TAAJUUSMUUTTAJAN LUOMIEN AIKAHARMONISTEN KOMPONENTTIEN AIHEUTTAMAT LISÄHÄVIÖT KIERTOKENTTÄKONEISSA

Lappeenrannan–Lahden teknillinen yliopisto LUT

Sähkötekniikan diplomityö

2026

Luukas Järvensivu

Tarkastajat: Professori Lassi Aarniovuori

Tutkijatohtori Hannu S. Kärkkäinen

TIIVISTELMÄ

Lappeenrannan–Lahden teknillinen yliopisto LUT

LUTin energiajärjestelmien tiedekunta

Sähkötekniikka

Luukas Järvensivu

Taajuusmuuttajan luomien aikaharmonisten komponenttien aiheuttamat lisähäviöt kiertokenttäkoneissa

Sähkötekniikan diplomityö

2026

50 sivua, 3 kuvaa, 2 taulukkoa ja 1 liite

Tarkastajat: Professori Lassi Aarniovuori ja Tutkijatohtori Hannu S. Kärkkäinen

Avainsanat: oikosulkumoottori, taajuusmuuttaja, pulssinleveysmodulaatio (PWM), aikaharmoniset lisähäviöt, rautahäviöt, pyörrevirtahäviöt, virranahto, läheisyysvaikutus, sähkökäytöt, energiatehokkuus

Sähkökäytöt muodostavat suurimman teollisuuden sähkökuorman. Energiatehokkuuden saavuttamiseksi nykyaikaiset prosessit varustetaan usein säädettävillä taajuusmuuttajilla, mutta niiden tuottama pulssinleveysmoduloitu (PWM) jännite poikkeaa puhtaasta sinisyötöstä ja indusoi sähkökoneeseen korkeataajuisia aikaharmonisia yliaaltoja. Nämä yliaallot synnyttävät moottorissa ylimääräisiä energiahäviöitä, jotka kasvattavat laitteen lämpökuormaa ja heikentävät hyötysuhdetta. Tämän diplomityön tavoitteena oli selvittää järjestelmällisen kirjallisuustutkimuksen avulla taajuusmuuttajasyötön aiheuttamien aikaharmonisten lisähäviöiden teoreettiset perusteet, tunnistaa niihin vaikuttavat keskeiset parametrit sekä kartoittaa alan kokeellisia ja laskennallisia tutkimusmenetelmiä.

Tutkimus toteutettiin järjestelmällisenä kirjallisuustutkimuksena IEEE-tutkimustietokannasta. Vertailukelpoisen ja käytännön teollisuutta vastaavan aineiston varmistamiseksi tutkimus rajattiin koskemaan yksinomaan kolmivaiheisia häkkioikosulkumoottoreita laajalla 1,1-55 kilowatin tehoalueella sekä tavanomaisia kaksitasoisia jännitevälipiirillisiä vaihtosuuntaajia (2L-VSI). Kerätystä empiirisestä aineistosta suoritettiin kattava kvantitatiivinen synteesi, ja aikaharmonisten lisähäviöiden käyttäytymistä suhteessa moottorin nimellistehoon mallinnettiin tilastollisen regressioanalyysin avulla.

Tulokset osoittavat, että siirtyminen sinisyötöstä PWM-syöttöön kasvattaa moottorin rautahäviöitä, ja lisärasitus kohdistuu lähes täysin klassisiin pyörrevirtahäviöihin, joiden on mitattu olevan PWM-syötöllä jopa 1,388 kertaa suuremmat kuin puhtaalla sinisyötöllä. Hävi-

