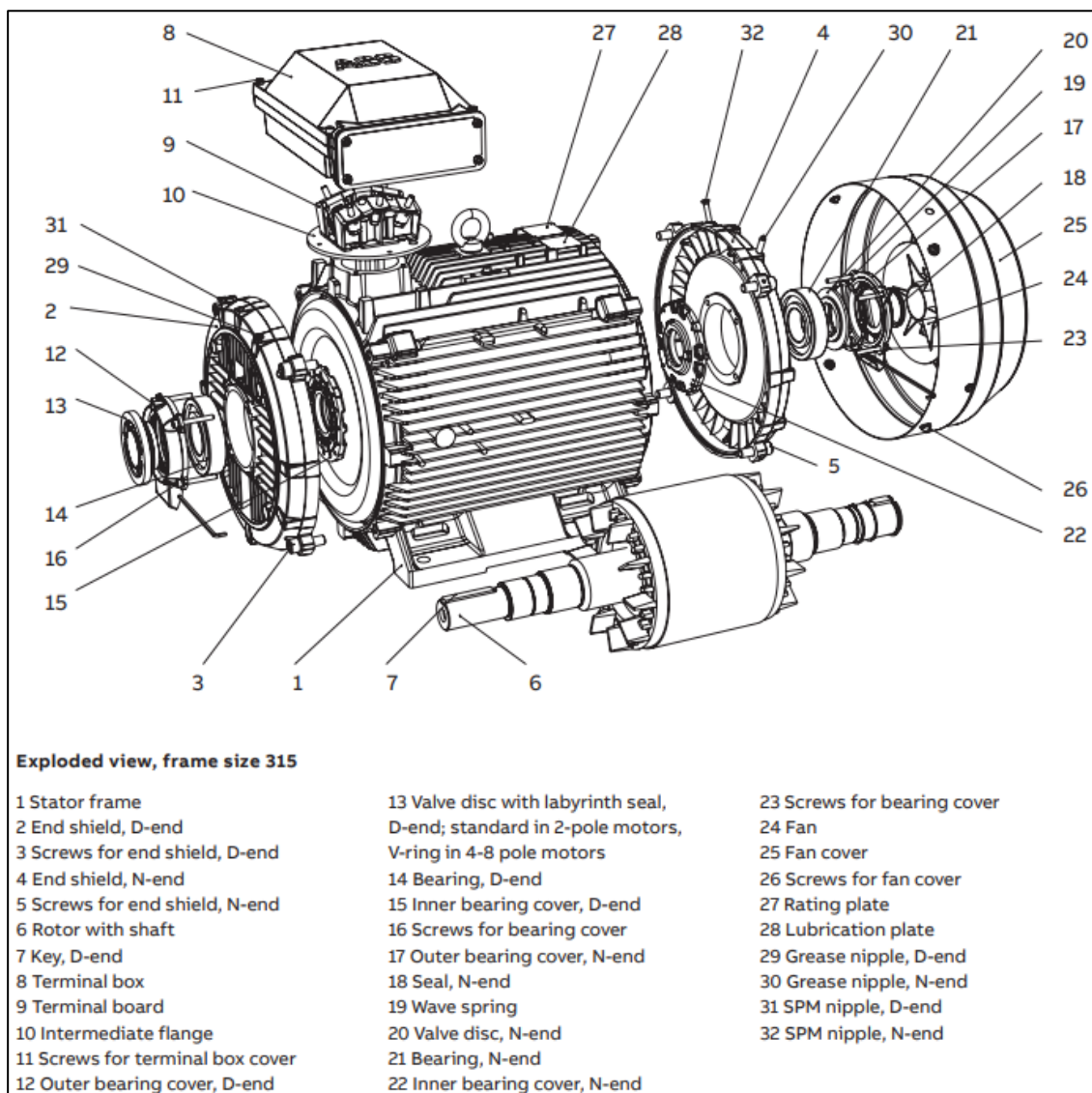
Oikosulkumoottorissa muodostuu kitkahäviöitä, kun kaksi moottorin osaa ovat kontaktissa toisiinsa. Kitkaa syntyy aina, kun nämä kosketuspinnat liikkuvat suhteessa toisiinsa, koska ne vastustavat näiden kappaleiden suhteellista liikettä. Oikosulkumoottorissa kitkahäviöitä ilmenee akselin kuula- tai rullalaakerissa. Ne eivät ole riippuvaisia oikosulkumoottorin kuormasta, vaan ne ovat suoraan verrannollisia akselin pyörimisnopeuteen. Sähkömoottoreissa pyritään valitsemaan aina sellainen laakeri, joka on suunniteltu tulevaan käyttöympäristöön ja jossa kitkaa syntyy mahdollisimman vähän. Kuvassa 21 on esitetty kuulalaakeri, sen osat ja siihen vaikuttavan voiman suunta, sekä sen sijainti sähkömoottorin D-päässä.



Kuva 21. Kuulalaakeri ja sen osat, sekä sijainti oikosulkumoottorin D-päässä (JTEKT 2024) (ABB 2024)

Laakerit ovat sähkömoottorin roottorille tärkeitä osia, jotka on suunniteltu minimoimaan kitkaa. Normaalikäytössä laakerin rullaelementit, kuten kuvan 21 mukaiset kuulat, tukevat pyöriviä osia ja liikkuvat sisä- ja ulkokehän välillä. Osien kontakti aiheuttaa, kuitenkin kitkavastuksen rullaelementtien ja kosketuspintojen välillä. Laakerin kitkavastukseen ja hyötysuhteeseen vaikuttaa monet tekijät, kuten sivuttaissuuntainen laakerikuorma, akselin pyörimisnopeus, laakerin koko, rullaelementtien ja sisä- ja ulkokehän karkeus, sekä voiteluaine ja sen määrä (Tong 2017, 381).

Oikosulkumoottorin akseliin kiinnitetty tuuletin aiheuttaa ilmavastushäviöitä käämityksen ilmavirtauksen ja täten viilennyksen parantamiseksi. Ilmavastushäviöitä voi syntyä myös oikosulkumoottorin rakenteissa epäoptimaalisen ilmavirtauksen tai roottorin siivekkeiden takia. Tuulettimen koolla, valmistus materiaalilla ja muodolla voi vaikuttaa ilmavastushäviöiden syntyyn ja täten kokonaishyötysuhteeseen (Tong 2017, 386, 402). Kuvassa 22 on esitetty ABB oikosulkumoottorin mekaanisia osia, kuten laakerit, tiivisteet ja ilmavastushäviöitä aiheuttavat tuulettimet.



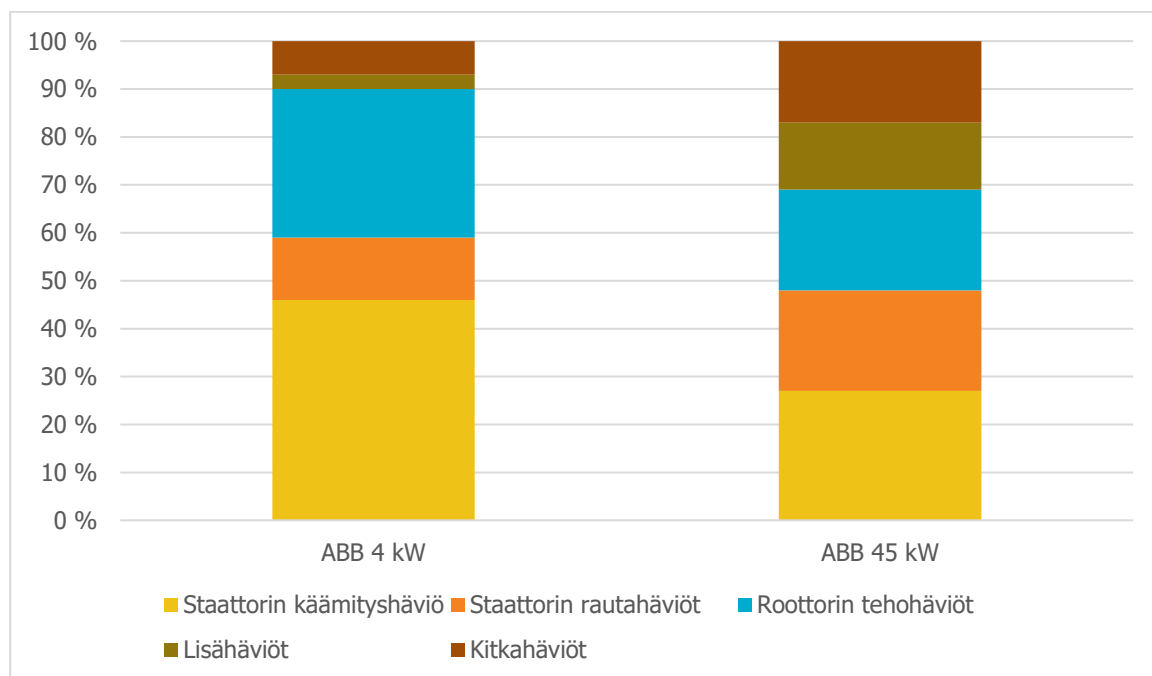
Kuva 22. ABB 315 runkoon oikosulkumoottori ja sen osat (ABB Library Download Center: hakusana Low voltage Process performance cast iron motors. Catalog 2024, 93)

### 4.3 Häviöjakauma

Oikosulkumoottoreiden hyötysuhteeseen vaikuttaa monet tekijät ja ne kattavat omat osuutensa moottorin kokonaishäviöjakaumasta. Tehohäviöiden määrä on riippuvainen oikosulkumoottorin teholuokasta niin, että mitä suurempi on teholuokka niin sitä parempi on moottorin hyötysuhde. Vertailaan tässä luvussa kahden eri teholuokan oikosulkumoottorin häviöjakaumaa toisiinsa.

Pyrhönen ja ym. (2014, 373) ovat esittäneet kirjassaan ABB valmistaman kaksinapaisen 4 kW oikosulkumoottorin häviöjakauman. Staattorin käämityshäviön osuus oli 46 %, staattorin rautahäviöt 13 %, roottorin tehohäviöt 31 %, lisähäviöt 3 %, ja kitkahäviöt 7 %.

Kujala (2020, 21) on taas esittänyt diplomityössään ABB valmistaman kaksinapaisen 45 kW oikosulkumoottorin häviöjakauman. Tässä häviöjakaumassa staattorihäviöiden osuus oli 27 %, rautahäviöiden 21 %, roottorihäviöiden 21 %, lisähäviöiden 14 % ja kitkahäviöiden 17 %.



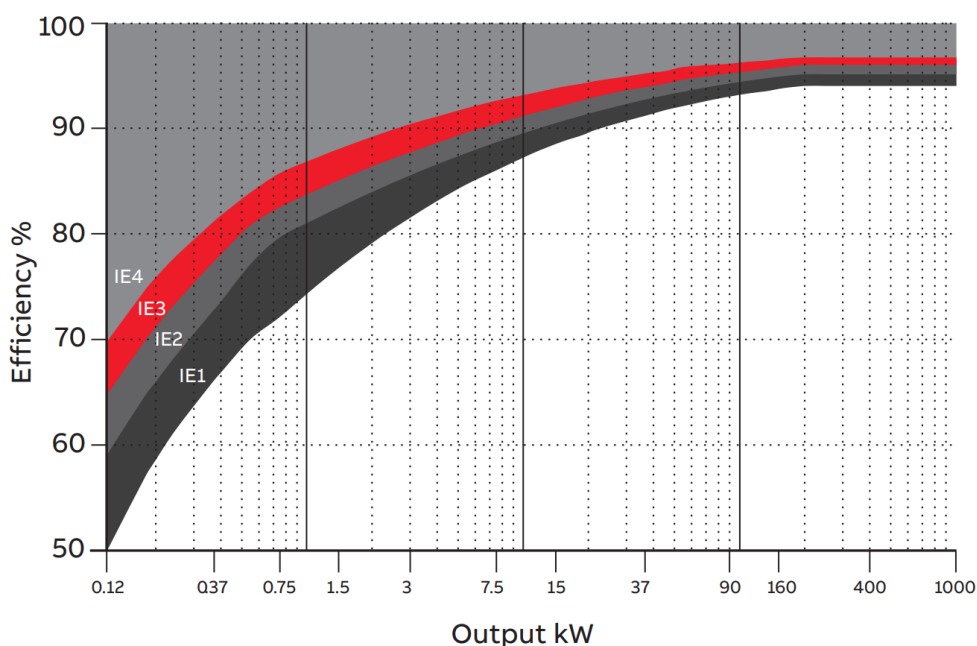
Kuva 23. Häviöjakaumien vertailu - ABB 4 kW ja 45 kW oikosulkumoottorit

Näiden häviöjakaumien vertailulla voidaan todeta, että alhaisemman teholuokan oikosulkumoottoreissa staattorin ja roottorin resistiiviset häviöt ovat enemmän häviöjakauman pääosassa, kuin korkean teholuokan oikosulkumoottoreissa. Rauta-, lisä- ja kitkahäviöiden osuus on kuitenkin suurempi korkeamman teholuokan oikosulkumoottoreissa. Kuvassa 24 on esitetty alkuperältään Auinger 1997 kehittämä graafinen kuvaaja häviökokonaisuuksista <100 kW teholuokissa.



Kuva 24. Häviöjakauman muutos nimellistehon suhteen (Pyrhönen ym. 2014, 381)

Kuvasta voidaan todeta, että staattorin käämityshäviöiden takia alhaisen teholuokan oikosulkumootoreissa on huonompi hyötysuhde. Teholuokan kasvaessa hyötysuhde paranee, kun staattorin käämityshäviöiden osuus häviöjakaumasta laskee. Lisä- ja mekaanisten häviöiden osalta voidaan huomata niiden kasvavan teholuokan kanssa. Tämä kuvaajan pätevyys nykyajan oikosulkumootoreihin voi olla kyseenalaistettavaa teknologian kehittymisen takia, mutta hyvän osviitan se antaa häviöjakauman muodostumisen puolesta eri teholuokissa. ABB on esittänyt heidän oikosulkumootoreidensa IE-hyötysuhdeluokitusten hyötysuhdelukemat eri teholuokissa kuvassa 25, josta voidaan todeta sama ilmiö, että teholuokan alentuessa hyötysuhde heikkenee kaikissa IE-luokituksissa.



Kuva 25. Nimelliset IE-luokkien hyötysuhde raja-arvot IEC 60034-30-1 mukaan (ABB Library Download Center: hakusana Motor starting and protection for premium-efficiency motors. 2023, 7)

#### 4.4 Rakenteelliset muutokset

Oikosulkumoottoreissa teholuokan kasvattamiseksi tai hyötysuhteen parantamiseksi on tilanteen mukaan tarpeellista tehdä rakenteellisia muutoksia oikosulkumoottorin rakenteisiin. Teholuokan kasvattamiseksi staattorin ja roottorin käämityksien pinta-alaa täytyy kasvattaa, joka aiheuttaa tilanteen mukaan pääosissa rakenteellista kasvua. Laitevalmistajista riippuen staattorin ja roottorin rakenteellinen kasvu voi tapahtua pääosien ympärysmittaa tai niiden pituutta kasvattamalla. Tämänlainen runkokoon muutos voi tapahtua myös oikosulkumoottorin hyötysuhteen parantamiseksi. Alla olevassa kaavassa 9 on esitetty oikosulkumoottorin hyötysuhteen ja rakenteellisten mittojen välinen yhteys

$$\eta = \frac{P_{out}}{1.11 \cdot B_{av} \cdot \pi \cdot D \cdot L \cdot 3 \cdot I_{ph} \cdot N_{ph} \cdot \frac{N_s}{60} \cdot Kw \cdot \cos \varphi \cdot 10^{-3}} \quad (9)$$

jossa  $\eta$  on oikosulkumoottorin hyötysuhde täydellä kuormalla,  $P_{out}$  oikosulkumoottorin lähtöteho,  $B_{av}$  keskimääräinen vuontiheys ilmapälissä,  $D$  staattorin halkaisija,  $L$  rautaytimien pituus,  $I_{ph}$  vaihevirta,  $N_{ph}$  käämityksien määrä vaihetta kohden,  $N_s$  pyörimisnopeus,  $Kw$  käämityskerroin ja  $\cos \varphi$  täyden kuorman tehokerroin (RCET 2024).

Laskukaavasta voidaan todeta, että teholuokan pysyessä samana yhtälön jakajina toimivien suureiden arvojen pienentyminen parantaa hyötysuhdetta. Ensisijaisesti oikosulkumoottorin käämitystä muuttamalla on pystytty parantamaan lopullista koneen hyötysuhdetta, kun virtahäviöt vähentyvät. Kun käämityshäviöt on minimoitu parhaan mukaan, on laitevalmistajien siirryttävä luovempiin ratkaisuihin energiatehokkuuden parantamiseksi. Tämä voi tarkoittaa staattorin ja roottorin rakenteellista kasvattamista tai fyysistä muutosta tehoiteyden parantamiseksi tai häviöiden minimoimiseksi. Samalla tavalla oikosulkumoottoreiden rakennetta optimoidaan, kun lähtötehoa, eli teholuokitusta on haluttu parantaa.

Esimerkiksi, laitevalmistajan ABB prosessikäyttöön tarkoitetuissa valurautarunkoisissa oikosulkumoottoreissa tapahtuu rakenteellisia muutoksia teho- ja hyötysuhdeluokkien välillä. Teho- ja hyötysuhdeluokasta riippuen ABB on saavuttanut niiden parannukset, joko pidentämällä tai kokonaan suurentamalla nykyistä staattori- ja roottoripakettia. Laitevalmistaja ZENZER (2024) oli julkaisussaan kertonut, että heidän sähkömoottoreissa IE4-hyötysuhdeluokka on saavutettu lisäämällä moottoreiden kuparikäämityksiä, jolloin vastaavasti moottorin kokoa on myös kasvatettu.

Uuden staattoripakan myötä sähkömoottoreiden välillä tapahtuu IEC-tunnuksen puolesta muutoksia joko staattori- ja roottoripaketin kirjainkoodin, moottorin pituusluokan tai runkokoon yhteydessä. Vähintään yksi näistä on muuttunut, kun prosessimoottori on saavuttanut IE4-hyötysuhdeluokan. IEC-tunnuksen perusteella pystyy kertomaan teholuokan lisäksi prosessimoottorin runkokoon, eli akselinkorkeuden maasta millimetreinä, moottorin rungon pituusluokan ja staattori- ja roottoripakan koon. Taulukossa 3 on esitetty, mitä IEC-tunnuksen tyyppikoodi pitää sisällään ja miten ne voivat vaihdella.

Taulukko 3. ABB sähkömoottorin IEC-tunnuksen muodostuminen

Explanation of IEC-code						
Output power	Motor type	Motor size	No. Poles	Efficiency class		
<b>200</b>	<b>M3BP</b>	<b>355 SMA</b>	<b>4</b>	<b>IE4</b>		
<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3 4 5</b>	<b>6</b>	<b>7</b>		

Position 1		Position 2		Position 5	
Standard Output kW values		All ABB Motor Desing Types		All Motor Stator and Rotor Pack Length	
0.12	55	M2BAX	General Performance Cast Iron Motor	A	Shortest
0.18	75	M2JA	Flameproof Performance Motor for ATEX	B	-
0.20	90	M3AA	Process Performance Aluminium Motor	C	-
0.25	110	M3AL	IE5 Synchronous Reluctance Motor	D	Longest
0.37	132	M3BP	Process Performance Cast Iron Motor		
0.40	160	M3BR	Roller Table Motor		
0.55	200	M3FT	High Dynamic Performance Motor		
0.75	250	M3JM	Flameproof Performance Mining Motor		
1.1	315	M3LP	Water-cooled Performance Motor		
1.5	355	S2BAX	Smoke Extraction Performance Motor		
2.2	400				
3	450				
4	500				
5.5	560				
7.5	630				
11	700				
15	710				
18.5	800				
22	900				
30	950				
37	1000				
45					

Position 3		Position 4	
Standard IEC Motor Sizes		All Motor Length Classes	
71	225	SM	Small to Medium -mounting points
80	250	ML	Medium to Long -mounting points
90	280	L	Only long -mounting points
100	315		
112	355		
132	400		
160	450		
180	500		
200			

Position 6		Position 7	
Nominal Motor Speeds		All IEC Standard's Efficiency Classes	
2	3000 RPM	IE2	Worst
4	1500 RPM	IE3	-
6	1000 RPM	IE4	-
8	750 RPM	IE5	Best

Taulukosta voidaan nähdä, että ABB sähkömoottoreille on olemassa neljä erilaista staattori- ja roottoripakan kokoa, kolme erilaista pituusluokkaa ja ainakin 17 erilaista runkokokoa. IEC-tunnuksesta staattori- ja roottoripakan muutoksen voi huomata taulukon 3 kohdan 5 muutoksesta, pituusluokan muutoksen kohdasta 4 ja runkokoon muutoksen kohdasta 3. Runkokoon tunnus kertoo myös suoraan, kuinka monta millimetriä sähkömoottorin akseli on koroltaan maasta. Sähkömoottorin eri teho- ja hyötysuhdeluokkien välillä voi tapahtua muutoksia näiden kolmen tekijän kanssa. Taulukossa 4 on esitetty, kuinka eri teholuokkien välillä oikosulkumoottorin runkokoko pysyy samana, mutta staattoripakka ja pituusluokka vaihtelee.