öiden jakautuminen koneen rakenteisiin on epätasaista: PWM-syöttö kasvattaa häviöitä paikallisesti staattorin hampaistossa 73 %, ja osa lämpökuormasta (tyhjäkäynnillä 15-25 % kokonaisrautahäviöistä) siirtyy suoraan roottoriin. Invertterin kytkentätaajuuden nostaminen pienentää yliaaltoja ja siten harmonisia häviöitä, mutta hyöty on epälineaarinen ja saturoituva. Aikaharmoniset lisähäviöt ovat suhteellisen riippumattomia mekaanisesta kuormituksesta, minkä vuoksi niiden prosentuaalinen osuus kokonaishäviöistä nousee jyrkästi osakuormilla ajettaessa. Kvantitatiivisen analyysin pohjalta muodostettiin lineaarinen regressiomalli: $y = 4{,}9955x + 8{,}1683$, missä x on moottorin nimellisteho (kW) ja y ennustettu aikaharmoninen lisähäviö (W).

Mallin selitysaste (R^2) on 0,8436, ja se osoittaa suhteellisten aikaharmonisten lisähäviöiden asettuvan vakaasti 0,4 %:n ja 0,8 %:n välille moottorin kilpiarvosta kokoluokasta riippumatta. Johtopäätöksenä todetaan, että sähkökäytön energiatehokkuuden maksimointi edellyttää aina kokonaisvaltaista järjestelmän tarkastelua, sillä optimitilanne on kuitenkin kompromissi invertterin kytkentähäviöiden ja moottorin harmonisten häviöiden välillä. Työssä kehitettyä regressioyhtälöä voidaan hyödyntää käytännönläheisenä työkaluna sähkökäyttöjen mitoituksessa.

ABSTRACT

Lappeenranta–Lahti University of Technology LUT

LUT School of Energy Systems

Electrical Engineering

Luukas Järvensivu

Additional time-harmonic losses induced by frequency converters in rotating field machines

Master's thesis

2026

50 pages, 3 figures, 2 tables and 1 appendix

Examiners: Professor Lassi Aarniovuori and Postdoctoral Researcher Hannu S. Kärkkäinen

Keywords: induction motor, frequency converter, pulse width modulation (PWM), time-harmonic losses, core losses, eddy current losses, skin effect, proximity effect, electric drives, energy efficiency

Electric motors use most of the electricity consumed by industry. To save energy, modern factories often use frequency converters to control these motors. However, these converters produce pulse-width modulated (PWM) voltage waves instead of perfect sine waves. This introduces high-frequency harmonics into the system. These harmonics cause extra power losses, which heat up the motor and lower its efficiency. The goal of this Master's thesis was to study the theory behind these extra losses in rotating field machines. The thesis uses a systematic literature review to find out which parameters affect the losses, and how they are measured and modeled in previous research.

The research is based on a systematic literature review of scientific papers from the IEEE database. The scope is limited only to three-phase squirrel-cage induction motors between 1.1 kW and 55 kW. These motors are driven by standard two-level inverters (2L-VSIs). Data was collected from these studies and analyzed. Then, a statistical linear regression model was created to show the relationship between the motor's nominal power and its extra losses.

Using a PWM inverter instead of a perfect sine wave increases core losses significantly. This extra stress mostly causes eddy current losses, which can be 1.388 times higher than with a sine wave. These losses are not spread evenly inside the motor structure. For example, core losses increase by up to 73% in the stator teeth. Also, a large part of the heat goes straight to the rotor, where extra losses make up 15-25% of the total core losses under no-load conditions. Increasing the converter's switching frequency helps reduce these losses, but this benefit slows down at higher frequencies. At a constant speed, the absolute extra losses do not change much with the mechanical load. Therefore, their relative share of the total losses

grows very fast at low loads. Based on the data, a strong linear regression model was built: $y = 4.9955x + 8.1683$, where x is the motor's power (kW) and y is the extra loss (W). The model's accuracy is high ($R^2 = 0.8436$). It proves that the extra losses stay between 0.4% and 0.8% of the motor's rated power, regardless of the motor's size.

To make a drive system efficient, engineers must look at the whole system. The best operating point is a compromise because a higher switching frequency reduces motor losses but increases converter losses. The linear regression equation from this thesis is a simple and practical tool for engineers. In the early design phase, it helps them quickly estimate the extra losses without simulations or tests.

KÄSITTEET

Aika-askellus	Time-step
Hystereesin alisilmukat	Minor hysteresis loops
Kolmivaiheinen kuristin	Line reactor
Käämivuo	Flux linkage
Lisähäviöt	Excess losses & additional losses
Läheisyysvaikutus	Proximity effect
Monitasoinen invertteri	Multilevel Inverter (MLI)
Perinteiset lisähäviöt	Stray load loss
Pyörrevirtahäviöt	Eddy current losses
Rautahäviöt	Core losses
Suorasyöttö verkosta	Direct-On-Line (DOL)
Sähköisten häviöiden minimointitekniikat	Electrical Loss Minimization Techniques (ELMT)
Tilastollinen häviöteoria	Statistical Theory of Losses (STL)
Virranahto	Skin effect
Virtarippeli	Current ripple
Vuo-ohje	Flux reference
Ylimääräiset korkeataajuiset harmoniset häviöt	Additional high-frequency harmonic losses

KÄYTETYT MERKINNÄT JA LYHENTEET

Lyhenne / Merkintä	Selitys
2L-VSI	Kaksitasoinen jännitelähdevaihtosuuntaaja (Two-Level Voltage Source Inverter)
A	Konekohtainen kuparihäviökerroin
AC	Vaihtovirta (Alternating Current)
B	Magneettivuon tiheys (T) / Konekohtainen rautahäviökerroin
B_p	Magneettivuon tiheyden huippuarvo (T)
B_r	Jäännösvuontiheys (T)
CPM	Kynsipolakone (Claw-Pole Machine)
DC	Tasavirta (Direct Current)
DFT	Diskreetti Fourier-muunnos (Discrete Fourier Transform)
DOL	Suorakäynnistys (Direct-On-Line)
EESM	Vierasmagnetoitu tahtikone (Electrically Excited Synchronous Machine)
ELMT	Sähköisten häviöiden minimointitekniikat (Electrical Loss Minimization Techniques)
f	Taajuus (Hz)
f_e	Perustaajuus (fundamental frequency) (Hz)
$f_\mathrm{k}, f_\mathrm{n}$	Yliaallon / harmonisen komponentin taajuus (Hz)

Lyhenne / Merkintä	Selitys
f_s	Kytkentätaajuus (switching frequency) (Hz, kHz)
FEA	Elementtimenetelmäanalyysi (Finite Element Analysis)
FEM	Elementtimenetelmä (Finite Element Method)
G	Dimensioton vakio magneettisessa häviöteoriassa (0,1356)
GaN	Galliumnitridi
I_h, I_k, I_n	Harmonisen virrakomponentin tehollisarvo (A)
IM	Oikosulkumoottori (Induction Motor)
k_e	Pyörrevirtahäviökerroin
k_h	Hystereesihäviökerroin
MLI	Monitasoinen invertteri (Multilevel Inverter)
P_{DC}	Tasavirtakomponentin pätöteho (W)
P_{el}	Sähköinen ottoteho / pätöteho (W, kW)
$P_{el,tot}$	Kokonaissähköteho (W, kW)
P_{HL}	Aikaharmoniset lisähäviöt (inverter-induced harmonic losses) (W, kW)
$P_{hystereesi}$	Hystereesihäviöteho (W, kW)
P_{loss}	Tehohäviö (W, kW)
P_m	Mekaaninen antoteho (W, kW)