Taulukko 4. ABB M3BP-sarjan 200–500 kW prosessimoottoreiden sama runkokoko (ABB Library Download Center: hakusana Low voltage Process performance cast iron motors. Catalog 2024, 20)

IP 55 - IC 411 - Insulation class F, temperature rise class B IE4 efficiency class according to IEC 60034-30-1; 2014																
Output kW	Motor type	Product code	Speed r/min	Efficiency IEC 60034-30-1; 2014			Power factor Cos φ	Current		Torque			Moment of inertia J = 1/4 GD <sub>2</sub> kgm <sub>2</sub>	Weight kg	Sound pressure Level L <sub>PA</sub> dB	
				Full load 100%	>3/4 load 75%	1/2 load 50%		I <sub>n</sub> A	I <sub>v</sub> /I <sub>n</sub>	T <sub>N</sub> Nm	T <sub>v</sub> /T <sub>N</sub>	T <sub>b</sub> /T <sub>N</sub>				
1500 r/min = 4 poles			400 V 50 Hz				CENELEC-design									
75	M3BP 280SMC 4	3GBP282230---M	1487	96.0	96.4	96.1	0.86	130	7.8	481	2.8	2.9	1.85	725	72	
90	M3BP 280MLA 4	3GBP282410---M	1489	96.1	96.5	96.4	0.85	160	8.8	577	3.4	3.2	2.3	840	72	
110	M3BP 315SMC 4	3GBP312230---M	1491	96.3	96.5	96.1	0.85	194	7.8	704	2.4	3.1	2.9	1000	68	
132	M3BP 315SMD 4	3GBP312240---M	1490	96.4	96.6	96.2	0.85	234	7.9	846	2.6	3.2	3.2	1065	68	
160	M3BP 315MLB 4	3GBP312420---M	1490	96.6	96.8	96.4	0.86	278	7.9	1026	2.7	3.0	3.9	1220	68	
200	M3BP 315LKB 4	3GBP312820---M	1490	96.7	96.9	96.8	0.87	346	7.6	1282	2.5	2.9	5	1480	74	
200	M3BP 355SMA 4	3GBP352210---M	1491	96.7	96.8	96.4	0.87	345	7.3	1282	2.1	2.7	5.9	1610	74	
250	M3BP 355SMB 4	3GBP352220---M	1491	96.7	96.8	96.5	0.87	433	7.8	1601	2.5	2.9	6.9	1780	74	
315	M3BP 355SMC 4	3GBP352230---M	1490	96.7	96.8	96.5	0.86	554	7.4	2017	2.8	2.9	7.2	1820	74	
355	M3BP 355MLA 4	3GBP352410---M	1491	96.7	96.9	96.5	0.87	616	7.9	2274	2.7	2.9	8.4	2140	78	
400	M3BP 355MLB 4	3GBP352420---M	1490	96.7	96.7	96.3	0.85	700	6.8	2563	2.1	2.8	8.4	2140	78	
450	M3BP 355MLC 4	3GBP352430---M	1489	96.7	96.7	96.5	0.86	779	6.8	2886	2.4	2.8	8.4	2140	78	
500	M3BP 355LKA 4	3GBP352810---M	1490	96.7	96.7	96.1	0.86	865	6.8	3204	2.0	3.0	10	2500	78	
560	<sup>3)</sup> M3BP 400LA 4	3GBP402510---M	1491	96.7	96.7	96.3	0.85	982	7.4	3586	2.4	2.8	15	3200	78	

Taulukosta voidaan nähdä, kuinka teholuokkien 200–500 kW välillä oikosulkumoottorin runkokoko pysyy samana, mutta staattori- ja roottoripakan pituus kasvaa tai rungon pituusluokka muuttuu ko-koa suuremmaksi. Yleiseltä kannalta teholuokkien välillä on odotettavissa oikosulkumoottorin raken-teellisiä koko muutoksia, mutta niitä voi myös esiintyä hyötysuhdeluokkien välillä.

## 5 ENERGIATEHOKKUUSVAATIMUKSEN VAIKUTUS TEOLLISUUDEN KUNNOSSAPIDOSSA

Energiansäästöjen maksimoimiseksi ja uuden IE4-energiatehokkuusvaatimuksen myötä teollisuudessa on aloitettu lisäämään IE4-hyötysuhdeluokan oikosulkumoottoreita, jotka ovat energiatehokkaampia ja kestävämpiä. Nykyään uusissa projekteissa aina valitaan vähintään IE4-hyötysuhdeluokallinen moottori, jos vain halutulla teholuokalla sellainen on saatavilla. Kunnossapidossa aloitetaan myös prosessimootoreiden päivittäminen IE4-hyötysuhdeluokalliseksi, kun vähemmän energiatehokkaat prosessimootorit vikaantuvat tai ovat vaihtosuunnitelmassa. Viimeisimmässä sähkömoottoreiden käyttöön vaikuttavassa komission asetuksessa 2019/1781 ei ole erikseen vaadittu, ettei jo hankittuja IE3 tai IE2 oikosulkumoottoreita saisi käyttää jo olemassa olevissa kohteissa. Tämän tarkoituksena on ollut se, että IE4-hyötysuhdeluokallisiin oikosulkumoottoreihin siirtyminen tapahtuisi hallitusti.

### 5.1 Kunnossapidossa ilmennyt ongelma

Uusien vähimmäisvaatimusten käyttöönoton myötä on kunnossapidossa kuitenkin huomattu, että esimerkiksi ABB M3BP-sarjan valurautaisissa prosessikäyttöön tarkoitetuissa oikosulkumoottoreissa tapahtuu rakenteellisia muutoksia IE4-hyötysuhdeluokkaan siirtyessä teholuokan pysyessä samana. ABB on kertonut IE3/IE4 markkinointiedotteessaan, että tämä uusi ja parempi hyötysuhdeluokka IE4 on saavutettu uuden innovatiivisen oikosulkumoottorin muotoilun ja parempien johtavien materiaalien ansioista (ABB 2024). Innovatiivisista rakenne muutoksista ei ole kerrottu julkisuuteen sen enempää, mutta IE4 ja IE3 prosessimootoreiden IEC-tunnuksia tarkkailemalla ja vertailemalla tulee ilmi, että IE4-hyötysuhdeluokallisissa prosessimootoreissa staattori- ja roottoripakka on muuttunut kokoa isommaksi. Tämä staattori- ja roottoripakan muutos voi vaikuttaa tietyissä teholuokissa prosessimootorin runkoon rakenteellisesti. ABB on kehittänyt ja valmistanut monia erilaisia ja eri tarkoituksiin tarkoitettuja sähkömoottoreita ja näin ollen on vain ajan kysymys, kun IE4-hyötysuhdeluokan saavuttamiseksi täytyy tehdä rakenteellisia muutoksia sähkömoottoreihin.

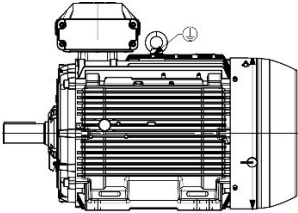
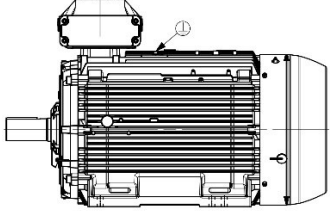
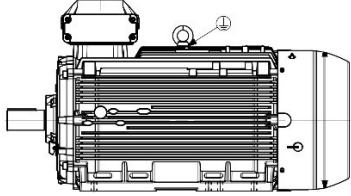
Asiasta kysyttiin myös ABB Pohjois-Savon aluemyyntipäälliköltä ja haastattelussa tuli ilmi, että runkokoon muutos IE3 ja IE4 moottoreiden välillä johtuu tosiaan uudesta staattori- ja roottoripakasta, joka on kokonaismitaltaan pitempi. Uusi staattoripakka ei vain enää mahdu vanhoihin runkoihin. IE4 prosessimootoreissa on mahdollista, että prosessimootorin runko tai sen pituusluokka vaihtuu kokoa suuremmaksi alemman hyötysuhdeluokan prosessimootoreihin verrattuna (Syrjälä 2024).

Runkokoon tai pituusluokan muutos vaikuttaa sähkömoottorin kokonaismittoihin, joka taas voi aiheuttaa prosessilaitteiden kunnossapidon puolesta ongelmia. Pelkkä IEC-tunnuksen mukainen staattori- ja roottoripakan kasvu ei aiheuta moottorin mittoihin muutoksia, ellei se ole jo maksimikokoa. Tässä tilanteessa prosessimootorin pituusluokka vaihtuu herkästi pidempään malliin tai moottorin runko vaihdetaan suoraan kokoa suuremmaksi.

Erilaisia IEC-tunnus variaatioita pelkästään M3BP-sarjalle on satoja, joten väistämättä tietyissä teholuokissa prosessimootorin runkoon ei enää mahdu isompaa staattori- ja roottoripakkaa, jolloin

moottorin pituusluokka tai runkokoko vaihtuu. Alla olevassa taulukossa 5 on esitetty kolme esimerkkiä prosessimoottorista, joissa tapahtuu rakenteellisia muutoksia saavutettuaan IE4-hyötysuhdeluokan. Kuvan oikealla puolella on myös esitetty mittakuvat sähkömoottoreiden erilaisista pituusluokista. Näiden esimerkkien teholuokista voidaan myös huomata, että kyseiset sähkömoottorit ovat uuden energiatehokkuusvaatimuksen alaisia.

Taulukko 5. Kolme esimerkkiä prosessimoottorista, joissa tapahtuu rakenteellisia muutoksia saavutettuaan IE4-hyötysuhdeluokan, sekä prosessimoottoreiden pituusluokat esitettynä.

ERILAISIA HYÖTYSUHDELUOKKIJEN VÄLILLÄ ILMEENTYVIÄ RAKENTEELLISIA MUUTOKSIA								
a)	Vanha	200kW	400V D 50Hz	IE3	B3	355 SMB	1000 RPM	 SM_
	Uusi	200kW	400V D 50Hz	IE4	B3	355 SMC	1000 RPM	
↑ Staattori- ja roottoripakka suurempi								
b)	Vanha	132kW	400V D 50Hz	IE3	B3	315 MLB	1000 RPM	 ML_
	Uusi	132kW	400V D 50Hz	IE4	B3	315 LKA	1000 RPM	
↑ Sama runko, mutta pituusluokka suurempi								
c)	Vanha	75kW	400V D 50Hz	IE2	B3	250 SMB	1500 RPM	 L_
	Uusi	75kW	400V D 50Hz	IE4	B3	280 SMC	1500 RPM	
↑ Runko vaihtuu täysin kokoa suuremmaksi								

Nämä taulukon 5 prosessimoottorit ovat ABB M3BP-sarjaa, neli- tai kuusinapaisia ja käyttöjännitteellä 400/690V. Kohdan a) tilanteessa voidaan todeta, että teholuokan 200 kW prosessimoottorin staattori- ja roottoripakka on kokoa suurempi hyötysuhdeluokassa IE4, kuin IE3. Kohdassa b) 132 kW prosessimoottorin pituusluokka vaihtuu IE3- ja IE4-hyötysuhdeluokkien välillä kokoa suuremmaksi. Kohdassa c) sen sijaan 75 kW prosessimoottorin runkokoko vaihtuu kokonaan kokoa suurempaan IE2- ja IE4-hyötysuhdeluokkien välillä. Pituusluokan ja runkokoon vaihtumisella on vaikutus prosessimoottorin mittoihin. Verrataan seuraavaksi näiden prosessimoottoreiden kokonaismittojen toisiinsa ja havainnoidaan, miten prosessimoottoreiden mitat todellisuudessa muuttuvat. Taulukossa 6 on toteutettu näiden esimerkki prosessimoottoreiden mittakuvien vertailu ja esitetty M3BP-sarjan prosessimoottoreiden mittakuvapiirros kirjainkoodeineen.

Taulukko 6. Kolmen esimerkin prosessimoottoreiden mittatiedot ja M3BP-sarjan prosessimoottoreiden mittakuvapiirros kirjainkoodeineen

PROSESSIMOOTTOREIDEN MITOISSA TAPAHTUVIA MUUTOKSIA HYÖTYSUHDELUOKKIEEN VÄLILLÄ												
	H		D		GA		F		E		L max	
	2-8	2	4-8	2	4-8	2	4-8	2	4-8	2	4-8	
a)	Motor size	2-8	2	4-8	2	4-8	2	4-8	2	4-8	2	4-8
	200 kW; IE3; 355 SMB	355	70	100	74,5	106	20	28	140	210	1409	1479
	200 kW; IE4; 355 SMC	355	70	100	74,5	106	20	28	140	210	1409	1479
	Muutos	0 mm	0 mm	0 mm	0 mm	0 mm	0 mm	0 mm	0 mm	0 mm	0 mm	0 mm
b)	132 kW; IE3; 315 MLB	315	65	90	69	95	18	25	140	170	1285	1315
	132kW; IE4; 315 LKA	315	65	90	69	95	18	25	140	170	1491	1521
	Muutos	0 mm	0 mm	0 mm	0 mm	0 mm	0 mm	0 mm	0 mm	0 mm	+ 206 mm	+ 206 mm
c)	75 kW; IE2; 250 SMB	250	60	65	64	69	18	18	140	140	884	884
	75 kW; IE4; 280 SMC	280	65	75	69	79,5	18	20	140	140	1088	1088
	Muutos	+ 30 mm	+ 5 mm	+ 10 mm	+ 5 mm	+ 10,5 mm	0 mm	+ 2 mm	0 mm	0 mm	+ 204 mm	+ 204 mm

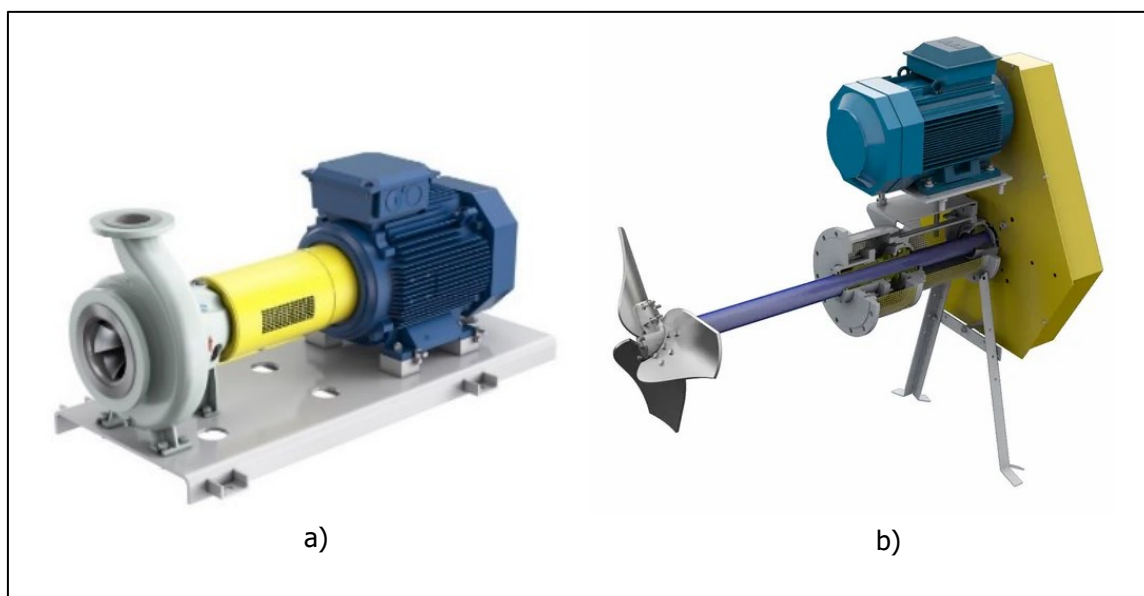
	A	B	B1	C	HD1)	HD2)	K	M	N	P	S	
	a)	200 kW; IE3; 355 SMB	610	500	560	254	958	-	35	740	680	800
	200 kW; IE4; 355 SMC	610	500	560	254	958	-	35	740	680	800	23
	Muutos	0 mm	0 mm	0 mm	0 mm	0 mm	-	0 mm	0 mm	0 mm	0 mm	0 mm
b)	132 kW; IE3; 315 MLB	508	457	508	216	852	-	30	600	550	660	23
	132kW; IE4; 315 LKA	508	508	560	216	880	-	28	600	550	660	23
	Muutos	0 mm	+ 51 mm	+ 52 mm	0 mm	+ 28 mm	-	-2 mm	0 mm	0 mm	0 mm	0 mm
c)	75 kW; IE2; 250 SMB	406	311	349	168	626	-	24	500	450	550	19
	75 kW; IE4; 280 SMC	457	368	419	190	762	-	24	500	450	550	18
	Muutos	+ 51 mm	+ 57 mm	+ 70 mm	+ 22 mm	+ 136 mm	-	0 mm	0 mm	0 mm	0 mm	-1 mm

Taulukosta 6 voidaan todeta, että kohdan a) tilanteessa, jossa pelkkä staattori- ja roottoripakka muuttuu, ei prosessimoottoreiden välillä tapahdu kokonaismittojen suhteen muutosta. Kohdan b) tilanteessa pituusluokan muutos vaikuttaa eniten moottorin kokonaispituuteen (L) ja tätä kautta sen kiinnitysväleihin (B&B1). Kohdan c) tilanteessa runkoon muutos vaikuttaa melkein kaikkiin prosessimoottorin mittoihin, jonka takia prosessimoottoreiden vaihto ei mene aina yksi yhteen, vaan työ vaatii tarkempaa suunnittelua. Työkohteesta riippuen, jos prosessimoottorin runkoon vaihtuminen huomataan yllättäen vasta moottorin vaihdon yhteydessä, niin voi se pitkittää suunniteltua kunnossapitotyötä paljonkin. Prosessiteollisuudessa sähkömoottorit voivat olla myös erittäin kriittisiä prosessin kannalta ja pidempi laitteiston pysäytys voi aiheuttaa pahimmassa tilanteessa tehtaan alasajon.

Prosessimoottoreiden runkoon muutos aiheuttaa eniten ongelmia kunnossapidon puolesta, sillä tällöin muuttuu myös akselin korkeus maasta -mitta (H). Tämän mitan kasvaessa jalkamoottoria pitää saada joko laskettua alemmas, jotta akseli saadaan kytkettyä prosessilaitteeseen tai itse prosessilaitetta täytyy nostaa alkuperäisestä korosta H-mitan verran korkeammalla. Kuvan 26 kohdassa a) on esimerkki prosessilaitteesta, jossa on jalkamoottori. Asennusalustan joustavuuden puuttuessa täytyy prosessimoottorin koron laskemiseksi tehdä petimuutoksia, joka vie merkittävän määrän enemmän aikaa, kun yksi yhteen asennuksessa. Toisena tapa adaptoida uuteen akselin korkeuteen

on nostaa itse prosessilaitetta, kuten pumppua korkeammalla. Tämä toimintatapa vaatii myös joustavuutta laitteiston ja putkiston kannalta, jotta tässä voisi onnistua. Yleensä vähemmän työlääksi on todettu tehdä muutoksia prosessimoottorin koron suhteen ja asentaa esimerkiksi tulevia akselin korkeus muutoksia varten joustavuutta antavat asennusalustat. Kuvan 26 kohdan b) kiilahihnakäytössä ja muissa sen kaltaisissa hihnakäytöissä runkokoon muutos voi aiheuttaa tilannekohtaisesti kiilahihnojen ja kiilahihnapyörän vaihdon. H-mitan muutoksella voi olla vaikutusta kiilahihnan kireyteen ja akselin mittojen muutoksella kiilahihnapyörän kokoon. Tärkein asia on se, että sähkömoottorin ja prosessilaitteen välityssuhde pysyy samana muutoksien myötä. Kiilahihnapyörien ja kiilahihnojen mitoituksessa on syytä kiinnittää huomiota prosessimoottorin akselia tukevaan rullalaakeriin ja tarkistaa sen sivuttaissuuntaisen voiman kestoisuuden.