Lyhenne / Merkintä	Selitys
P_{n}	Harmoninen tehohäviö kertaluvulle n (W)
$P_{\mathrm{Pyörrevirta}}$	Pyörrevirtahäviöteho (W, kW)
P_{tot}	Puhtaan sinisyötön kokonaishäviöteho (W, kW)
$P_{\mathrm{tot,Con}}$	Invertterikäytön kokonaishäviöteho (W, kW)
PM	Kestomagneetti (Permanent Magnet)
PMSM	Kestomagneettitahtikone (Permanent Magnet Synchronous Machine)
PWM	Pulssinleveysmodulaatio (Pulse Width Modulation)
R^2	Selitysaste tilastollisessa regressioanalyysissä
r_{HL}	Harmoninen häviösuhde (%)
RMS	Tehollisarvo (Root Mean Square)
S	Levynäytteen poikkipinta-ala (m^2)
SiC	Piikarbidi
STL	Tilastollinen häviöteoria (Statistical Theory of Losses)
SVM / SV-PWM	Avaruusvektorimodulaatio (Space Vector Modulation / Space Vector PWM)
THD	Harmoninen kokonaissärö (Total Harmonic Distortion)
$\mathrm{THD_I}$	Virran harmoninen kokonaissärö
$\mathrm{THD_U}$	Jännitteen harmoninen kokonaissärö

Lyhenne / Merkintä	Selitys
$U_{\mathrm{DC}}, U_{\mathrm{dc}}$	Tasajännitevälipiirin jännite (DC-link voltage) (V)
V_0	Tilastollinen materiaalirakennetta kuvaava parametri häviöteoriassa
$V_{\mathrm{h}}, V_{\mathrm{k}}, V_{\mathrm{n}}$	Harmonisen jännitekomponentin tehollisarvo (V)
VSD	Nopeussäädettävä sähkökäyttö (Variable Speed Drive)
W_{exc}	Excess- eli lisähäviökomponentti (W, J)
WBG	Leveän kaistavälin puolijohde (Wide-Bandgap)
WLTC	Maailmanlaajuinen keveiden ajoneuvojen testimenetelmä (World-wide Harmonized Light Vehicles Test Cycle)
x	Moottorin nimellisteho regressiomallissa (kW)
y	Ennustettu aikaharmoninen lisähäviö regressiomallissa (W)
α	Taajuuseksponentti kupari- tai rautahäviömalleissa
β	Vuontiheyden tai taajuuden eksponentti
ΔP_{tot}	Moottorin kokonaishäviöiden muutos / kokonaishäviöt (W, kW)
μ_{r}	Suhteellinen permeabiliteetti
ρ	Materiaalin resistiivisyys (Ω ·m)
σ	Materiaalin sähkönjohtavuus (S/m)
$\phi_{\mathrm{h}}, \phi_{\mathrm{k}}, \phi_{\mathrm{n}}$	Jännitteen ja virran välinen vaihekulma yliaalloilla (rad, °)

ILMOITUKSET

Turnitin

Tämän opinnäytetyön alkuperäisyys on tarkistettu Turnitin – samankaltaisuuden tarkastus-palvelun avulla.

Tekoäly

Tämän opinnäytetyön kirjoittaja Luukas Järvensivu on käyttänyt seuraavia tekoälytyökaluja opinnäytetyön tekemisessä:

1. Google Gemini
    a. Työkalun käytön tarkoitus: Tekstin sujuvoittaminen, kielenhuolto, rakenteen ideointi ja laajemman lähdeaineiston teemojen jäsentely diplomityöprosessin tukena.
    b. Selvitys työkalun käytöstä: Työkalua on käytetty pääasiassa oman tekstin kielenhuoltoon, lauserakenteiden sujuvoittamiseen sekä englanninkielisen terminologian kääntämisen tukena. Lisäksi tekoälyä on käytetty sparrailu-kumppanina työn rakenteen ideoinnissa sekä joidenkin lähteiden ydinkohtien nopeammassa hahmottamisessa.

Vastuu

Kirjoittaja, Luukas Järvensivu, ottaa täyden vastuun tämän opinnäytetyön sisällöstä ja on tarkistanut ja muokannut mahdollisen tekoälytyökalujen käytön myötä syntyneen sisällön.

Sisällysluettelo

Tiivistelmä

Abstract

Käsitteet

Käytetyt merkinnät ja lyhenteet

Ilmoitukset

1 Johdanto 14
1.1 Tausta & Motivaatio 14
1.2 Työn rajaukset 15
1.3 Tutkimuskysymykset 15
1.4 Menetelmän perustelu 16
2 Teoreettinen tausta 17
2.1 Taajuusmuuttajakäytöt teollisuudessa 17
2.2 PWM-syötön ja sinisyötön ero häviöiden kannalta 18
2.3 Rautahäviöt: pyörrevirta, hystereesi, excess 20
2.3.1 Hystereesihäviöt 21
2.3.2 Pyörrevirtahäviöt 21
2.3.3 Excess, eli lisähäviöt 22
2.3.4 Taajuuden ja kuormituksen yhteisvaikutus 22
2.4 Virranahto & läheisyysvaikutus 23
3 Kirjallisuustutkimus 25
3.1 Tutkimus- ja mittausmenetelmät kirjallisuudessa 25
3.1.1 Sähköiset suureet: Input-output-menetelmä ja epäsuora menetelmä 25
3.1.2 Kalorimetri ja lämpötilaan perustuvat menetelmät 26
3.1.3 FEM, analyyttiset mallit ja muu mallinnus tai simulointi 26
3.2 Vaikuttavat parametrit ja suureet 28
3.2.1 Syöttötaajuus ja kytkentätaajuus 28
3.2.2 Lämpötila 29
3.2.3 Kuormittava vääntömomentti ja virta 30

3.2.4 Vuo-ohje 30
3.2.5 Materiaalit ja moottorin rakenne 31
4 Kirjallisuusdatan analysointi 32
4.1 Aineiston rajaukset ja valintaperusteet 32
4.2 Tutkitut konetyypit ja teholuokat 33
4.3 Syöttöparametrit, modulaatiomenetelmät ja kytkentätaajuudet 35
4.4 Tutkimustulosten synteesi ja parametrien vaikutus häviöihin 37
4.4.1 Kytkentätaajuuden merkitys 37
4.4.2 Kuormituksen merkitys 38
4.4.3 Häviöiden suuruusluokka 38
4.4.4 Harmonisten lisähäviöiden suhde moottorin nimellistehoon 39
5 Yhteenveto ja johtopäätökset 42
5.1 Tutkimuksen tausta ja tavoitteet 42
5.2 Keskeiset tutkimustulokset ja parametrien vaikutukset 42
5.2.1 Kytkentätaajuuden ja suodatuksen merkitys 42
5.2.2 Kuormituksen vaikutus ja osakuormakäyttö 43
5.2.3 Häviöiden suuruusluokka ja komponenttitason erittely 43
5.3 Nimellistehon ja harmonisten lisähäviöiden suhde (Regressiomalli) 44
5.4 Johtopäätökset 44
Lähteet 46
Liite 14

Liite

Liite 1. Kirjallisuustutkimustaulukot

1 Johdanto

Sähkömoottorit ovat teollisuuden yleisimpiä komponentteja. Siispä niiden hyötysuhteen parantaminen on energiansäästön kannalta ensiarvoisen tärkeää. Teollisuuden merkittävimmän sähkökuorman muodostavat sähkökäytöt ja esimerkiksi Euroopan unionin alueella niiden arvioidaan vastaavan noin 70 prosenttia kaikesta teollisuuden kuluttamasta sähköstä (Waide & Brunner, 2011). Tämä suuri energiankulutus selittyy raskaalla käytöllä, kuten prosessi-ilmanvaihdolla.

Energiatehokkuuden saavuttamiseksi nykyaikaiset prosessit varustetaan usein säädettävillä taajuusmuuttajilla. Niiden avulla moottorin pyörimisnopeutta ja vääntömomenttia voidaan mukauttaa dynaamisesti kuorman vaatimuksiin, jolloin ei tarvita mekaanisia tehonsäätäjiä (Waide & Brunner, 2011). Tästä energiansäästöstä huolimatta itse sähkökoneen ja säädettävän syötön yhteistoiminta ei kuitenkaan ole täysin ongelmatonta.