Kuva 26. Kaksi prosessilaittekohtetta, a) jalkamoottori, kytkin ja pumppu, b) jalkamoottori, kiilahihnakäyttö ja sekoittaja (FLOWTECH 2024)

Jalkamoottoreissa runkokoon tai pituusluokan muutos aiheuttaa myös prosessimoottorin kiinnityksen ja tilankäytön puolesta ongelmia. Prosessimoottorin pituuden muuttuessa myös kiinnityspisteet muuttuvat, jolloin alustamuutoksia tai petimuutoksia on usein tehtävä. Laippamoottoreissa pituusluokan muuttumisella ei ole muita vaikutuksia, kuin rungon kokonaispituuden pidentyminen. Runkokoon muutos voi taas aiheuttaa tilannekohtaisesti prosessimoottorin kiinnityspisteiden välisen halkaisijan kasvun, jonka takia prosessilaitteeseen täytyy tehdä sopivia mekaanisia muutoksia uuden prosessimoottorin kiinnittämiseksi. Akselin halkaisija, pituus ja kiila on myös tilannekohtaisesti kasvanut kooltaan, jolloin prosessimoottorin akseliin kytketty holkki tai kytkin on täytynyt vaihtaa sopivampaan. Satunnaisesti IE4-hyötysuhdeluokan prosessimoottoreissa on myös ilmennyt laitevalmistajien tuotannollisista syistä muutoksia jalka- ja laippamoottorin kiinnitysreikien halkaisijan suhteen. Tämänkaltaisten mittamuutoksien takia kunnossapitosuunnittelijan täytyy olla tarkkaavainen prosessimoottoreiden vaihtosuunnitelmaa tehdessä.

## 5.2 Tutkimuskohteet ja -tulokset

Yara Suomi Oy konsernin Siilinjärven toimipaikalla on pelkästään yli 3000 prosessimoottoria. Kyseiset prosessimoottorit ovat erilaisia teho- tai kokoluokiltaan. Uuden IE4-vähimmäisvaatimuksen myötä on tullut tarve tarkistaa ja selvittää,

- Mitä tulee ottaa huomioon, kun nykyisiä 75-200 kW teholuokan  $\leq$  IE3-hyötysuhdeluokan prosessimoottoreita päivitetään IE4-hyötysuhdeluokallisiksi?
- Kuinka moneen Yara Siilinjärven toimipaikan prosessilaitekohteeseen vaikuttaa tämä vähimmäisvaatimus?

### 5.2.1 Varastonimikkeet

Yara Suomi Oy käyttää SAP-toiminnanohjausjärjestelmää yhtenä liiketoimintaprosessin hallintakeinoja. Yksi sadoista SAP-järjestelmän hyödyistä on se, että suurin osa toimipaikan sähkömoottoreista on linkitetty positioiden alle, eli jokaisella sähkömoottorilla on prosessilaitekohtainen tekninen nimitys. Jos tietyn teho- ja kokoluokan sähkömoottoreita on paljon, niin sille on luotu varastonimike, jonka avulla kunnossapitoa on pystytty tehostamaan. Kaikki toimipaikan sähkömoottorit eivät kuitenkaan ole linkitetty SAP:iin, joka tekee ennakoinnista hankalaa. Toimipaikalla on käytössä yhteensä 206 varastonimikettä, eri teho- ja kokoluokan, sekä pyörimisnopeuden prosessimoottoreille.

Tämän työn suorittamiseksi nämä varastonimikkeet lajiteltiin ja listattiin Exceeliin niin, että jokaisen varastonimikkeen viereen oli lueteltu prosessimoottorin tiedossa olevat tekniset tiedot. Näille kaikille prosessimoottoreille valittiin vaihtomoottorit käyttäen ABB:n Optimizer-palvelua, joka pystyy tarjoamaan lähtökriteereiden perusteella sopivan prosessimoottorin nykyisen tilalle. Optimizeriin pystyy asettamaan yhdeksi kriteeriksi oman MEPS:in, joka ottaa vaihtomoottorin valinnassa huomioon aluekohtaisen ekodirektiivin ja niiden vähimmäisvaatimukset. Muita mahdollisia lähtökriteereitä ovat hyötysuhdeluokka, rungon materiaali, moottorin lajimerkki, käyttöjännite, taajuus, nopeus ja teholuokka.



Data updated on 2024-03-22

News: FIXED DOWNLOADING ZIP. Cost of ownership comp. proj.

Clear saved data

Language

Contact us

**Find motors**

MEPS (Required) ? Efficiency class Frame mat. Motor range Hide Outside MEPS

EU - MEPS > IE2 and above > Cast Iron > Process Performance > No

Voltage Frequency Speed Output

400V > 50Hz > 4 pole > 75 **RESET FILTERS**

Find by product code or motor type

Product code / motor type  
e.g. M3BP2805MA / 3GBP282210

Input the product code to quickly find the motor you are looking for.

Output	Volt./Hz	Eff. class	Type	Product code	Speed	Data	Type of protection
75kW	400V Y 50Hz	IE4	M3BP 2805MC 4	3GBP282230-M	4		<b>ADD</b>
75kW	400V D 50Hz	IE4	M3BP 2805MC 4	3GBP282230-M	4		<b>ADD</b>

A total of 2 motors found.

My motors

Cost of ownership +

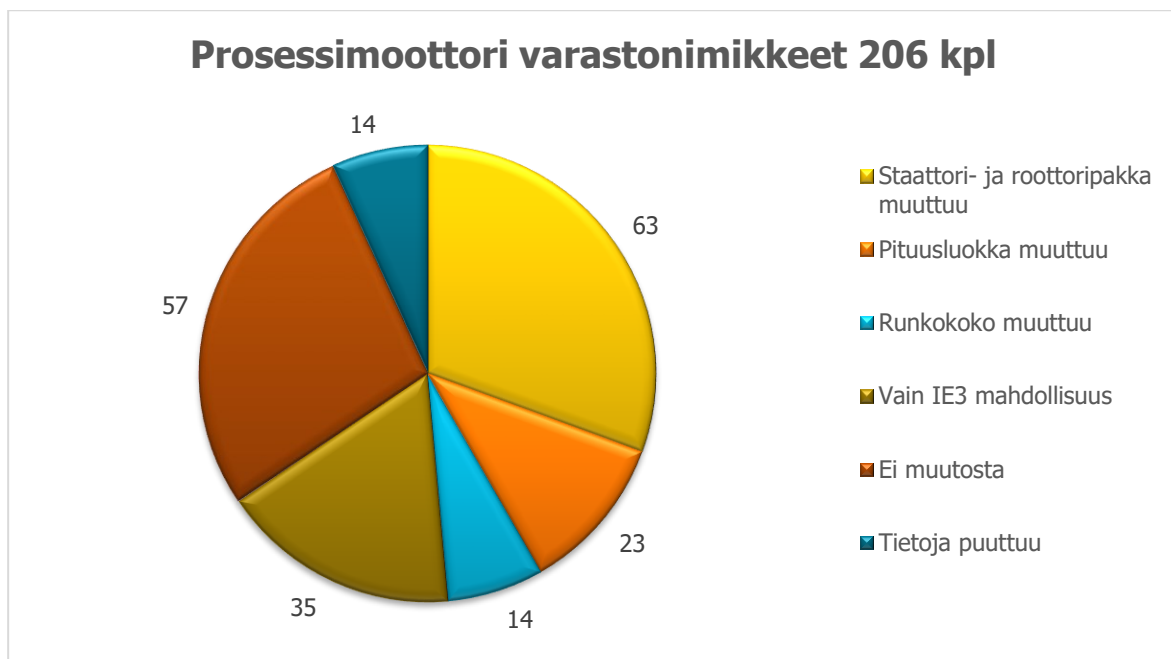
Documentation +

Summary and export +

Copyright 2024. All right reserved.  
Specifications subject to change without notice.

Kuva 27. ABB Optimizer-palvelu (ABB 2024)

Kuvassa 27 esitetty, kuinka lähtökriteereillä EU,  $\geq$ IE2, valurauta, prosessimoottori, 400/690V, 50Hz, nelinapainen, 75 kW nimellisteho Optimizer tarjoaa pelkkiä IE4-hyötysuhdeluokan prosessimoottoreita. Tämä johtuu siitä, että EU:n alueella on ekodirektiivi, joka määrää 75–200 kW sähkömoottoreille hyötysuhdeluokan IE4. Käyttämällä tätä palvelua varastonimikkeiden vaihtomoottorit määriteltiin teholuokille 0,12–800 kW. Alla olevassa ympyrädiagrammissa kuvassa 28 on esitetty, miten 206 varastonimikkeen vaihtomoottorin määrittelymenetelmä, sekä mitä muutoksia ilmeni prosessimoottoreiden IEC-tunnuksien välillä.

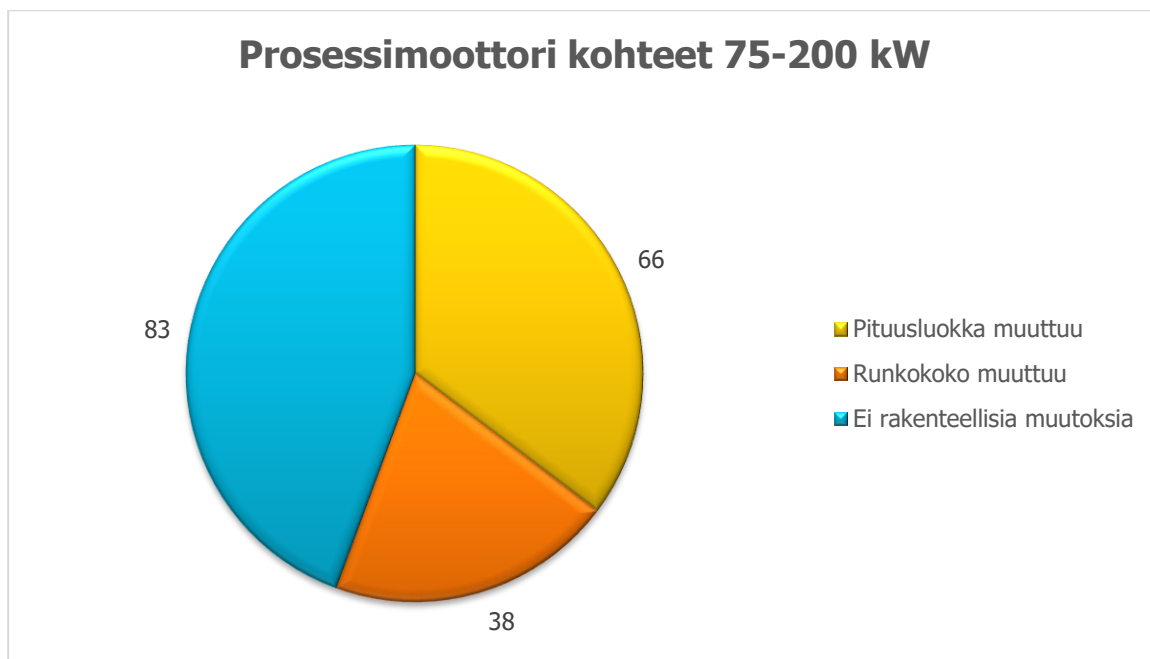


Kuva 28. Prosessimoottoreiden SAP varastonimikkeiden muutokset teholuokassa 0,12–800 kW

Kaikista  $\leq$ IE3-hyötysuhdeluokallisista prosessimoottoreista, joihin oli sillä teholuokalla IE4-hyötysuhdeluokallinen vaihtomoottori saatavilla, niin 63 eri varastonimikkeen prosessimoottorin IEC-tunnuksessa muuttui staattori- ja roottoripakan koko. Pituusluokka vaihtui kokoa suurempaan 23 eri varastonimikkeen prosessimoottorissa ja runkokoko 14 varastonimikkeessä.

Kahdeksannapaisille ja  $\leq$ 2,2 kW teholuokan sähkömoottoreille ei ollut vielä saatavilla IE4-hyötysuhdeluokallista versiota ja näitä varastonimikkeellä olevia sähkömoottoreita ilmeni 35 kappaletta. Lopuksi yhteensä 57 varastonimikkeessä, ei mitään muutosta ilmennyt vanhojen ja uusien IE4-hyötysuhdeluokallisten prosessimoottoreiden välillä. Myös vaihtomoottoria ei pystynyt määrittämään 14 varastonimikkeelle puuttuvien tietojen vuoksi, joten niiden osalta täytyy tehdä myöhemmin lisätutkimusta.

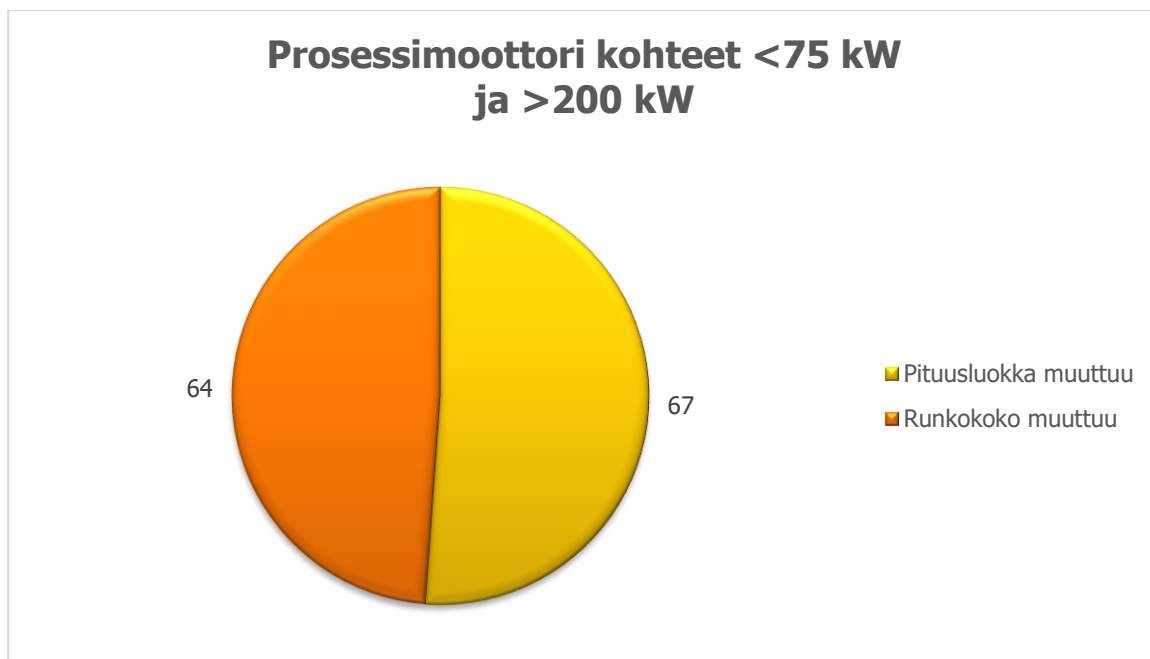
Kuten aiemmin oli mainittu, pituusluokan ja runkokoon muuttuminen vaikuttaa kunnossapidossa eri tavoin ja niiden kappalemäärä on selvitettävä laitepaikkakohtaisesti. SAP-järjestelmän avulla pystytään hakemaan laitepaikkalistaus jokaisen varastonimikkeellä olevan prosessimoottorin osalta, joka vähensi huomattavasti työmäärää. Kuvassa 29 on esitetty, kuinka moneen laitepaikkaan uusi ekodirektiivin IE4-vähimmäisvaatimus vaikuttaa.



Kuva 29. SAP prosessimoottori kohteiden muutokset teholuokassa 75–200 kW

Laitepaikkalistauksen teossa ilmeni, että 75–200 kW teholuokan prosessimoottoreista yhteensä 104 kohteessa prosessimoottorin pituusluokka tai runkokoko vaihtuu vähimmäisvaatimuksen takia. Pituusluokka 66 ja runkokoko 38 kohteessa. Nämä odotetusti aiheuttavat muutoksia prosessimoottoreiden mittoihin ja tulee tarkistaa laitepaikka kohtaisesti kentällä. Yhteensä 83 kohteessa ei tapahdu muutoksia prosessimoottoreiden mittojen suhteen.

Tulevaisuudessa sähkömoottoreiden vähimmäisvaatimus IE4-hyötysuhdeluokan osalta tulee varmasti laajentumaan tämän 75–200 kW teholuokkien ulkopuolelle. Tämän ennakoimiseksi tehtiin samanlainen listaus muille toimipaikan prosessimoottoreille ja määritettiin niillekin IE4-hyötysuhdeluokalliset vaihtomoottorit. Kyseiset prosessimoottorit olivat teholuokiltaan 2,2–75 kW ja 200–800kW. Kuvassa 30 on esitetty, kuinka monta kohdetta löytyi, jossa prosessimoottorin pituusluokka tai runkokoko tulee muuttumaan.



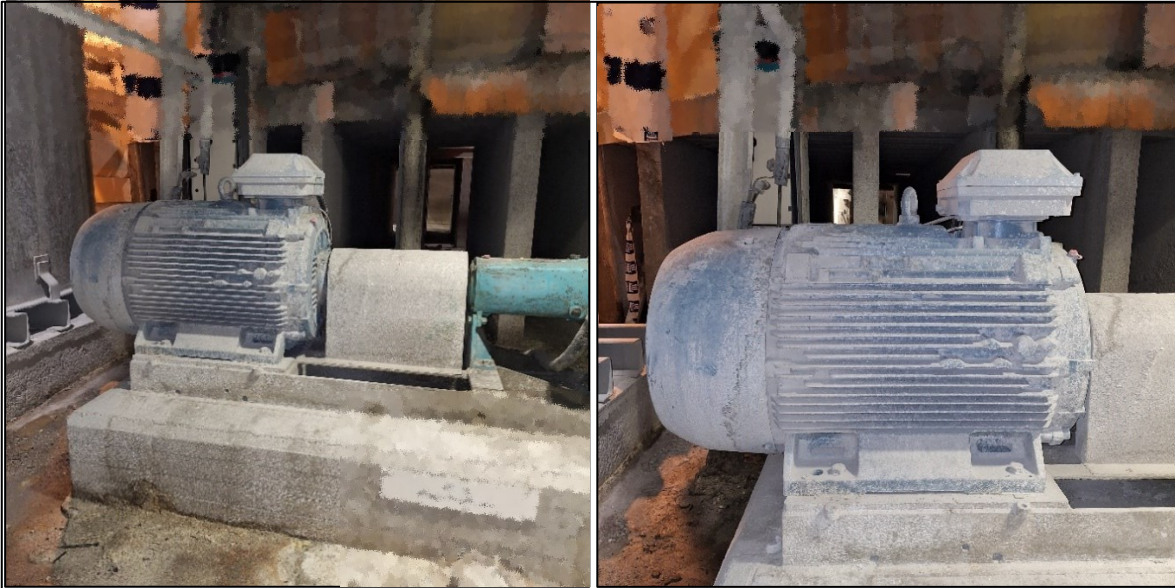
Kuva 30. SAP prosessimoottori kohteiden muutokset teholuokassa <75 kW ja >200 kW

Tässä listauksessa ilmeni, että teholuokaltaan <75 kW ja >200 kW prosessimoottoreista yhteensä 131 kohteessa muuttuu pituusluokka tai runkokoko. Tällä hetkellä nykyinen ekodirektiivi ei estä laitevalmistajia myymästä alle IE4-hyötysuhdeluokan prosessimoottoreita näissä teholuokissa. Myös niiden käyttö on teollisuudessa sallittua uusissa ja vanhoissa kohteissa. IE4-hyötysuhdeluokan prosessimoottoreihin kannattaa kuitenkin investoida, vaikka ekodirektiivi ei niin määrääkään. Paremman hyötysuhdeluokan prosessimoottori on hankintahinnaltaan kalliimpi. Sähkömoottorin elinkaarikustannukset kuitenkin huomioiden energiankulutuksen osuus kattaa 97 % moottorin elinkaarikustannuksista, kun taas hankintahinnan osuus on vain 2 % (VEM 2017). Tällä perusteella on järkevämpää siirtyä paremman hyötysuhteen sähkömoottoriin, jos se vain on mahdollista.