1.1 Tausta & Motivaatio

1980-luvun alkupuolelta lähtien vaihtovirtamoottoreiden nopeuden ja vääntömomentin säätötarve on yleistänyt taajuusmuuttajien käyttöä (Boglietti ym. 2024). Nykyään nämä taajuusmuuttajat ovat sähkökoneiden syötössä vakio. Ne kuitenkin tuottavat jännitteen aaltomuotoja, jotka poikkeavat analogisista siniaalloista, mikä puolestaan aiheuttaa koneissa aikaharmonisia lisähäviöitä (Boglietti ym. 2024).

Pulssinleveysmodulaatioon (PWM) perustuvat vaihtosuuntaajat ratkaisevat monia säätöongelmia, vaikkakin ne tuovat järjestelmään korkeataajuisia yliaaltoja (Boglietti ym. 2024). Koska taajuusmuuttajan tuottama jännite ei ole täysin tasainen, se aiheuttaa ylimääräisiä energiahäviöitä sekä moottorin kuparikäämeissä että magneettisessa rautasydämessä (Boglietti ym. 2024).

Nykyiset kansainväliset testausstandardit, kuten IEC 60034-2-3 ja IEC 60034-30-2, edellyttävät moottoreiden testaamista käyttämällä perinteisiä kaksitasoisia taajuusmuuttajia (Nevoloso ym. 2025). Siksi perinteisen kaksitasoisen PWM-syötön aiheuttamien häviöilmiöiden tarkka tunteminen on yhä keskeistä sähkökäyttöjen hyötysuhteen arvioinnissa.

1.2 Työn rajaukset

Tämä tutkimus keskittyy analysoimaan taajuusmuuttajien aiheuttamia aikaharmonisia lisähäviöitä teollisuuskäyttöön tarkoitetuissa sähkökoneissa. Jotta tutkimustulokset olisivat keskenään mahdollisimman vertailukelpoisia ja vastaisivat tyypillisiä teollisuuden sähkökäyttöjä, lähdeaineisto on rajattu järjestelmällisesti poissulkemalla useita eri tutkimustyyppejä.

Tutkimus rajataan koskemaan yksinomaan teollisuusstandardien mukaisia kolmivaiheisia oikosulkumoottoreita. Analyysin ulkopuolelle on jätetty kokonaan kestomagneettitahtikoneita, vierasmagnetoituja tahtikoneita ja muita erikoisrakenteita käsittelevät tutkimukset. Vertailusta on karsittu pois myös puhtaat materiaalitutkimukset ja yksittäisten sähköteräslevyjen laboratoriomittaukset, sillä ne eivät huomioi sähkömoottorin todellisen rakenteen, kuten urituksen, vaikutusta häviöiden muodostumiseen.

Vaihtosuuntaajien topologioista työ keskittyy tavanomaisten kaksitasoisten invertterien vaikutuksiin. Monitasoinverttereihin keskittyvät tutkimukset on rajattu tarkastelun ulkopuolelle, jotta saadaan yhtenäinen vertailupohja.

Kirjallisuudesta kerättävä data lajitellaan sellaisten muuttujien mukaan, jotka vaikuttavat häviöiden määrään. Tarkasteltava tehoalue käsittää laajan valikoiman teollisuusmoottoreita 1,1 kilowatista aina 55 kilowattiin saakka. Ohjausparametreista otetaan huomioon moottorin syöttötaajuus, käytettävä kytkentätaajuus sekä modulaatiotekniikka, esim. perinteinen pulssinleveysmodulaatio (PWM) ja avaruusvektorimodulaatio.

Alan tutkimuskirjallisuudessa käsitteistö on osin vakiintumatonta. Eri kirjoittajat käyttävät eri termejä, jotka eivät aina tarkoita täsmälleen samaa asiaa. Tässä työssä käytetään termiä " aikaharmoniset lisähäviöt" (additional time harmonic losses) tarkoittamaan ainoastaan niitä tehohäviöitä, jotka johtuvat suoraan PWM-taajuuksista.