## 5.2.2 Tehdaskierros

Tutkimuksen konkreettisten esimerkkien etsinnässä suoritettiin tehdaskierros Yara Suomi Oy, Siilinjärven toimipaikan fosforihappotehtaalle. Tällä tehdaskierroksella käytiin läpi fosforihappotehtaan prosessimoottorit, joissa vaihtuu IE4-hyötysuhdeluokan myötä, joko pituusluokka tai runkokoko. Näitä muuttuvia prosessimoottoreita ilmeni yhteensä 39 kappaletta eri kohteissa ja näistä 23 oli nykyisen ekodirektiivin alaisia teholuokassa 75–200 kW. Loput 16 olivat teholuokaltaan <75 kW tai >200 kW. Alla on esitetty merkittävimpiä nostoja fosforihappotehtaan tehdaskierroksen tuloksista. Yksi esitetyistä kohteista on suuremman teholuokan prosessimoottori Siilinjärven toimipaikan rikastamolta.

*Pituusluokka muuttuu – ABB M3BP 200 kW 1500 RPM 315 SMB B3 IE3*



	IM1001, IMB3 and IM3001, IMB5										IM1001, IMB3					IM B5 (IM3001)							
	H	D		GA		F		E		L max		A	B	B1	C	HD1)	HD2)	K	M	N	P	S	
Motor size	2	4-8		2		4-8		2		4-8		2		4-8									
IE3;	315ML	65	90	69	95	18	25	140	170	1285	1315	508	457	508	216	852	-	30	600	550	660	23	
IE4;	315LK	65	90	69	95	18	25	140	170	1491	1521	508	508	560	216	-	880	28	600	550	660	23	
Muutos	0 mm	0 mm	0 mm	0 mm	0 mm	0 mm	0 mm	0 mm	0 mm	+206 mm	+206 mm	0 mm	+51 mm	+52 mm	0 mm	-	-2 mm	0 mm	0 mm	0 mm	0 mm	0 mm	

Chosen Efficiency Class	Output kW	Speed r/min	Current			Torque					Moment of inertia J = 114 GD2kgm2	Weight kg	Sound pressure Level Lpa dB	Chosen design		
			Full load 100 %	>3/4 load 75 %	1/2 load 50 %	Power factor Cos @	In A	Is / In	Starting current	Tn NM					Tl / Tn	Tb / Tn
IE3	200	1487	96	96.4	96.4	0.86	351	6.8	2386.8	1284	2.4	3	3.4	1480	74	Cenelec
IE4	200	1490	96.7	96.9	96.8	0.87	346	7.6	2629.6	1282	2.5	2.9	5	1480	74	Cenelec
Muutos	0	3	0.7	0.5	0.4	0.01	-5	0.8	242.8	-2	0.1	-0.1	1.6	0	0	0

*Pituusluokka: ML<sub>2</sub> → L<sub>2</sub>*

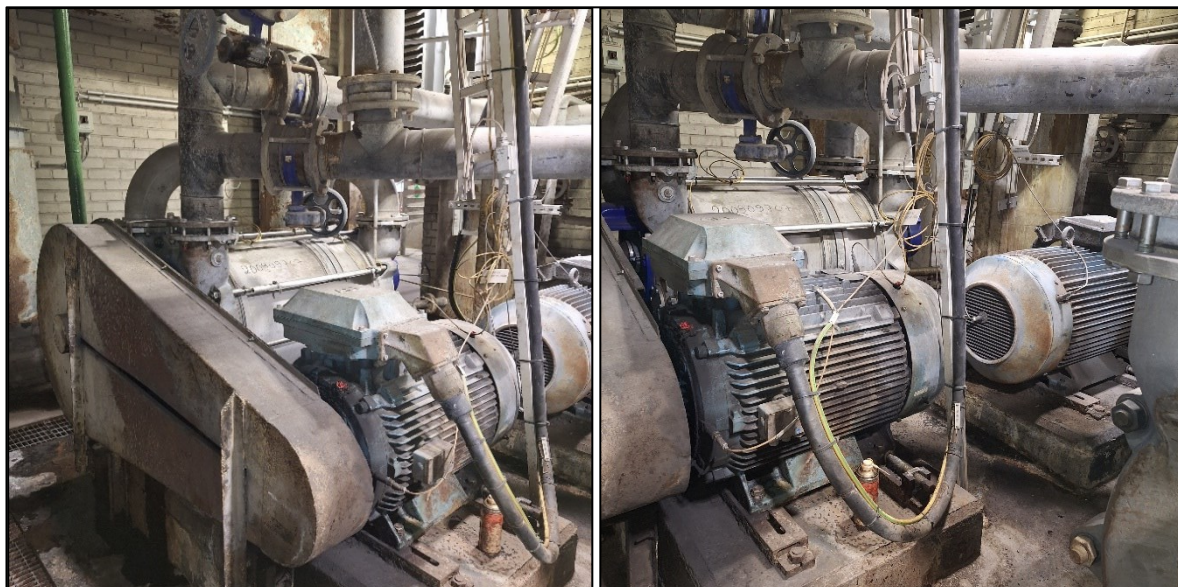
Kuva 31. Pituusluokka muuttuu 200 kW teholuokan prosessimoottorissa (Sjöblom 2024)

Kuvassa 31 on esitetty ABB M3BP-sarjan 200 kW jalkamoottori, jonka pituusluokka muuttuu rungosta 315MLB runkoon 315LKB. Tämän muutoksen seurauksena prosessimoottorin kokonaispituus kasvaa +206 mm, jolloin jalkamoottorin kiinnityspisteet myös muuttuvat. Kiinnitysreikien halkaisija pienenee myös -2 mm, joka johtuu todennäköisesti tuotannollisista syistä. Prosessimoottoreiden teknisien tietojen osalta oli huomioitavaa, että käynnistysvirta kasvaa +242,8 A IE3-hyötysuhdeluokallisesta prosessimoottorista.

Pituusluokan muuttuminen aiheuttaa tässä kohteessa sen, että tulevan IE4-hyötysuhdeluokan prosessimoottorin jalusta ei enää mahdu pituussuunnassa alkuperäiselle pedille. Uuden 315LKB runkoisen prosessimoottorin sisäisimmät kiinnityspisteet (B) ovat samalla mitalla, kuin 315MLB runkoisen

ulkoisimmat kiinnityspisteet (B1). Uuden prosessimoottorin pystyy periaatteessa kiinnittämään niistä nykyiseen petiin, mutta tällöin uuden vaihtomoottorin jalusta on 5 cm pedin ulkopuolella. On suositeltavaa, että prosessimoottoreiden peti kattaisi jalustan kokonaan ulkokehää myöten, mutta tilannekohtaisesti tulee tarkastella, täytyykö suurempia petimuutoksia tehdä.

*Pituusluokka tai runkokoko muuttuu – ABB M3BP 110 kW 1500 RPM 280 SMC KT B3 IE2*



IM1001, IMB3 and IM3001, IMB5														IM1001, IMB3					IM B5 (IM3001)				
H	D	GA		F		E		L max		A	B	B1	C	HD1)	HD2)	K	M	N	P	S			
Motor size	2	4-8		4-8		4-8		4-8		2		4-8											
IE2; 280SM	75	75	79,5	79,5	20	20	140	140	1053	1054	457	368	419	190	733	-	24	500	450	550	18,5		
IE4; 280 MLA	-	75	-	79,5	-	20	-	140	-	1189	457	419	457	190	-	785	24	500	450	550	15		
<b>Muutos</b>	0 mm	-	0 mm	-	0 mm	-	0 mm	-	0 mm	+ 135 mm	0 mm	+ 51 mm	+ 38 mm	0 mm	-	-	0 mm	0 mm	0 mm	0 mm	-3,5 mm		

Chosen Efficiency Class	Output kW	Speed r/min	Full load			Power factor Cos @	Current			Torque			Moment of inertia J = 1/4 GD2kgm2	Weight kg	Sound pressure Level Lpa dB	Chosen design
			>3/4 load 100 %	1/2 load 75 %	1/2 load 50 %		In A	Is / In	Starting current	Tn NM	Ti / Tn	Tb / Tn				
IE2	110	1485	95,1	95,4	95,1	0,86	193	7,6	1466,8	707	3	3	1,85	725	68	High-output
IE4	110	1489	96,3	96,3	95,7	0,8	205	8,8	1804	706	4	4	2,5	890	75	High-output
<b>Muutos</b>	0	4	1,2	0,9	0,6	-0,06	12	1,2	337,2	-1	1	1	0,65	165	7	0

*Pituusluokka: SM\_ → ML\_*

IM1001, IMB3 and IM3001, IMB5														IM1001, IMB3					IM B5 (IM3001)				
H	D	GA		F		E		L max		A	B	B1	C	HD1)	HD2)	K	M	N	P	S			
Motor size	2	4-8		4-8		4-8		4-8		2		4-8											
IE2; 280SM	75	75	79,5	79,5	20	20	140	140	1053	1054	457	368	419	190	733	-	24	500	450	550	18,5		
IE4; 315 SM	65	80	69	85	18	22	140	170	1174	1204	508	406	457	216	852	-	28	600	550	660	23		
<b>Muutos</b>	+ 35 mm	-10 mm	+ 5 mm	-10,5 mm	+ 5,5 mm	-2 mm	+ 2 mm	0 mm	+ 30 mm	+ 121 mm	+ 150 mm	+ 51 mm	+ 38 mm	+ 38 mm	+ 26 mm	+ 119 mm	-	+ 4 mm	+ 100 mm	+ 100 mm	+ 110 mm	+ 4,5 mm	

Chosen Efficiency Class	Output kW	Speed r/min	Full load			Power factor Cos @	Current			Torque			Moment of inertia J = 1/4 GD2kgm2	Weight kg	Sound pressure Level Lpa dB	Chosen design
			>3/4 load 100 %	1/2 load 75 %	1/2 load 50 %		In A	Is / In	Starting current	Tn NM	Ti / Tn	Tb / Tn				
IE2	110	1485	95,1	95,4	95,1	0,86	193	7,6	1466,8	707	3	3	1,85	725	68	High-output
IE4	110	1491	96,3	96,5	96,1	0,85	194	7,8	1513,2	704	2,4	3,1	2,9	1000	68	Genelec
<b>Muutos</b>	0	6	1,2	1,1	1	-0,01	1	0,2	46,4	-3	-0,6	0,1	1,05	275	0	0

*Runkokoko: 280\_ → 315\_*

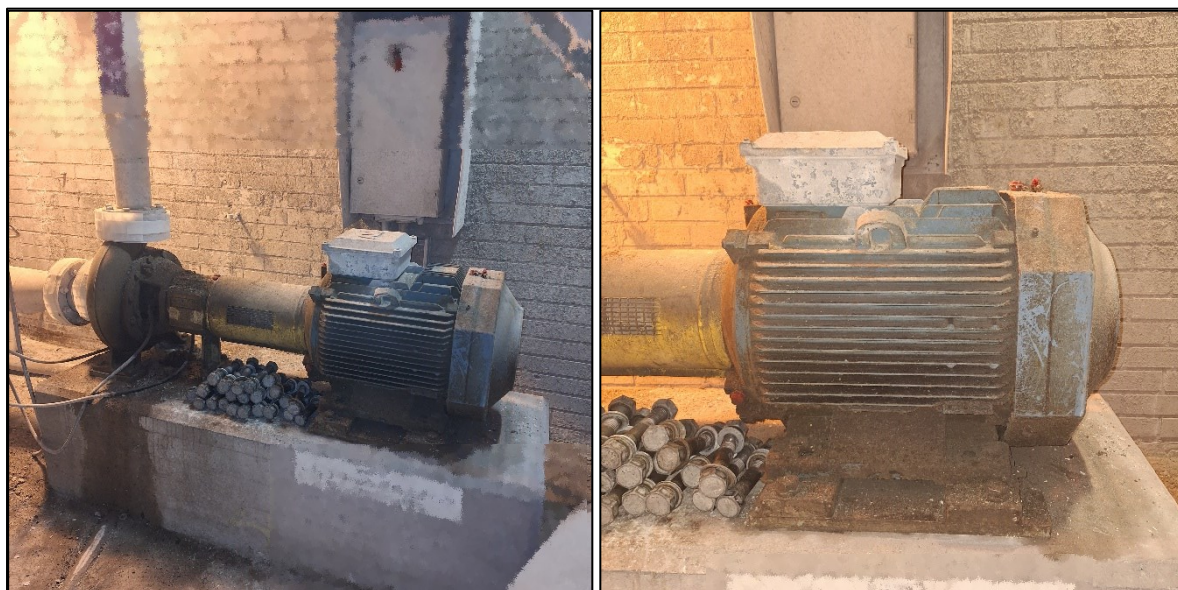
Kuva 32. Pituusluokka tai runkokoko muuttuu 110 kW teholuokan prosessimoottoreissa (Sjöblom 2024)

Kuvassa 32 on esitetty ABB M3BP-sarjan 110 kW jalkamoottori, joka muuttuu alkuperäisestä rungoltaan 280SMC joko uuteen pituusluokkaan 280MLB tai uuteen runkokokoon 315SMC. Näiden vaihtoehtojen erona on se, että saman runkokoon, mutta eri pituusluokan omistava IE4-hyötysuhdeluokan vaihtomoottori on High-output-mallia ja eri runkokolla oleva prosessimoottori on Genelec-mallia.

Pelkän pituusluokan muuttuessa kuvan molemmat prosessimoottorit pitenevät +135 mm, sekä niiden kiinnityspisteet muuttuvat. Kohteen prosessimoottorit on kiinnitetty ulkoisimpien kiinnityspisteiden B1 mukaan, jolloin vaihtomoottorit voi asentaa suoraan vanhan tilalle ilman erillisiä petimuutoksia. Kohteessa saattaa kuitenkin ilmetä erikoinen ongelma sen suhteen, että molempien kuvan prosessimoottoreiden vaihduttua IE4-hyötysuhdeluokallisiksi tila loppuu kesken. Prosessimoottorien takana tulisi olla 5–10 cm ylimääräistä tilaa jäähdytyksen optimoimiseksi. Kuvasta voi myös huomata, että kuvan prosessimoottoreissa on kunnonvalvontajärjestelmän anturi tarkkailemassa tuulettimien toimintaa. Nämä anturit eivät saata enää mahtua, jos prosessimoottoreiden rungot pitenevät. Teknisten tietojen puolesta High-output-mallin vaihtomoottorissa käynnistysvirta kasvaa +337,2 A.

Jos vaihtomoottoriksi valitaan Genelec-mallinen prosessimoottori, niin runkokoko vaihtuu kokoa suuremmaksi. Tällöin moottorin pidentymisen lisäksi akselin halkaisija, kiila ja pituus kasvaa suuremmaksi ja prosessimoottorin kiinnityspisteet muuttuvat täysin. Nämä muutokset voivat vaikuttaa prosessilaitteen kiilahihnan ja kiilahihnapyörän kokoon. Myös on mahdollista, että suurempia petimuutoksia on tehtävä, jotta uudet vaihtomoottorit sopivat kohteeseen. Teknisten tietojen puolesta Genelec-mallin vaihtomoottorissa käynnistysvirta kasvaa vain +46,4 A.

#### Runkokoko muuttuu – ABB M3BP 75 kW 1500 RPM 250 SMB KT B3 IE2



H	IM1001, IMB3 and IM3001, IMB5										IM1001, IMB3										IM B5 (IM3001)				
	D	GA		F		E		L max		A	B	B1	C	HD1)	HD2)	K	M	N	P	S					
Motor size	2	4-8	2	4-8	2	4-8	2	4-8	2	4-8	884	406	311	349	168	626	-	24	500	450	550	19			
IE2;	250	60	65	64	69	18	18	140	140	1088	1088	457	368	419	190	762	-	24	500	450	550	18			
IE4;	280 SM	65	75	69	79,5	18	20	140	140	1088	1088	457	368	419	190	762	-	24	500	450	550	18			
<b>Muutos</b>	+ 30 mm	+ 5 mm	+ 10 mm	+ 5 mm	+ 10,5 mm	0 mm	+ 2 mm	0 mm	0 mm	+ 204 mm	+ 204 mm	+ 51 mm	+ 57 mm	+ 70 mm	+ 22 mm	+ 136 mm	-	0 mm	0 mm	0 mm	0 mm	-1 mm			

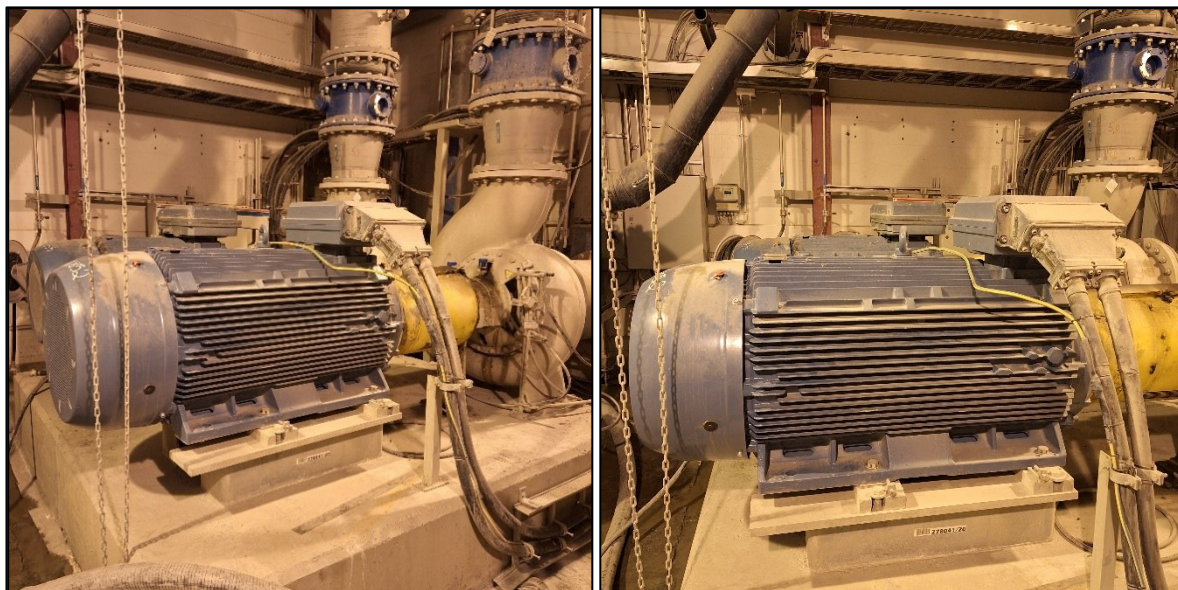
Chosen Efficiency Class	Output	Speed r/min	Current		Torque				Moment of inertia		Weight kg	Sound pressure Level Lpa dB	Chosen design			
			400 V	50 Hz	Full load	>3/4 load	1/2 load	Power factor	Starting current	Tn NM				Ti / Tn	Tb / Tn	J = 1/4 GD2kgm2
IE2	75	1478	94,4	95,1	94,8	0,85	134	7,3	978,2	484	2,8	3,1	0,866	450	67	High-output
IE4	75	1487	96	96,4	96,1	0,86	130	7,8	1014	481	2,8	2,9	1,85	725	72	Genelec
<b>Muutos</b>	0	9	1,6	1,3	1,3	0,01	-4	0,5	35,8	-3	0	-0,2	0,984	275	5	0

Runkokoko: 250\_ → 280\_

Kuva 33. Runkokoko muuttuu 75 kW teholuokan prosessimoottorissa (Sjöblom 2024)

Kuvassa 33 on esitetty ABB M3BP-sarjan 75 kW jalkamoottori, joka muuttuu rungosta 250 SMB runkoon 280SMC IE4-hyötysuhdeluokan myötä. Runkokoon muuttuminen aiheuttaa tässä tilanteessa sen, että akselin korkeus maasta kasvaa +30 mm, jonka takia kohteen tuleva vaihtomoottori täytyy asentaa tämän H-mitan verran alemmas. Jos mahdollista niin kuvan pumppua voi myös yrittää nostaa H-mitan verran ylemmäs linjauksen saavuttamiseksi. Vaihtomoottorissa on isompi akseli, jonka takia pumpun ja moottorin välinen kytkin täytyy vaihtaa. Prosessimoottoreiden välisten teknisten tietojen puolesta käynnistysvirta kasvaa +35,8 A. Tämänkaltaisia kohteita on Siilinjärven toimipai- kalla yhteensä 33 kappaletta ja jokainen niistä vaatii ennakkointia kunnossapidon puolesta.

*Runkokoko muuttuu – ABB M3BP 400 kW 1000 RPM 355 LKC B3 IE3 (TULEVAISUUDESSA)*



	IM1001, IMB3 and IM3001, IMB5										IM1001, IMB3					IM B5 (IM3001)							
	H	D		GA		F		E		L max		A	B	B1	C	HD1	HD2	K	M	N	P	S	
Motor size	2	4-8		2		4-8		2		4-8		2	4-8	2	4-8	2	4-8	2	4-8	2	4-8	2	4-8
IE3;	355LK	70	100	74,5	106	20	28	140	210	1764	1834	610	710	900	254	958	-	35	740	680	800	23	
IE4;	400 LK	80	100	85	106	22	28	170	210	1851	1891	686	710	800	280	1045	-	35	740	680	800	24	
<b>Muutos</b>	<b>+ 45 mm</b>	<b>+ 10 mm</b>	<b>0 mm</b>	<b>+ 10,5 mm</b>	<b>0 mm</b>	<b>+ 2 mm</b>	<b>0 mm</b>	<b>+ 30 mm</b>	<b>0 mm</b>	<b>+ 87 mm</b>	<b>+ 57 mm</b>	<b>+ 76 mm</b>	<b>0 mm</b>	<b>-100 mm</b>	<b>+ 26 mm</b>	<b>+ 87 mm</b>	<b>-</b>	<b>0 mm</b>	<b>0 mm</b>	<b>0 mm</b>	<b>0 mm</b>	<b>+ 1 mm</b>	

Chosen Efficiency Class	Output kW	Speed r/min	Current				Torque				Moment of inertia J = 1/4 GD2kgm2	Weight kg	Sound pressure Level Lpa dB	Chosen design		
			Full load 100 % 400 V	>3/4 load 75 % 50 Hz	1/2 load 50 %	Power factor Cos (φ)	In A	Is / In	Starting current	Tn NM					Ti / Tn	Tb / Tn
IE3	400	992	96	96	95,5	0,83	724	7,2	5212,8	3850	2,6	2,6	16,5	2600	75	Cenelec
IE4	400	994	96,6	96,7	96,3	0,8	747	7,5	5602,5	3843	2,8	3,1	17	2900	76	Cenelec
<b>Muutos</b>	<b>0</b>	<b>2</b>	<b>0,6</b>	<b>0,7</b>	<b>0,8</b>	<b>-0,03</b>	<b>23</b>	<b>0,3</b>	<b>389,7</b>	<b>-7</b>	<b>0,2</b>	<b>0,5</b>	<b>0,5</b>	<b>300</b>	<b>1</b>	<b>0</b>

*Runkokoko: 355 → 400*

Kuva 34. Runkokoko muuttuu 400 kW teholuokan prosessimoottorissa (Sjöblom 2024)

Kuvassa 34 on esitetty ABB M3BP-sarjan 400 kW jalkamoottori, joka muuttuu rungosta 355 LKC runkoon 400LKA IE4-hyötysuhdeluokan myötä. Huomio, kuitenkin siihen, että kyseinen prosessimoottori on teholuokaltaan >200 kW ja ei nykyisten vähimmäisvaatimuksien alaisena. Suurien teholuokan prosessimoottoreista tämä kohde oli ainut, jossa IE4-vähimmäisvaatimus aiheuttaisi ongelmia. Akse- lin korkeus maasta kasvaisi +45 mm, jonka takia seuraava vaihtomoottori pitäisi asentaa H-mitan verran alemmas tai prosessilaitteiston pumppua täytyisi nostaa korkeammalle. Kyseinen prosessi- moottori sijaitsee Siilinjärven toimipaikan rikastamolla. Prosessimoottoreiden välisten teknisten tietojen puolesta käynnistysvirta kasvaa +389,7 A.

*Runkokoko muuttuu – ABB M3BP 53 kW 1500 RPM 225 SMC B5/B3 IE3 (TULEVAISUUDESSA)*



H	IM1001, IMB3 and IM3001, IMB5										IM1001, IMB3					IM B5 (IM3001)						
	D		GA		F		E		L max		A	B	B1	C	HD1)	HD2)	K	M	N	P	S	
IE3:	225	55	60	59	64	16	18	110	140	849	879	356	286	311	149	573	-	18,5	400	350	450	19
IE4:	250	60	65	64	69	18	18	140	140	884	884	406	311	349	168	626	-	24	500	450	550	19
<b>Muutos</b>	+ 25 mm	+ 5 mm	+ 5 mm	+ 5 mm	+ 5 mm	+ 2 mm	0 mm	+ 30 mm	0 mm	+ 35 mm	+ 5 mm	+ 50 mm	+ 25 mm	+ 38 mm	+ 19 mm	+ 53 mm	-	+ 5,5 mm	+ 100 mm	+ 100 mm	+ 100 mm	0 mm

Chosen Efficiency Class	Output kW	Speed r/min	Full load		>3/4 load		1/2 load		Power factor Cos φ	Current				Torque			Moment of inertia J = 1/4 GD <sup>2</sup> /kgm <sup>2</sup>	Weight kg	Sound pressure Level Lpa dB	Chosen design
			400 V	50 Hz	100 %	75 %	100 %	50 %		In A	Is / In	Starting current	Tn NM	Ti / Tn	Tb / Tn					
IE3	53	1483	94,5	94,7	94,2	0,83	97	8,7	843,9	341	3,1	3,4	0,532	391	71	High-output				
IE4	55	1483	95,7	95,8	95,4	0,83	100	7,8	780	354	3,3	3,5	0,933	467	67	Cenelec				
Muutos	0	0	1,2	1,1	1,2	0	3	-0,9	-63,9	13	0,2	0,1	0,401	76	-4	0				

*Runkokoko: 225 → 250*

Kuva 35. Runkokoko muuttuu 53 kW teholuokan prosessimoottorissa (Sjöblom 2024)

Kuvassa 35 on esitetty ABB M3BP-sarjan 53 kW jalka- ja laippamoottori, joiden runkokoko muuttuu 225 SMC rungosta 250SMA runkoon IE4-hyötysuhdeluokan myötä. Huomio, kuitenkin siihen, että kyseinen prosessimoottori on <75 kW teholuokaltaan ja ei nykyisten vähimmäisvaatimuksien alaisena. Laittepaikallistausta tehdessä oli huomattu, että kyseisiä kohteita on Siilinjärven toimipaikalla 31 ja on vain ajan kysymys, kun IE4-vähimmäisvaatimus laajenee kyseiseenkin teholuokkaan.

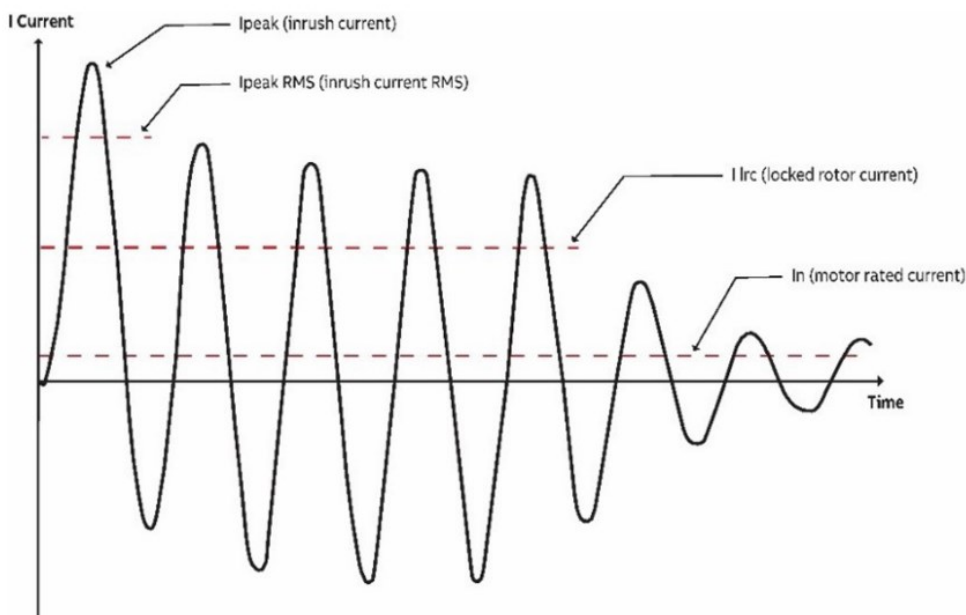
Kyseiset prosessimoottorit ovat IE3-hyötysuhdeluokan korotetun teholuokan erikoisia 53 kW moottoreita. Pelkästään IE3-hyötysuhdeluokassa oli tarjottu tätä teholuokkaa, kun muut hyötysuhdeluokat tarjoavat samaa prosessimoottoria teholuokassa 55 kW. Vielä IE4-hyötysuhdeluokassa ei ole saavutettu korotetun teholuokan 55 kW prosessimoottoria, jonka runkokoko olisi 225\_, joka korjaisi tämän tulevan ongelman. Kun tulevaisuudessa IE4-vähimmäisvaatimus laajenee teholuokkaan 55 kW, tulee vastaan entistä enemmän kohteita, joissa prosessimoottoreiden runkokoko vaihtuu.

Kuvan 35 laippamoottorin tilanteessa runkokoon muutos aiheuttaa laippaliitoksen halkaisijan kasvun mitalla +100 mm. Myös prosessimoottorin akselin halkaisija suurentuu. Tällaisissa tilanteissa täytyy tehdä enemmän mekaanista suunnittelua, jotta uuden vaihtomoottorin saa asennettua esimerkiksi kuvan mukaiseen vaihdelaatikkoon kiinni. Kuvan jalkamoottorin tilanteessa H-mitan muutos ei aiheuta suurempia ongelmia, koska kyseisten prosessimoottoreiden jalusta on säädettävissä kierretangon ja muttereiden avulla. Akselissa kiinni oleva kiilahihnapyörä pitää kuitenkin vaihtaa sopivamaksi uuden vaihtomoottorin tultua.

### 5.2.3 Käynnistysvirtojen tutkiminen

Kunnossapidossa on tullut myös vastaan tilanteita, joissa oikosulkumoottoria suojaava lämpörele tai kahvasulake on pitänyt vaihtaa nimellisarvoltaan suuremmaksi, koska IE4-hyötysuhdeluokallisessa oikosulkumoottorissa on korkeampi käynnistysvirta. ABB on itsekin ottanut tähän kantaa sanomalla, että IE3 ja IE4 sähkömoottorit ottavat enemmän käynnistysvirtaa, kun lukittu roottori tarvitsee näissä sähkömoottoreissa enemmän näennäistehoa ja virtaa saavuttaakseen korkeamman tehokuusluokan (ABB Library Download Center: hakusana Motor starting and protection for premium-efficiency motors. 2023, 7).

Tämä suurempi roottorin käynnistysvirta johtuu IE4-hyötysuhdeluokan oikosulkumoottoreissa pidemmästä staattori- ja roottoripaketista. Pidempi rautasydän tarvitsee enemmän rautalevyjä, joka tarkoittaa suurempaa magnetointivirtaa oikosulkumoottorin käynnistyessä. Käynnistysvirralla on suurin hetkellisarvo eli sysäysvirta silloin, kun jännitteen hetkellisarvo sattuu olemaan sillä ajanhetkellä nolla (Aura & Tonteri 1996, 322). Sysäysvirran kasvun takia on syytä tarkastella, kuinka paljon käynnistysvirta kasvaa eri hyötysuhdeluokkien oikosulkumoottoreiden välillä. Tämä tarkastelu tehtiin vertailemalla oikosulkumoottoreiden teknisiä tietoja Excelissä. Kuvassa 36 on havainnollistettu virran käyrämuoto oikosulkumoottorin käynnistyessä.



Kuva 36. ABB IE3/IE4 sähkömoottoreiden käynnistysvirtakuvaaja (ABB Library Download Center: hakusana Motor starting and protection for premium-efficiency motors. 2023, 8)

ABB M3BP-sarjan prosessimoottoreiden tekniset tiedot on julkaistu yhdeksi luettelotiedostoksi ja näiden siirtäminen Excelliin on mahdollista tehdä kaikkien käynnistysvirtojen helppoa vertailua varten. Käynnistysvirtojen vertailua varten järjestelin nimellisen pyörimisnopeuden mukaan IE4-, IE3- ja IE2-hyötysuhdeluokkien oikosulkumoottoreiden nimellisvirrat ja käynnistysvirtakertoimet teholuokan mukaan järjestykseen. Alla olevalla kaavalla 10 voi laskea oikosulkumoottorin käynnistysvirran,

$$I_S = I_n A \cdot I_s / I_n \quad (10)$$

jossa  $I_S$  on oikosulkumoottorin käynnistysvirta,  $I_n A$  nimellinen virta täydellä kuormituksella ja  $I_s / I_n$  käynnistysvirtakerroin. Kun Excelliin ollaan kaikille napapareille ja niiden teholuokille käynnistysvirrat laskettu niin voidaan IE4 oikosulkumoottoreiden käynnistysvirtoja vertailla IE3 ja IE2 oikosulkumoottoreiden käynnistysvirtoihin. Vertailussa on otettu huomioon, onko vertailevat oikosulkumoottorit ABB:n Genelec vai korotetun teholuokan mallia. Ekodirektiivin alaisena olevat teholuokat on rajattu punaisella kehyksellä. Tulokset on esitetty liitteessä 3 kahdessatoista taulukossa.

Käynnistysvirtojen vertailusta voidaan todeta, että tietyn teholuokan IE4-hyötysuhdeluokallisissa oikosulkumoottoreissa käynnistysvirta ei kasva ollenkaan, kun taas tietyissä kasvaa varsin radikaalisti. Napaparista riippuen alhaisemman teholuokan IE4 oikosulkumoottoreissa ilmenee jopa 10 – 25 % enemmän käynnistysvirtaa IE3 tai IE2 oikosulkumoottoreihin verrattuna. Pahimmillaan jos Genelec-mallisen IE2 prosessimoottorin tilalle vaihdetaan High-output-mallin IE4 prosessimoottori voi käynnistysvirta kasvaa jopa >35 %. Tässäkin kyseisessä tilanteessa käynnistysvirta kasvaa 478 A. Jatkoissa taulukoista voi sähköalan ammattihenkilöt tarkistaa kaikkien prosessimoottoreiden osalta, minkä moottorimallien ja hyötysuhdeluokkien välillä ilmenee suuria käynnistysvirtamuutoksia. Käynnistysvirtojen tarkastelulla voidaan ennakkoon tarkistaa suojalaitteiden riittävyys.

## 6 YHTEENVETO

Opinnäytetyön päätavoitteena oli selvittää IE4-energiatehokkuusvaatimuksen vaikutus teollisuuden kunnossapitoon. Oikosulkumoottorin hyötysuhteen parantamisen edellyttämät muutokset vaikuttivat sähkömoottorin kokonaismittoihin. Hyötysuhteeseen vaikuttavat tekijät voi nähdä tiivistelmänä liitteestä 4. Prosessimoottoreiden IEC-tunnuksia vertailemalla tuli ilmi, että IE4-hyötysuhdeluokka ABB M3BP-sarjan prosessimoottoreissa oli saavutettu uudella staattori- ja roottoripakalla. Tämän vaikutus teollisuuden kunnossapitoon oli se, että tietyn tehoisissa ja kokoissa prosessimoottoreissa muuttuu pituusluokka tai runkokoko IE4-hyötysuhdeluokan saavutettua. Pituusluokka muuttuu Siilinjärven toimipaikalla 66 kohteen prosessimoottorissa nykyisen vähimmäisvaatimuksen takia ja tulevaisuudessa energiatehokkuusvaatimuksen laajentuessa kohteita tulee lisää 67 kappaletta. Runkokoko muuttuu nykyisen vähimmäisvaatimuksen takia 38 kohteessa ja tulevaisuudessa kohteita tulee lisää ainakin 64 kappaletta.

Pituusluokan muuttuminen aiheuttaa prosessimoottoreiden rungon pidentymisen ja jalkamoottoreissa kiinnityspisteiden muuttumisen. Tämä voi aiheuttaa tilanteita, joissa uusi IE4-hyötysuhdeluokan prosessimoottori ei mahdu nykyisen prosessimoottorin tilalle pedin tai vapaan tilan puolesta. Runkokoon muuttuminen aiheuttaa prosessimoottoreissa rungon pidentymisen lisäksi monia muita muutoksia prosessimoottorin mittoihin. Jalkamoottoreissa kunnossapitoon eniten vaikuttava muutos on akselin korkeus maasta -mitta, jota varten vaihtomoottoria on laskettava tai prosessilaitetta nostettava tämän mittamuutoksen verran. Laippamoottoreissa runkokoon muutos muuttaa kiinnitysreikien halkaisija mittaa, jonka adaptoimiseksi enemmän mekaanisia muutoksia on tehtävä prosessilaittekohteisiin. Tilannekohtaisesti nämä prosessimoottoreiden mittojen muutokset voivat aiheuttaa lisäkustannuksia petimuutoksien tai muiden mekaanisten muutoksien takia. Myös jos kohteen muutoksia ei ole ennakoitu ja sähkömoottori on tuotantoprosessin kannalta kriittinen, voi viivästynyt kunnossapitotyö ja laitteiston pysäytys aiheuttaa pahimmassa tilanteessa tuotantolaitoksen alasajon.

Kohteiden määrän selvityksen ja pituusluokan ja runkokoon muuttumisen aiheuttavien muutoksien selvityksen ansiosta nykypäivänä voidaan olla tietoisia kaikista prosessimoottorikohteista, joihin IE4-vähimmäisvaatimus vaikuttaa. Teollisuuden kunnossapidossa ennakointi vähentää kustannuksia ja edistää tuotantolaitoksien toimintavarmuutta.

Käynnistysvirtataulukoiden avulla kunnossapidon sähkömoottoreiden vaihtotyötä suunnittelevat sähköalan ammattilaiset voivat ennakoimalla tarkistaa käynnistysvirran muutoksen määrän, kun ABB M3BP-sarjan IE2- tai IE3-hyötysuhdeluokan prosessimoottoreita vaihdetaan IE4-hyötysuhdeluokalliseksi. Näin voidaan välttyä odottamattomilta vikatilanteilta.

## 7 POHDINTA

Opinnäytetyön aiheena oli vastata tilaajan kysymykseen, miten uusi IE4-energiatehokkuusvaatimus vaikuttaa teollisuuden kunnossapitoon. Lähdin vastausta etsimään lähtökohtaisesti tutustumalla ensin erilaisiin Siilinjärven toimipaikan prosessilaitteisiin ja niiden prosessimoottoreiden asennustapoihin. Prosessimoottoreiden ja SAP-järjestelmän tarkastelusta ilmeni tarkemmin, minkälaisia sähkömoottoreita toimipaikalla on käytössä ja millaisiin kohteisiin. Kaikkien toimipaikan prosessimoottoreiden varastonimikkeiden listaus ja niiden mittakuvien ja teknisten tietojen siirto helposti luettavaksi Excel-taulukoiksi auttoi tutkimuksen suorittamista. Kaikkien varastonimikkeiden analysoinnin jälkeen määritin vaihtomoottorit jokaiselle eri teho- koko- ja nopeusluokan prosessimoottorille. Mittakuvien ja teknisten tietojen vertailu näiden prosessimoottoreiden osalta on todella aikaa vievä prosessi. Tästä syystä kehitin tilaajan käyttöön mittakuvien ja teknisten tietojen vertailua varten erilliset käyttäjätasoiset Excel-tiedostot. Näissä Exceleissä käyttäjä valitsee listasta kaksi prosessimoottoria ja ohjelma automaattisesti etsii niiden tiedot ja vertaa niitä toisiinsa. Näin pystytään jatkossa kertomaan nopeasti valittujen prosessimoottoreiden eroavaisuudet. Näitä Exceleitä on käytetty esimerkiksi tehdaskierroksen prosessimoottoreiden tietojen ja kuvien analysointiin.

Saavutin opinnäytetyön ensisijaisen tavoitteen ja työn jäljiltä jäi bonukseksi hyödylliset työkalut prosessimoottoreiden kunnossapitosuunnittelua varten. Osaamisen jakamista ajatellen prosessimoottoreiden varastonimikelistaus, mittakuvien vertailu ja teknisten tietojen vertailu Excel-tiedostot lähtevät jakoon toimipaikan SharePoint-alustalle työn ollessa valmis. Näin ollen toimipaikan kaikki sähköalan asiantuntijat pääsevät tiedostoihin käsiksi omilta yksiköiltään ja voivat edistää niillä omia kunnossapito tai suunnittelu töitään.

Työssä oli myös erittäin mielenkiintoista ja palkitsevaa selvittää, millä muuttujilla oikosulkumoottorin hyötysuhdetta on pystytty parantamaan. Tutkimukseni paljasti, että hyötysuhteeseen vaikuttaa monet erilaiset tekijät. Oikosulkumoottorien optimaalinen hyötysuhde saavutetaan löytämällä tasapaino useiden keskenään vuorovaikutuksessa olevien muuttujien ja niiden ominaisuuksien välillä. Tämä vaatii tarkkaa ja täsmällistä suunnittelua. Hyötysuhteen optimoinnin selvitys antoi mahdollisuuden tutustua oikosulkumoottoreiden tieteelliseen puoleen, joka toi opinnäytetyöhön ainutlaatuista haastetta.

Olen tyytyväinen opinnäytetyöni nykypäiväiseen aiheeseen ja kunnossapidon kannalta tärkeisiin tuloksiin. Näin alusta asti, että opinnäytetyölläni on tärkeä tarkoitus ja oikeasti olemassa on ongelma, joka vaatii selvitystä. Tässä työssä on selvitetty, kuinka monessa ja minkälaisissa kohteissa kunnossapidollisia ongelmia ilmenee, sekä millaisia nämä ongelmat ovat. Näillä työn tuloksissa pystytään jatkossa välttymään ylimääräisiltä kustannuksilta ja suunnittelemattomilta tuotannon pysähdyksiltä.

Jatkotutkimuksena tämän työn voisi tehdä uudelleen, kun Euroopan Komission ekosunnitteludirektiivi päivittyy nostamalla vähimmäisvaatimusten rima korkeammalle. Kunnossapidollisen hyödyntämisen ja hyötysuhteen optimoinnin tutkimisen puolesta IE5-hyötysuhdeluokan reluktanssimoottoreita voisi tutkia tarkemmin. Työssä voisi selvittää niiden tuomat mahdollisuudet teollisuuden laitoksille ja, miten niissä on saavutettu IE5-hyötysuhdeluokka.

## LÄHTEET

- AAWVA 2016. Typical Failures in Three-Phase Stator Windings. Verkkojulkaisu. <https://www.aawva.com/resource/2016/3/25/typical-failures-in-three-phase-stator-windings>. Viitattu 14.2.2024.
- ABB 2024. Bearing currents. Verkkojulkaisu. <https://new.abb.com/motors-generators/iec-low-voltage-motors/articles/bearing-currents>. Viitattu 27.5.2024.
- ABB 2024. Motor starting and protection for IEC premium-efficiency motors. Verkkojulkaisu. <https://new.abb.com/low-voltage/campaigns/ie3-ready>. Viitattu 10.2.2024.
- ABB 2024. Optimizer tool. Verkkojulkaisu. Päivitetty 22.4.2024. <https://new.abb.com/motors-generators/energy-efficiency/optimizer>. Viitattu 7.4.2024
- ABB Library Download Center: hakusana EU Ecodesign Regulation. 2023. Verkkojulkaisu. Päivitetty 8.3.2023. [Library.abb.com. https://search.abb.com/library/Download.aspx?DocumentID=9AAU0000000053&LanguageCode=en&DocumentPartId=&Action=Launch](https://search.abb.com/library/Download.aspx?DocumentID=9AAU0000000053&LanguageCode=en&DocumentPartId=&Action=Launch). Viitattu 1.2.2024.
- ABB Library Download Center: hakusana IEC 60034-2-1 standard on efficiency measurement methods for low voltage AC motors. Leaflet 2024. Verkkojulkaisu. Päivitetty 25.4.2024. [Library.abb.com. https://search.abb.com/library/Download.aspx?DocumentID=9AKK107318&LanguageCode=en&DocumentPartId=&Action=Launch](https://search.abb.com/library/Download.aspx?DocumentID=9AKK107318&LanguageCode=en&DocumentPartId=&Action=Launch). Viitattu 1.2.2024.
- ABB Library Download Center: hakusana Low voltage Process performance cast iron motors. Catalog 2024. Verkkojulkaisu. Päivitetty 26.2.2024. [Library.abb.com. https://search.abb.com/library/Download.aspx?DocumentID=9AKK105944&LanguageCode=en&DocumentPartId=&Action=Launch](https://search.abb.com/library/Download.aspx?DocumentID=9AKK105944&LanguageCode=en&DocumentPartId=&Action=Launch). Viitattu 20.2.2024.
- ABB Library Download Center: hakusana Motor starting and protection for premium-efficiency motors. 2023. Verkkojulkaisu. Päivitetty 12.7.2023. [Library.abb.com. https://search.abb.com/library/Download.aspx?DocumentID=1SBC100223M0201&LanguageCode=en&DocumentPartId=&Action=Launch](https://search.abb.com/library/Download.aspx?DocumentID=1SBC100223M0201&LanguageCode=en&DocumentPartId=&Action=Launch). Viitattu 10.2.2024.
- Aho, Tuomo 2007: Electromagnetic Design of a Solid Steel Rotor Motor for Demanding Operation Environments. Väitöskirja. Faculty of Technology, Electrical Engineering. Lappeenranta teknillinen yliopisto. <https://urn.fi/URN:ISBN:978-952-214-499-7>. Viitattu 3.3.2024.
- ALAMY 2024. Squirrel cage rotor Stock Photos and Images. Verkkojulkaisu. <https://www.alamy.com/stock-photo/squirrel-cage-rotor.html?sortBy=relevant>. Viitattu 17.3.2024.
- ARCHI INDUSTRIES 2021. Dc Motor Manufacturers in Aurangabad. Verkkojulkaisu. <https://archi-industries.4bz.in/updates/dc-motor-manufacturers-in-aurangabad>. Viitattu 26.4.2024.
- Asetus 2019/1781/EU. Euroopan parlamentin ja neuvoston direktiivin 2009/125/EY mukaisten ekologisen suunnittelun vaatimusten asettamisesta sähkömoottoreille ja taajuusmuuttajille, asetuksen (EY) N:o 641/2009 muuttamisesta erillisten ja tuotteisiin integroitujen akseliivisteettömien kiertovesipumppujen ekologista suunnittelua koskevien vaatimusten osalta sekä komission asetuksen (EY)

N:o 640/2009 kumoamisesta. Euroopan Unionin virallinen lehti 25.10.2019. <http://data.europa.eu/eli/reg/2019/1781/oj>. Viitattu 15.2.2024.

Asetus 640/2009/EU. Euroopan parlamentin ja neuvoston direktiivi 2005/32/EY täytäntöönpanemista sähkömoottoreiden ekologista suunnittelua koskevien vaatimusten osalta. Euroopan Unionin virallinen lehti 22.7.2009. <http://data.europa.eu/eli/reg/2009/640/oj>. Viitattu 15.2.2024.

Aura, Lauri & Tonteri, Antti J. 1996. Teoreettinen sähkötekniikka. Helsinki: WSOYpro Oy.

Autoserviceworld 2023. EV World: What will happen to ICE Suppliers in an EV world? Verkkajulkaisu. Päivitetty 1.8.2023. <https://www.autoserviceworld.com/ev-world-what-will-happen-to-ice-suppliers-in-an-ev-world/cross-section-of-industrial-electric-motor-electric-motor-parts/>. Viitattu 4.4.2024.

CDZ 2024. Stator & Rotor Laminations. Verkkajulkaisu. <https://www.cdz-gmbh.com/en/produkte/stator-rotor-laminations/>. Viitattu 6.5.2024.

ECPLAZA 2024. Silicon Steel Lamination Motor Rotor Stator for Electric Air Conditioner HVAC PSC Motor. Verkkajulkaisu. <https://www.ecplaza.net/products/silicon-steel-lamination-motor-rotor-stator-4400097>. Viitattu 6.5.2024.

Elektrisola 2024. Litz Wire Info. Verkkajulkaisu. <https://www.elektrisola.com/en/Litz-Wire/Info>. Viitattu 14.4.2024.

Eurolab 2024. ErP (energiaan liittyvät tuotteet) 2009/125/EC-testit. Verkkajulkaisu. <https://www.eurolab.com.tr/fi/testler/elektriksel-guvenlik-testleri/erp-energy-related-products-2009-125-ec-testleri>. Viitattu 20.2.2024.

FLOWTECH 2024. Pump & Systems. Verkkajulkaisu. <https://flowtech.com.eg/product-category/4-pumps-systems/>. Viitattu 28.4.2024.

Hietalahti, Lauri 2011. Muuntajat ja sähkökoneet. Tampere: AMK-kustannus OY Tammertekniikka.

Ilmasto-opas 2018. Kestävä suunnittelu vähentää tuotteiden ilmastovaikutuksia. Verkkajulkaisu. <https://www.ilmasto-opas.fi/artikkelit/kestava-suunnittelu-vahentaa-tuotteiden-ilmastovaikutuksia>. Viitattu 5.2.2024.

JTEKT 2024. Bearing trivia. Verkkajulkaisu. <https://koyo.jtekt.co.jp/en/2019/08/column01-03.html>. Viitattu 25.4.2024.

Kirtley Jr, James L 2004. Designing Squirrel Cage Rotor Slots with High Conductivity. Tieteellinen artikkeli. Massachusetts Institute of Technology. [https://www.copper.org/environment/sustainable-energy/electric-motors/education/motor-rotor/pdf/Squirrel\\_Cage\\_Rotor\\_Slots.pdf](https://www.copper.org/environment/sustainable-energy/electric-motors/education/motor-rotor/pdf/Squirrel_Cage_Rotor_Slots.pdf). Viitattu 17.3.2024.

Kujala, Lauri 2020. Oikosulkumoottorin alumiinisen staattorikäälityksen kehittäminen. Diplomityö. Sähkötekniikan koulutusohjelma, tekniikan ja liikenteen ala. Vaasan yliopisto. <https://urn.fi/URN:NBN:fi-fe2020052538931>. Viitattu 19.3.2024.

Maloma Evelin, Muteba Mbika & Nicolae Dan-Valentin. Effect of Rotor bar Shape on the Performance of Three Phase Induction Motors with Broken Rotor Bars. Tieteellinen artikkeli. Department of Electrical Engineering. University of Johannesburg. 10.1109/OPTIM.2017.7974997. Viitattu 16.3.2024.

MEDIUM 2023. Eddy Current Testing in Metals. Verkkojulkaisu. <https://medium.com/@mtapas/eddy-current-testing-in-metals-11bd0f4642f2>. Viitattu 9.5.2024.

Metsberg, Heikki 2006. Sähkökoneen staattorikäimityksen kehittäminen. Opinnäytetyö. Sähkötekniikan koulutusohjelma, tekniikan ja liikenteen ala. Helsingin ammattikorkeakoulu. [https://urn.fi/URN:NBN:fi:stada-1163523267\\_1](https://urn.fi/URN:NBN:fi:stada-1163523267_1). Viitattu 7.3.2024.

MOTIONCONTROLTIPS 2024. What are eddy currents and how do they affect motor performance? Verkkojulkaisu. <https://www.motioncontroltips.com/what-are-eddy-currents-and-how-do-they-affect-motor-performance/>. Viitattu 9.5.2024.

Nardo, Marfoli, Degano & Gerada 2021. Open and Closed Rotor Slots Design of Single and Double Cages Induction Motor. Tieteellinen artikkeli. University of Nottingham. 10.1109/WEMDCD51469.2021.9425665. Viitattu 22.3.2024.

Nardo, Marfoli, Degano, Gerada & Chen 2020. Rotor Design Optimization of Squirrel Cage Induction Motor - Part II: Results Discussion. Tieteellinen artikkeli. University of Nottingham. ABB Corporate Research Västerås, Sweden. 10.1109/TEC.2020.3020263. Viitattu 16.3.2024.

Ocak, Cemil 2023. A FEM-Based Comparative Study of the Effect of Rotor Bar Designs on the Performance of Squirrel Cage Induction Motors. Tieteellinen artikkeli. Department of Electrical and Electronics Engineering. Gazi University Faculty of Technology. <https://doi.org/10.3390/en16166047>. Viitattu 16.3.2024.

POLARISLASERLAMINATIONS 2024. Motor laminations. Verkkojulkaisu. <https://www.polarislaserlaminations.com/motor-laminations.html>. Viitattu 29.4.2024.

Pyrhönen Juha, Jokinen Tapani & Hrabovcová Valeria 2014. Design of rotating electrical machines. E-kirja. Chichester: Wiley. Viitattu 2.3.2024.

Rantala, Aatu-Oskari 2014. Aktiivimateriaalin laadun vaikutus oikosulkumoottorin hyötysuhteeseen. Opinnäytetyö. Sähkötekniikan koulutusohjelma, tekniikan ja liikenteen ala. Vaasan ammattikorkeakoulu. <https://urn.fi/URN:NBN:fi:amk-201405127405>. Viitattu 9.5.2024.

RCET 2024. Output equation of Induction motor. Verkkojulkaisu. Rohini College of Engineering and Technology. [https://www.rcet.org.in/uploads/academics/rohini\\_38849559693.pdf](https://www.rcet.org.in/uploads/academics/rohini_38849559693.pdf). Viitattu 27.3.2024.

Sesko 2024. IEC ja Cenelec. Verkkojulkaisu. <https://sesko.fi/standardit/iec-ja-cenelec/>. Viitattu 23.3.2024.

Sjöblom, Joonas 2024. Pituusluokka muuttuu 200 kW teholuokan prosessimoottorissa. Valokuva. 15.4.2024. Siilinjärvi: Yara Suomi Oy, Fosforihappotehdas.

Sjöblom, Joonas 2024. Pituusluokka tai runkokoko muuttuu 110 kW teholuokan prosessimoottorissa. Valokuva. 16.4.2024. Siilinjärvi: Yara Suomi Oy, Fosforihappotehdas.

Sjöblom, Joonas 2024. Runkokoko muuttuu 400 kW teholuokan prosessimoottorissa. Valokuva. 2.5.2024. Siilinjärvi: Yara Suomi Oy, Rikastamo.

Sjöblom, Joonas 2024. Runkokoko muuttuu 53 kW teholuokan prosessimoottorissa. Valokuva. 15.4.2024. Siilinjärvi: Yara Suomi Oy, Fosforihappotehdas.

Sjöblom, Joonas 2024. Runkokoko muuttuu 75 kW teholuokan prosessimoottorissa. Valokuva. 15.4.2024. Siilinjärvi: Yara Suomi Oy, Fosforihappotehdas.

Syrjälä, Joni 2024. Aluemyyntipäällikkö. ABB. Haastattelu 7.3.2024.

Tong, Wei 2017. Mechanical design of electric motors. Boca Raton: CRC Press, Taylor & Francis Group.

VEM 2017. ENERGIAN SÄÄSTÄMINEN SÄHKÖMOOTTORILLA NYT JA TULEVAISUUDESSA. Verkkojulkaisu. <https://www.vem.fi/uutiset/energian-saastaminen-sahkomoottorilla-nyt-ja-tulevaisuudessa/>. Viitattu 14.2.2024.

Yara 2021. Yara Siilinjärven uutisia. [https://www.yara.fi/siteassets/about-yara/yara-suomi/siilinjärvi/yara\\_uutisjousi\\_liite\\_280x395\\_3003\\_web.pdf](https://www.yara.fi/siteassets/about-yara/yara-suomi/siilinjärvi/yara_uutisjousi_liite_280x395_3003_web.pdf). Verkkojulkaisu. Viitattu 6.5.2024.

Yara 2022. Yara Intranet (SharePoint). Kuvapankki. Henkilökohtainen tiedonanto. Viitattu 20.5.2024.

Yara 2024. Historia. <https://www.yara.fi/tietoa-yarasta/yara-suomi/historia/>. Verkkojulkaisu. Viitattu 6.5.2024.

Yara 2024. This is Yara. <https://www.yara.com/this-is-yara/>. Verkkojulkaisu. Viitattu 7.5.2024.

Yara 2024. Where we operate. <https://www.yara.com/where-we-operate/>. Verkkojulkaisu. Viitattu 7.5.2024.

Yara 2024. Yaran toimipaikat Suomessa. <https://www.yara.fi/tietoa-yarasta/yara-suomi/toimipaikat/>. Verkkojulkaisu. Viitattu 6.5.2024.

ZENER 2024. Sähkömoottorin mitat. Verkkojulkaisu. <https://www.zener.fi/sahkomoottorit/sahkomoottori-mitat/>. Viitattu 24.4.2024.

## LIITE 1: KOMISSION ASETUS 640/2009 - NIMELLISHYÖTYSUHTEIDEN VÄHIMMÄISARVOT

Taulukko 1

Nimellishyötysuhteen ( $\eta$ ) vähimmäisarvot hyötysuhdetasolla IE2 (50 Hz)

Nimellisteho kW	Napaluku		
	2	4	6
0,75	77,4	79,6	75,9
1,1	79,6	81,4	78,1
1,5	81,3	82,8	79,8
2,2	83,2	84,3	81,8
3	84,6	85,5	83,3
4	85,8	86,6	84,6
5,5	87,0	87,7	86,0
7,5	88,1	88,7	87,2
11	89,4	89,8	88,7
15	90,3	90,6	89,7
18,5	90,9	91,2	90,4
22	91,3	91,6	90,9
30	92,0	92,3	91,7
37	92,5	92,7	92,2
45	92,9	93,1	92,7
55	93,2	93,5	93,1
75	93,8	94,0	93,7
90	94,1	94,2	94,0
110	94,3	94,5	94,3
132	94,6	94,7	94,6
160	94,8	94,9	94,8
200–375	95,0	95,1	95,0

Taulukko 2

Nimellishyötysuhteen ( $\eta$ ) vähimmäisarvot hyötysuhdetasolla IE3 (50 Hz)

Nimellisteho kW	Napaluku		
	2	4	6
0,75	80,7	82,5	78,9
1,1	82,7	84,1	81,0
1,5	84,2	85,3	82,5
2,2	85,9	86,7	84,3
3	87,1	87,7	85,6
4	88,1	88,6	86,8
5,5	89,2	89,6	88,0
7,5	90,1	90,4	89,1
11	91,2	91,4	90,3
15	91,9	92,1	91,2
18,5	92,4	92,6	91,7
22	92,7	93,0	92,2
30	93,3	93,6	92,9
37	93,7	93,9	93,3
45	94,0	94,2	93,7
55	94,3	94,6	94,1
75	94,7	95,0	94,6
90	95,0	95,2	94,9
110	95,2	95,4	95,1
132	95,4	95,6	95,4
160	95,6	95,8	95,6
200–375	95,8	96,0	95,8

## LIITE 2: KOMISSION ASETUS 2019/1781 - NIMELLISHYÖTYSUHTEIDEN VÄHIMMÄISARVOT

Taulukko 1:

Vähimmäishyötysuhteet  $\eta_n$  hyötysuhdetasolle IE2 50 Hz:n taajuudella (%)

Nimellisteho $P_N$ [kW]	Napaluku			
	2	4	6	8
0,12	53,6	59,1	50,6	39,8
0,18	60,4	64,7	56,6	45,9
0,20	61,9	65,9	58,2	47,4
0,25	64,8	68,5	61,6	50,6
0,37	69,5	72,7	67,6	56,1
0,40	70,4	73,5	68,8	57,2
0,55	74,1	77,1	73,1	61,7
0,75	77,4	79,6	75,9	66,2
1,1	79,6	81,4	78,1	70,8
1,5	81,3	82,8	79,8	74,1
2,2	83,2	84,3	81,8	77,6
3	84,6	85,5	83,3	80,0
4	85,8	86,6	84,6	81,9
5,5	87,0	87,7	86,0	83,8
7,5	88,1	88,7	87,2	85,3
11	89,4	89,8	88,7	86,9
15	90,3	90,6	89,7	88,0
18,5	90,9	91,2	90,4	88,6
22	91,3	91,6	90,9	89,1
30	92,0	92,3	91,7	89,8
37	92,5	92,7	92,2	90,3
45	92,9	93,1	92,7	90,7
55	93,2	93,5	93,1	91,0
75	93,8	94,0	93,7	91,6
90	94,1	94,2	94,0	91,9
110	94,3	94,5	94,3	92,3
132	94,6	94,7	94,6	92,6
160	94,8	94,9	94,8	93,0
200–1 000	95,0	95,1	95,0	93,5

Taulukko 2:

Vähimmäishyötysuhteet  $\eta_n$  hyötysuhdetasolle IE3 50 Hz:n taajuudella (%)

Nimellisteho $P_N$ [kW]	Napaluku			
	2	4	6	8
0,12	60,8	64,8	57,7	50,7
0,18	65,9	69,9	63,9	58,7
0,20	67,2	71,1	65,4	60,6
0,25	69,7	73,5	68,6	64,1
0,37	73,8	77,3	73,5	69,3
0,40	74,6	78,0	74,4	70,1
0,55	77,8	80,8	77,2	73,0
0,75	80,7	82,5	78,9	75,0
1,1	82,7	84,1	81,0	77,7
1,5	84,2	85,3	82,5	79,7
2,2	85,9	86,7	84,3	81,9
3	87,1	87,7	85,6	83,5
4	88,1	88,6	86,8	84,8
5,5	89,2	89,6	88,0	86,2
7,5	90,1	90,4	89,1	87,3
11	91,2	91,4	90,3	88,6
15	91,9	92,1	91,2	89,6
18,5	92,4	92,6	91,7	90,1
22	92,7	93,0	92,2	90,6
30	93,3	93,6	92,9	91,3
37	93,7	93,9	93,3	91,8
45	94,0	94,2	93,7	92,2
55	94,3	94,6	94,1	92,5
75	94,7	95,0	94,6	93,1
90	95,0	95,2	94,9	93,4
110	95,2	95,4	95,1	93,7
132	95,4	95,6	95,4	94,0
160	95,6	95,8	95,6	94,3
200–1 000	95,8	96,0	95,8	94,6

Taulukko 3:

Vähimmäishyötysuhteet  $\eta_n$  hyötysuhdetasolle IE4 50 Hz:n taajuudella (%)

Nimellisteho $P_N$ [kW]	Napaluku			
	2	4	6	8
0,12	66,5	69,8	64,9	62,3
0,18	70,8	74,7	70,1	67,2
0,20	71,9	75,8	71,4	68,4
0,25	74,3	77,9	74,1	70,8
0,37	78,1	81,1	78,0	74,3
0,40	78,9	81,7	78,7	74,9
0,55	81,5	83,9	80,9	77,0
0,75	83,5	85,7	82,7	78,4
1,1	85,2	87,2	84,5	80,8
1,5	86,5	88,2	85,9	82,6
2,2	88,0	89,5	87,4	84,5
3	89,1	90,4	88,6	85,9
4	90,0	91,1	89,5	87,1
5,5	90,9	91,9	90,5	88,3
7,5	91,7	92,6	91,3	89,3
11	92,6	93,3	92,3	90,4
15	93,3	93,9	92,9	91,2
18,5	93,7	94,2	93,4	91,7
22	94,0	94,5	93,7	92,1
30	94,5	94,9	94,2	92,7
37	94,8	95,2	94,5	93,1
45	95,0	95,4	94,8	93,4
55	95,3	95,7	95,1	93,7
75	95,6	96,0	95,4	94,2
90	95,8	96,1	95,6	94,4
110	96,0	96,3	95,8	94,7
132	96,2	96,4	96,0	94,9
160	96,3	96,6	96,2	95,1
200–249	96,5	96,7	96,3	95,4
250–314	96,5	96,7	96,5	95,4
315–1 000	96,5	96,7	96,6	95,4

## LIITE 3: KÄYNNISTYSVIRTOJEN VERTAILUTAUUKOT

3000 RPM - ABB CAST IRON PROCESS MOTOR M3BP 400/690 V 50 HZ EU

IE4 Genelec		IE3 Genelec			IE3 High-output		
Teholuokka	KV (A)	KV (A)	Muutos (%)	Muutos (%)	KV (A)	Muutos (A)	Muutos (%)
0,37 kW	-	-	-	-	-	-	-
0,55 kW	-	8,5	-	-	-	-	-
0,75 kW	-	13,43	-	-	-	-	-
1,1 kW	-	18,17	-	-	-	-	-
1,5 kW	-	22,12	-	-	-	-	-
2,2 kW	-	33,2	-	-	-	-	-
3 kW	51,84	45,36	6,48	14,29	-	-	-
4 kW	62,48	59,64	2,84	4,76	-	-	-
5,5 kW	70,68	76,63	-5,95	-7,76	-	-	-
7,5 kW	120,9	108,73	12,17	11,19	-	-	-
11 kW	161,85	137,52	24,33	17,69	-	-	-
15 kW	237,6	217,3	20,3	9,34	-	-	-
18,5 k	271,76	288	-16,24	-5,64	-	-	-
22 kW	323,85	294,06	29,79	10,13	319,2	4,65	1,46
27 kW	-	-	-	-	-	-	-
30 kW	475,64	404,32	71,32	17,64	458,49	17,15	3,74
37 kW	475,5	520,7	-45,2	-8,68	561	-85,5	-15,24
45 kW	618,4	581,08	37,32	6,42	602,16	16,24	2,70
55 kW	792,96	644,64	148,32	23,01	701,28	91,68	13,07
75 kW	941,7	941,7	0	0,00	1003,2	-61,5	-6,13
80 kW	-	-	-	-	-	-	-
90 kW	1224	1085	139	12,81	1326	-102	-7,69
110 kW	1266,3	1344	-77,7	-5,78	1485,2	-218,9	-14,74
132 kW	1785,4	1557,2	228,2	14,65	1710	75,4	4,41
160 kW	1956,4	2035	-78,6	-3,86	2113,8	-157,4	-7,45
200 kW	2264,4	2633,4	-369	-14,01	2633,4	-369	-14,01
200 kW	2553,6	2553,6	0	0,00	-	-	-
250 kW	3154	3257,1	-103,1	-3,17	3172,4	-18,4	-0,58
315 kW	4157,4	3717	440,4	11,85	4646,4	-489	-10,52
355 kW	4462,5	4341,6	120,9	2,78	-	-	-
400 kW	4806,7	4806,7	0	0,00	-	-	-
450 kW	5869,7	5869,7	0	0,00	-	-	-
500 kW	6202,5	6202,5	0	0,00	-	-	-
560 kW	7285,2	-	-	-	-	-	-
560 kW	7285,2	7285,2	0	0,00	-	-	-
560 kW	9030	7400	1630	22,03	-	-	-
630 kW	7972,4	7972,4	0	0,00	-	-	-
630 kW	7972,4	-	-	-	-	-	-
710 kW	8481,6	8481,6	0	0,00	-	-	-
710 kW	8481,6	-	-	-	-	-	-
800 kW	10623,6	10623,6	0	0,00	-	-	-
900 kW	11658,4	11658,4	0	0,00	-	-	-
1000 kW	-	-	-	-	-	-	-

3000 RPM - ABB CAST IRON PROCESS MOTOR M3BP 400/690 V 50 HZ EU

IE4 High-output		IE3 Genelec			IE3 High-output		
Teholuokka	KV (A)	KV (A)	Muutos (%)	Muutos (%)	KV (A)	Muutos (A)	Muutos (%)
0,37 kW	-	-	-	-	-	-	-
0,55 kW	-	8,5	-	-	-	-	-
0,75 kW	-	13,43	-	-	-	-	-
1,1 kW	-	18,17	-	-	-	-	-
1,5 kW	-	22,12	-	-	-	-	-
2,2 kW	-	33,2	-	-	-	-	-
3 kW	-	45,36	-	-	-	-	-
4 kW	-	59,64	-	-	-	-	-
5,5 kW	-	76,63	-	-	-	-	-
7,5 kW	-	108,73	-	-	-	-	-
11 kW	-	137,52	-	-	-	-	-
15 kW	-	217,3	-	-	-	-	-
18,5 k	-	288	-	-	-	-	-
22 kW	-	294,06	-	-	319,2	-	-
27 kW	-	-	-	-	-	-	-
30 kW	-	404,32	-	-	458,49	-	-
37 kW	-	520,7	-	-	561	-	-
45 kW	-	581,08	-	-	602,16	-	-
55 kW	-	644,64	-	-	701,28	-	-
75 kW	-	941,7	-	-	1003,2	-	-
80 kW	-	-	-	-	-	-	-
90 kW	-	1085	-	-	1326	-	-
110 kW	1612,8	1344	268,8	20,00	1485,2	127,6	8,59
132 kW	1845	1557,2	287,8	18,48	1710	135	7,89
160 kW	1782,2	2035	-252,8	-12,42	2113,8	-331,6	-15,69
200 kW	2264,4	2633,4	-369	-14,01	2633,4	-369	-14,01
200 kW	-	2553,6	-	-	-	-	-
250 kW	3262,7	3257,1	5,6	0,17	3172,4	90,3	2,85
315 kW	4646,4	3717	929,4	25,00	4646,4	0	0,00
355 kW	-	4341,6	-	-	-	-	-
400 kW	-	4806,7	-	-	-	-	-
450 kW	-	5869,7	-	-	-	-	-
500 kW	-	6202,5	-	-	-	-	-
560 kW	-	-	-	-	-	-	-
560 kW	-	7285,2	-	-	-	-	-
560 kW	-	7400	-	-	-	-	-
630 kW	-	7972,4	-	-	-	-	-
630 kW	-	-	-	-	-	-	-
710 kW	-	8481,6	-	-	-	-	-
710 kW	-	-	-	-	-	-	-
800 kW	-	10623,6	-	-	-	-	-
900 kW	-	11658,4	-	-	-	-	-
1000 kW	-	-	-	-	-	-	-

3000 RPM - ABB CAST IRON PROCESS MOTOR M3BP 400/690 V 50 HZ EU

IE4 Genelec		IE2 Genelec			IE2 High-output		
Teholuokka	KV (A)	KV (A)	Muutos (%)	Muutos (%)	KV (A)	Muutos (A)	Muutos (%)
0,37 kW	-	4,186	-	-	-	-	-
0,55 kW	-	6,579	-	-	-	-	-
0,75 kW	-	13,86	-	-	-	-	-
1,1 kW	-	18,3	-	-	-	-	-
1,5 kW	-	24,45	-	-	-	-	-
2,2 kW	-	28,56	-	-	-	-	-
3 kW	51,84	52,325	-0,485	-0,93	-	-	-
4 kW	62,48	60,912	1,568	2,57	-	-	-
5,5 kW	70,68	70	0,68	0,97	-	-	-
7,5 kW	120,9	100,01	20,89	20,89	-	-	-
11 kW	161,85	144	17,85	12,40	-	-	-
15 kW	237,6	195	42,6	21,85	-	-	-
18,5 k	271,76	236,25	35,51	15,03	-	-	-
22 kW	323,85	304,92	18,93	6,21	307,8	16,05	5,21
27 kW	-	408,32	-	-	-	-	-
30 kW	475,64	397,32	78,32	19,71	418,7	56,94	13,60
37 kW	475,5	520,7	-45,2	-8,68	-	-	-
45 kW	618,4	527,96	90,44	17,13	624,89	-6,49	-1,04
55 kW	792,96	651,44	141,52	21,72	741	51,96	7,01
75 kW	941,7	998,4	-56,7	-5,68	1006,4	-64,7	-6,43
80 kW	-	1022	-	-	-	-	-
90 kW	1224	1117,5	106,5	9,53	1162,8	61,2	5,26
110 kW	1266,3	1421,2	-154,9	-10,90	1469,4	-203,1	-13,82
132 kW	1785,4	1627,9	157,5	9,68	1657,5	127,9	7,72
160 kW	1956,4	1956,4	0	0,00	2014	-57,6	-2,86
200 kW	2264,4	2579,5	-315,1	-12,22	-	-	-
200 kW	2553,6	-	-	-	-	-	-
250 kW	3154	3257,1	-103,1	-3,17	3214,8	-60,8	-1,89
315 kW	4157,4	3717	440,4	11,85	4690,4	-533	-11,36
355 kW	4462,5	4341,6	120,9	2,78	-	-	-
400 kW	4806,7	4806,7	0	0,00	-	-	-
450 kW	5869,7	5869,7	0	0,00	-	-	-
500 kW	6202,5	6202,5	0	0,00	-	-	-
560 kW	7285,2	-	-	-	-	-	-
560 kW	7285,2	7285,2	0	0,00	-	-	-
560 kW	9030	7400	1630	22,03	-	-	-
630 kW	7972,4	7972,4	0	0,00	-	-	-
630 kW	7972,4	-	-	-	-	-	-
710 kW	8481,6	8481,6	0	0,00	-	-	-
710 kW	8481,6	-	-	-	-	-	-
800 kW	10623,6	10623,6	0	0,00	-	-	-
900 kW	11658,4	11658,4	0	0,00	-	-	-
1000 kW	-	6818	-	-	-	-	-

3000 RPM - ABB CAST IRON PROCESS MOTOR M3BP 400/690 V 50 HZ EU

IE4 High-output		IE2 Genelec			IE2 High-output		
Teholuokka	KV (A)	KV (A)	Muutos (%)	Muutos (%)	KV (A)	Muutos (A)	Muutos (%)
0,37 kW	-	4,186	-	-	-	-	-
0,55 kW	-	6,579	-	-	-	-	-
0,75 kW	-	13,86	-	-	-	-	-
1,1 kW	-	18,3	-	-	-	-	-
1,5 kW	-	24,45	-	-	-	-	-
2,2 kW	-	28,56	-	-	-	-	-
3 kW	-	52,325	-	-	-	-	-
4 kW	-	60,912	-	-	-	-	-
5,5 kW	-	70	-	-	-	-	-
7,5 kW	-	100,01	-	-	-	-	-
11 kW	-	144	-	-	-	-	-
15 kW	-	195	-	-	-	-	-
18,5 k	-	236,25	-	-	-	-	-
22 kW	-	304,92	-	-	307,8	-	-
27 kW	-	408,32	-	-	-	-	-
30 kW	-	397,32	-	-	418,7	-	-
37 kW	-	520,7	-	-	-	-	-
45 kW	-	527,96	-	-	624,89	-	-
55 kW	-	651,44	-	-	741	-	-
75 kW	-	998,4	-	-	1006,4	-	-
80 kW	-	1022	-	-	-	-	-
90 kW	-	1117,5	-	-	1162,8	-	-
110 kW	1612,8	1421,2	191,6	13,48	1469,4	143,4	9,76
132 kW	1845	1627,9	217,1	13,34	1657,5	187,5	11,31
160 kW	1782,2	1956,4	-174,2	-8,90	2014	-231,8	-11,51
200 kW	2264,4	2579,5	-315,1	-12,22	-	-	-
200 kW	-	-	-	-	-	-	-
250 kW	3262,7	3257,1	5,6	0,17	3214,8	47,9	1,49
315 kW	4646,4	3717	929,4	25,00	4690,4	-44	-0,94
355 kW	-	4341,6	-	-	-	-	-
400 kW	-	4806,7	-	-	-	-	-
450 kW	-	5869,7	-	-	-	-	-
500 kW	-	6202,5	-	-	-	-	-
560 kW	-	-	-	-	-	-	-
560 kW	-	7285,2	-	-	-	-	-
560 kW	-	7400	-	-	-	-	-
630 kW	-	7972,4	-	-	-	-	-
630 kW	-	-	-	-	-	-	-
710 kW	-	8481,6	-	-	-	-	-
710 kW	-	-	-	-	-	-	-
800 kW	-	10623,6	-	-	-	-	-
900 kW	-	11658,4	-	-	-	-	-
1000 kW	-	6818	-	-	-	-	-

1500 RPM - ABB CAST IRON PROCESS MOTOR M3BP 400/690 V 50 HZ EU

IE4 Genelec		IE3 Genelec		IE3 High-output			
Teholuokka	KV (A)	KV (A)	Muutos (A)	Muutos (%)	KV (A)	Muutos (A)	Muutos (%)
0.25 kW	-	2,88	-	-	-	-	-
0.37 6)	-	5,22	-	-	-	-	-
0.55 6)	-	7,434	-	-	-	-	-
0.75 kW	-	12,96	-	-	-	-	-
0.75 kW	-	13,272	-	-	-	-	-
1.1 kW	-	18,17	-	-	-	-	-
1.5 kW	-	26,24	-	-	-	-	-
2.2 kW	32,56	38,27	-5,71	-14,92	-	-	-
3 kW	53,68	53,1	0,58	1,09	-	-	-
4 kW	67,24	65,36	1,88	2,88	-	-	-
5.5 kW	77,38	90,44	-13,06	-14,44	-	-	-
7.5 kW	130,9	113,19	17,71	15,65	-	-	-
11 kW	164,16	160,36	3,8	2,37	-	-	-
15 kW	251,49	233,7	17,79	7,61	-	-	-
18.5 kW	298,32	251,28	47,04	18,72	308,76	-10,44	-3,38
22 kW	382,58	340,3	42,28	12,42	-	-	-
28 kW	-	463,3	-	-	-	-	-
30 kW	520,26	411	109,26	26,58	-	-	-
37 kW	501	558,4	-57,4	-10,28	540,54	-39,54	-7,31
45 kW	708,9	658,4	50,5	7,67	-	-	-
53 kW	-	843,9	-	-	-	-	-
55 kW	780	772,62	7,38	0,96	-	-	-
64 kW	-	-	-	-	-	-	-
75 kW	1014	851,2	162,8	19,13	1084,2	-70,2	-6,47
90 kW	1408	1121,8	286,2	25,51	-	-	-
110 kW	1513,2	1386	127,2	9,18	1438,1	75,1	5,22
132 kW	1848,6	1593,9	254,7	15,98	1652	196,6	11,90
160 kW	2196,2	1980,3	215,9	10,90	2146	50,2	2,34
200 kW	2629,6	2386,8	242,8	10,17	2386,8	242,8	10,17
200 kW	2518,5	2518,5	0	0,00	-	-	-
250 kW	3377,4	2784	593,4	21,31	3426,5	-49,1	-1,43
315 kW	4099,6	4015	84,6	2,11	4631,4	-531,8	-11,48
355 kW	4866,4	3880,8	985,6	25,40	-	-	-
400 kW	4760	4794	-34	-0,71	-	-	-
450 kW	5297,2	5382	-84,8	-1,58	-	-	-
500 kW	5882	5882	0	0,00	-	-	-
560 kW	7266,8	7063,2	203,6	2,88	-	-	-
560 kW	7266,8	7266,8	0	0,00	-	-	-
630 kW	8291,6	8185,2	106,4	1,30	-	-	-
630 kW	8291,6	-	-	-	-	-	-
710 kW	9325,2	9325,2	0	0,00	-	-	-
710 kW	9325,2	-	-	-	-	-	-
800 kW	9716	9772	-56	-0,57	-	-	-
900 kW	11025	11011	14	0,13	-	-	-
1000 kW	11723,2	11723,2	0	0,00	-	-	-
1100 kW	13412	-	-	-	-	-	-

1500 RPM - ABB CAST IRON PROCESS MOTOR M3BP 400/690 V 50 HZ EU

IE4 High-output		IE3 Genelec		IE3 High-output			
Teholuokka	KV (A)	KV (A)	Muutos (A)	Muutos (%)	KV (A)	Muutos (A)	Muutos (%)
0.25 kW	-	2,88	-	-	-	-	-
0.37 6)	-	5,22	-	-	-	-	-
0.55 6)	-	7,434	-	-	-	-	-
0.75 kW	-	12,96	-	-	-	-	-
0.75 kW	-	13,272	-	-	-	-	-
1.1 kW	-	18,17	-	-	-	-	-
1.5 kW	-	26,24	-	-	-	-	-
2.2 kW	-	38,27	-	-	-	-	-
3 kW	-	53,1	-	-	-	-	-
4 kW	-	65,36	-	-	-	-	-
5.5 kW	-	90,44	-	-	-	-	-
7.5 kW	-	113,19	-	-	-	-	-
11 kW	-	160,36	-	-	-	-	-
15 kW	-	233,7	-	-	-	-	-
18.5 kW	-	251,28	-	-	308,76	-	-
22 kW	-	340,3	-	-	-	-	-
28 kW	-	463,3	-	-	-	-	-
30 kW	-	411	-	-	-	-	-
37 kW	-	558,4	-	-	540,54	-	-
45 kW	-	658,4	-	-	-	-	-
53 kW	-	843,9	-	-	-	-	-
55 kW	-	772,62	-	-	-	-	-
64 kW	-	-	-	-	-	-	-
75 kW	-	851,2	-	-	1084,2	-	-
90 kW	-	1121,8	-	-	-	-	-
110 kW	1804	1386	418	30,16	1438,1	365,9	25,44
132 kW	2050,1	1593,9	456,2	28,62	1652	398,1	24,10
160 kW	-	1980,3	-	-	2146	-	-
200 kW	-	2386,8	-	-	2386,8	-	-
200 kW	-	2518,5	-	-	-	-	-
250 kW	3369,6	2784	585,6	21,03	3426,5	-56,9	-1,66
315 kW	4073,4	4015	58,4	1,45	4631,4	-558	-12,05
355 kW	-	3880,8	-	-	-	-	-
400 kW	-	4794	-	-	-	-	-
450 kW	-	5382	-	-	-	-	-
500 kW	-	5882	-	-	-	-	-
560 kW	-	7063,2	-	-	-	-	-
560 kW	-	7266,8	-	-	-	-	-
630 kW	-	8185,2	-	-	-	-	-
630 kW	-	-	-	-	-	-	-
710 kW	-	9325,2	-	-	-	-	-
710 kW	-	-	-	-	-	-	-
800 kW	-	9772	-	-	-	-	-
900 kW	-	11011	-	-	-	-	-
1000 kW	-	11723,2	-	-	-	-	-
1100 kW	-	-	-	-	-	-	-

1500 RPM - ABB CAST IRON PROCESS MOTOR M3BP 400/690 V 50 HZ EU

IE4 Genelec		IE2 Genelec		IE2 High-output			
Teholuokka	KV (A)	KV (A)	Muutos (A)	Muutos (%)	KV (A)	Muutos (A)	Muutos (%)
0.25 kW	-	3,572	-	-	-	-	-
0.37 6)	-	4,992	-	-	-	-	-
0.55 6)	-	6,966	-	-	-	-	-
0.75 kW	-	-	-	-	-	-	-
0.75 kW	-	11,466	-	-	-	-	-
1.1 kW	-	15,34	-	-	-	-	-
1.5 kW	-	18,9	-	-	-	-	-
2.2 kW	32,56	35,42	-2,86	-8,07	-	-	-
3 kW	53,68	46,97	6,71	14,29	-	-	-
4 kW	67,24	55,58	11,66	20,98	-	-	-
5.5 kW	77,38	76,68	0,7	0,91	-	-	-
7.5 kW	130,9	104,4	26,5	25,38	-	-	-
11 kW	164,16	142,12	22,04	15,51	-	-	-
15 kW	251,49	202,35	49,14	24,28	-	-	-
18.5 kW	298,32	248,4	49,92	20,10	263,72	34,6	13,12
22 kW	382,58	298,57	84,01	28,14	281,52	101,06	35,90
28 kW	-	-	-	-	-	-	-
30 kW	520,26	409,22	111,04	27,13	412,45	107,81	26,14
37 kW	501	482,8	18,2	3,77	477,12	23,88	5,01
45 kW	708,9	609,75	99,15	16,26	627	81,9	13,06
53 kW	-	-	-	-	-	-	-
55 kW	780	692,3	87,7	12,67	734,82	45,18	6,15
64 kW	-	920	-	-	-	-	-
75 kW	1014	1054,9	-40,9	-3,88	978,2	35,8	3,66
90 kW	1408	1207,5	200,5	16,60	1206,2	201,8	16,73
110 kW	1513,2	1326	187,2	14,12	1466,8	46,4	3,16
132 kW	1848,6	1534,3	314,3	20,48	1624	224,6	13,83
160 kW	2196,2	1974	222,2	11,26	2101,6	94,6	4,50
200 kW	2629,6	-	-	-	-	-	-
200 kW	2518,5	2527,2	-8,7	-0,34	-	-	-
250 kW	3377,4	3138,2	239,2	7,62	3278,2	99,2	3,03
315 kW	4099,6	4015	84,6	2,11	4360,2	-260,6	-5,98
355 kW	4866,4	4175,2	691,2	16,55	-	-	-
400 kW	4760	4794	-34	-0,71	-	-	-
450 kW	5297,2	5382	-84,8	-1,58	-	-	-
500 kW	5882	5882	0	0,00	-	-	-
560 kW	7266,8	7063,2	203,6	2,88	-	-	-
560 kW	7266,8	7266,8	0	0,00	-	-	-
630 kW	8291,6	8185,2	106,4	1,30	-	-	-
630 kW	8291,6	-	-	-	-	-	-
710 kW	9325,2	9325,2	0	0,00	-	-	-
710 kW	9325,2	-	-	-	-	-	-
800 kW	9716	9772	-56	-0,57	-	-	-
900 kW	11025	11011	14	0,13	-	-	-
1000 kW	11723,2	11723,2	0	0,00	-	-	-
1100 kW	13412	-	-	-	-	-	-

1500 RPM - ABB CAST IRON PROCESS MOTOR M3BP 400/690 V 50 HZ EU

IE4 High-output		IE2 Genelec		IE2 High-output			
Teholuokka	KV (A)	KV (A)	Muutos (A)	Muutos (%)	KV (A)	Muutos (A)	Muutos (%)
0.25 kW	-	3,572	-	-	-	-	-
0.37 6)	-	4,992	-	-	-	-	-
0.55 6)	-	6,966	-	-	-	-	-
0.75 kW	-	-	-	-	-	-	-
0.75 kW	-	11,466	-	-	-	-	-
1.1 kW	-	15,34	-	-	-	-	-
1.5 kW	-	18,9	-	-	-	-	-
2.2 kW	-	35,42	-	-	-	-	-
3 kW	-	46,97	-	-	-	-	-
4 kW	-	55,58	-	-	-	-	-
5.5 kW	-	76,68	-	-	-	-	-
7.5 kW	-	104,4	-	-	-	-	-
11 kW	-	142,12	-	-	-	-	-
15 kW	-	202,35	-	-	-	-	-
18.5 kW	-	248,4	-	-	263,72	-	-
22 kW	-	298,57	-	-	281,52	-	-
28 kW	-	-	-	-	-	-	-
30 kW	-	409,22	-	-	412,45	-	-
37 kW	-	482,8	-	-	477,12	-	-
45 kW	-	609,75	-	-	627	-	-
53 kW	-	-	-	-	-	-	-
55 kW	-	692,3	-	-	734,82	-	-
64 kW	-	920	-	-	-	-	-
75 kW	-	1054,9	-	-	978,2	-	-
90 kW	-	1207,5	-	-	1206,2	-	-
110 kW	1804	1326	478	36,05	1466,8	337,2	22,99
132 kW	2050,1	1534,3	515,8	33,62	1624	426,1	26,24
160 kW	-	1974	-	-	2101,6	-	-
200 kW	-	-	-	-	-	-	-
200 kW	-	2527,2	-	-	-	-	-
250 kW	3369,6	3138,2	231,4	7,37	3278,2	91,4	2,79
315 kW	4073,4	4015	58,4	1,45	4360,2	-286,8	-6,58
355 kW	-	4175,2	-	-	-	-	-
400 kW	-	4794	-	-	-	-	-
450 kW	-	5382	-	-	-	-	-
500 kW	-	5882	-	-	-	-	-
560 kW	-	7063,2	-	-	-	-	-
560 kW	-	7266,8	-	-	-	-	-
630 kW	-	8185,2	-	-	-	-	-
630 kW	-	-	-	-	-	-	-
710 kW	-	9325,2	-	-	-	-	-
710 kW	-	-	-	-	-	-	-
800 kW	-	9772	-	-	-	-	-
900 kW	-	11011	-	-	-	-	-
1000 kW	-	11723,2	-	-	-	-	-
1100 kW	-	-					

1000 RPM - ABB CAST IRON PROCESS MOTOR M3BP 400/690 V 50 HZ EU

IE4 Genelec		IE3 Genelec		IE3 High-output			
Teholuokka	KV (A)	KV (A)	Muutos (A)	Muutos (%)	KV (A)	Muutos (A)	Muutos (%)
0.18 kW	-	-	-	-	-	-	-
0.25 kW	-	-	-	-	-	-	-
0.37 kW	-	4.6	-	-	-	-	-
0.55 kW	-	-	-	-	-	-	-
0.75 kW	-	8.64	-	-	-	-	-
1.1 kW	-	12.22	-	-	-	-	-
1.1 kW	-	10.66	-	-	-	-	-
1.5 kW	20.46	26.6	-6.14	-23.08	-	-	-
1.5 kW	-	26.6	-	-	-	-	-
2.2 kW	34	27.54	6.46	23.46	-	-	-
2.2 kW	-	33.8	-	-	-	-	-
3 kW	33.63	40.71	-7.08	-17.39	-	-	-
4 kW	44.24	52.08	-7.84	-15.05	-	-	-
5.5 6)	67.86	60.5	7.36	12.17	-	-	-
7.5 kW	112.18	120.08	-7.9	-6.58	-	-	-
11 kW	166.44	199.75	-33.31	-16.68	-	-	-
15 kW	237.54	167.2	70.34	42.07	-	-	-
18.5 kW	279.45	279.75	-0.3	-0.11	274.04	5.41	1.97
22 kW	380.99	335.4	45.59	13.59	-	-	-
30 kW	432.16	448.72	-16.56	-3.69	-	-	-
37 kW	636.4	523.6	112.8	21.54	578.27	58.13	10.05
45 kW_	606.75	606.8	-0.05	-0.01	698.4	-91.65	-13.12
55 kW	675.92	742.5	-66.58	-8.97	-	-	-
75 kW	966	924.8	41.2	4.46	1026	-60	-5.85
90 kW	1224	1180.8	43.2	3.66	1299.6	-75.6	-5.82
110 kW	1393.8	1467.3	-73.5	-5.01	1561.4	-167.6	-10.73
132 kW	1676.7	1676.7	0	0.00	-	-	-
160 kW	2058	1956.4	101.6	5.19	2363.4	-305.4	-12.92
180 kW	-	-	-	-	-	-	-
200 kW	2679.1	2445.5	233.6	9.55	2604	75.1	2.88
250 kW	3237.6	3404	-166.4	-4.89	-	-	-
315 kW	3974.4	3990	-15.6	-0.39	-	-	-
355 kW	5143.6	4989.6	154	3.09	-	-	-
400 kW	5602.5	5212.8	389.7	7.48	-	-	-
400 kW	5602.5	5190.1	412.4	7.95	-	-	-
450 kW	6889	6060.6	828.4	13.67	-	-	-
450 kW	6889	-	-	-	-	-	-
500 kW	7105.8	6415.2	690.6	10.77	-	-	-
500 kW	7105.8	-	-	-	-	-	-
560 kW	7281.6	7281.6	0	0.00	-	-	-
560 kW	7281.6	-	-	-	-	-	-
630 kW	8595	7325.5	1269.5	17.33	-	-	-
710 kW	8708	8708	0	0.00	-	-	-
800 kW	10188	10188	0	0.00	-	-	-
900 kW	10521	-	-	-	-	-	-
950 kW	11792	-	-	-	-	-	-

1000 RPM - ABB CAST IRON PROCESS MOTOR M3BP 400/690 V 50 HZ EU

IE4 High-output		IE3 Genelec		IE3 High-output			
Teholuokka	KV (A)	KV (A)	Muutos (A)	Muutos (%)	KV (A)	Muutos (A)	Muutos (%)
0.18 kW	-	-	-	-	-	-	-
0.25 kW	-	-	-	-	-	-	-
0.37 kW	-	4.6	-	-	-	-	-
0.55 kW	-	-	-	-	-	-	-
0.75 kW	-	8.64	-	-	-	-	-
1.1 kW	-	12.22	-	-	-	-	-
1.1 kW	-	10.66	-	-	-	-	-
1.5 kW	-	26.6	-	-	-	-	-
1.5 kW	-	26.6	-	-	-	-	-
2.2 kW	-	27.54	-	-	-	-	-
2.2 kW	-	33.8	-	-	-	-	-
3 kW	-	40.71	-	-	-	-	-
4 kW	-	52.08	-	-	-	-	-
5.5 6)	-	60.5	-	-	-	-	-
7.5 kW	-	120.08	-	-	-	-	-
11 kW	-	199.75	-	-	-	-	-
15 kW	-	167.2	-	-	-	-	-
18.5 kW	-	279.75	-	-	274.04	-	-
22 kW	-	335.4	-	-	-	-	-
30 kW	-	448.72	-	-	-	-	-
37 kW	-	523.6	-	-	-	-	-
45 kW_	-	606.8	-	-	698.4	-	-
55 kW	-	742.5	-	-	-	-	-
75 kW	987	924.8	62.2	6.73	1026	-39	-3.80
90 kW	-	1180.8	-	-	1299.6	-	-
110 kW	-	1467.3	-	-	1561.4	-	-
132 kW	-	1676.7	-	-	-	-	-
160 kW	2197.8	1956.4	241.4	12.34	2363.4	-165.6	-7.01
180 kW	-	-	-	-	-	-	-
200 kW	2604	2445.5	158.5	6.48	2604	0	0.00
250 kW	-	3404	-	-	-	-	-
315 kW	-	3990	-	-	-	-	-
355 kW	-	4989.6	-	-	-	-	-
400 kW	-	5212.8	-	-	-	-	-
400 kW	-	5190.1	-	-	-	-	-
450 kW	-	6060.6	-	-	-	-	-
450 kW	-	-	-	-	-	-	-
500 kW	-	6415.2	-	-	-	-	-
500 kW	-	-	-	-	-	-	-
560 kW	-	7281.6	-	-	-	-	-
560 kW	-	-	-	-	-	-	-
630 kW	-	7325.5	-	-	-	-	-
710 kW	-	8708	-	-	-	-	-
800 kW	-	10188	-	-	-	-	-
900 kW	-	-	-	-	-	-	-
950 kW	-	-	-	-	-	-	-

1000 RPM - ABB CAST IRON PROCESS MOTOR M3BP 400/690 V 50 HZ EU

IE4 Genelec		IE2 Genelec		IE2 High-output			
Teholuokka	KV (A)	KV (A)	Muutos (A)	Muutos (%)	KV (A)	Muutos (A)	Muutos (%)
0.18 kW	-	1.798	-	-	-	-	-
0.25 kW	-	2.805	-	-	-	-	-
0.37 kW	-	4.576	-	-	-	-	-
0.55 kW	-	6.248	-	-	-	-	-
0.75 kW	-	10.35	-	-	-	-	-
1.1 kW	-	12	-	-	-	-	-
1.1 kW	-	-	-	-	-	-	-
1.5 kW	20.46	15.91	4.55	28.60	-	-	-
1.5 kW	-	-	-	-	-	-	-
2.2 kW	34	24.2	9.8	40.50	-	-	-
2.2 kW	-	-	-	-	-	-	-
3 kW	33.63	44	-10.37	-23.57	-	-	-
4 kW	44.24	50	-5.76	-11.52	-	-	-
5.5 6)	67.86	65.79	2.07	3.15	-	-	-
7.5 kW	112.18	113.96	-1.78	-1.56	-	-	-
11 kW	166.44	168.75	-2.31	-1.37	-	-	-
15 kW	237.54	182.7	54.84	30.02	228.49	9.05	3.96
18.5 kW	279.45	243.88	35.57	14.59	215.76	63.69	29.52
22 kW	380.99	277.2	103.78	37.44	-	-	-
30 kW	432.16	393.4	38.76	9.85	391.23	40.93	10.46
37 kW	636.4	475.32	161.08	33.89	456.06	180.34	39.54
45 kW_	606.75	579.36	27.39	4.73	540.16	66.59	12.33
55 kW	675.92	765	-89.08	-11.64	717.1	-41.18	-5.74
75 kW	966	966	0	0.00	1000.1	-34.1	-3.41
90 kW	1224	1183	41	3.47	1207	17	1.41
110 kW	1393.8	1496.5	-102.7	-6.86	1537.5	-143.7	-9.35
132 kW	1676.7	1800	-123.3	-6.85	-	-	-
160 kW	2058	2037	21	1.03	2182.5	-124.5	-5.70
180 kW	-	2427.2	-	-	-	-	-
200 kW	2679.1	2620.8	58.3	2.22	2448	231.1	9.44
250 kW	3237.6	3404	-166.4	-4.89	-	-	-
315 kW	3974.4	3990	-15.6	-0.39	-	-	-
355 kW	5143.6	5000.8	142.8	2.86	-	-	-
400 kW	5602.5	5212.8	389.7	7.48	-	-	-
400 kW	5602.5	5190.1	412.4	7.95	-	-	-
450 kW	6889	6060.6	828.4	13.67	-	-	-
450 kW	6889	-	-	-	-	-	-
500 kW	7105.8	6415.2	690.6	10.77	-	-	-
500 kW	7105.8	-	-	-	-	-	-
560 kW	7281.6	7281.6	0	0.00	-	-	-
560 kW	7281.6	-	-	-	-	-	-
630 kW	8595	7325.5	1269.5	17.33	-	-	-
710 kW	8708	8708	0	0.00	-	-	-
800 kW	10188	10188	0	0.00	-	-	-
900 kW	10521	-	-	-	-	-	-
950 kW	11792	-	-	-	-	-	-

1000 RPM - ABB CAST IRON PROCESS MOTOR M3BP 400/690 V 50 HZ EU

IE4 High-output		IE2 Genelec		IE2 High-output			
Teholuokka	KV (A)	KV (A)	Muutos (A)	Muutos (%)	KV (A)	Muutos (A)	Muutos (%)
0.18 kW	-	1.798	-	-	-	-	-
0.25 kW	-	2.805	-	-	-	-	-
0.37 kW	-	4.576	-	-	-	-	-
0.55 kW	-	6.248	-	-	-	-	-
0.75 kW	-	10.35	-	-	-	-	-
1.1 kW	-	12	-	-	-	-	-
1.1 kW	-	-	-	-	-	-	-
1.5 kW	-	15.91	-	-	-	-	-
1.5 kW	-	-	-	-	-	-	-
2.2 kW	-	24.2	-	-	-	-	-
2.2 kW	-	-	-	-	-	-	-
3 kW	-	44	-	-	-	-	-
4 kW	-	50	-	-	-	-	-
5.5 6)	-	65.79	-	-	-	-	-
7.5 kW	-	113.96	-	-	-	-	-
11 kW	-	168.75	-	-	-	-	-
15 kW	-	182.7	-	-	228.49	-	-
18.5 kW	-	243.88	-	-	215.76	-	-
22 kW	-	277.2	-	-	-	-	-
30 kW	-	393.4	-	-	391.23	-	-
37 kW	-	475.32	-	-	456.06	-	-
45 kW_	-	579.36	-	-	540.16	-	-
55 kW	-	765	-	-	717.1	-	-
75 kW	987	966	21	2.17	1000.1	-13.1	-1.31
90 kW	-	1183	-	-	1207	-	-
110 kW	-	1496.5	-	-	1537.5	-	-
132 kW	-	1800	-	-	-	-	-
160 kW	2197.8	2037	160.8	7.89	2182.5	15.3	0.70
180 kW	-	2427.2	-	-	-	-	-
200 kW	2604	2620.8	-16.8	-0.64	2448	156	6.37
250 kW	-	3404	-	-	-	-	-
315 kW	-	3990	-	-	-	-	-
355 kW	-	5000.8	-	-	-	-	-
400 kW	-	5212.8	-	-	-	-	-
400 kW	-	5190.1	-	-	-	-	-
450 kW	-	6060.6	-	-	-	-	-
450 kW	-	-	-	-	-	-	-
500 kW	-	6415.2	-	-	-	-	-
500 kW	-	-	-	-	-	-	-
560 kW	-	7281.6	-	-	-	-	-
560 kW	-	-	-	-	-	-	-
630 kW	-	7325.5	-	-	-	-	-
710 kW	-	8708	-	-	-	-	-
800 kW	-	10188	-	-	-	-	-
900 kW	-	-	-	-	-	-	-
950 kW	-	-	-	-	-	-	-