1.3 Tutkimuskysymykset

1. Mitkä ovat taajuusmuuttajasyötön aiheuttamien aikaharmonisten lisähäviöiden teoreettiset perusteet kiertokenttäkoneissa?

Kysymys kattaa rautahäviöiden jakautumisen hystereesi-, pyörrevirta- ja lisähäviöihin (excess) sekä sen, miten nämä käyttäytyvät taajuuden muuttuessa. Lisäksi tarkastellaan käämityksissä ilmeneviä taajuusriippuvaisia sähkömagneettisia ilmiöitä, tarkemmin ottaen virranahtoa (skin effect) ja läheisyysvaikutusta (proximity effect), jotka kasvattavat johtimien efektiivistä resistanssia.

2. Mitkä parametrit ja sähkökäytön ominaisuudet vaikuttavat näiden aikaharmonisten lisähäviöiden suuruuteen?

Toinen kysymys käsittelee niitä tekijöitä, jotka muuttavat häviöiden määrää. Työ keskittyy erityisesti syöttö- ja kytkentätaajuuden merkitykseen, koneen mekaaniseen kuormitukseen (vääntömomenttiin) ja lämpötilan vaikutuksiin. Samalla analysoidaan, miten moottorin rakenteelliset seikat (kuten materiaalivalinnat) sekä dynaamiset ohjaustavat (kuten vuo-ohje) korreloivat pulssinleveysmodulaation (PWM) aiheuttamien häviöiden kanssa.

3. Millaisilla menetelmillä aikaharmonisia lisähäviöitä on aiemmassa tieteellisessä kirjallisuudessa tutkittu ja mitattu?

Kolmas kysymys kartoittaa alan tutkimus- ja mittausmenetelmiä. Tähän sisältyy perinteisten sähköisten mittausten (input-output-menetelmä) ja tarkempien kalorimetristen sekä termisten menetelmien arviointi. Lisäksi tarkastellaan laskennallisia lähestymistapoja, kuten esim. elementtimenetelmän (FEM) ja analyyttisten mallien käyttöä häviöiden erottelussa ja ennustamisessa.

1.4 Menetelmän perustelu

Kirjallisuusanalyysiin valikoituneet työt on etsitty IEEE-tutkimustietokannasta hakutermillä *pwm losses*. Haun tuloksena saatiin 101 tutkimusta, joista karsittiin pois tutkimuksen rajauksen ulkopuolelle jääneet tutkimukset. Alkuperäiseen tutkimusmassaan sisältyi paljon tutkimuksia, joiden aiheena oli pulssinleveysmodulaatio ja häviöt erillisinä aiheina. Hakufraasina ei käytetty pelkästään ”*pwm losses”*, sillä tämä olisi karsinut työt, jotka ovat otsikoitu huonosti, eli joissa määritellään aihe tarkemmin vasta johdannossa tai tiivistelmässä.

2 Teoreettinen tausta

Oikosulkumoottoreiden toiminta taajuusmuuttajasyötöllä muodostaa yhden keskeisimmistä optimoinnin kohteista teollisuuden energiatehokkuudessa. Teollisuuden voimanlähteinä toimivat oikosulkumoottorit on perinteisesti suunniteltu ja optimoitu toimimaan ideaalisella, puhtaan sinimuotoisella kolmivaiheisella verkkojännitteellä. Viime vuosikymmeninä tapahtunut tehoelektroniikan kehitys on tehnyt pulssinleveysmodulaatioon (Pulse Width Modulation, PWM) perustuvista taajuusmuuttajista teollisuuden standardin.

Siirtymä perinteisestä suorakäynnistyksestä joustavaan taajuusmuuttajakäyttöön on tuonut mukanaan etuja teollisten prosessien säädettävyyteen, prosessiohjauksen tarkkuuteen sekä energiatehokkuuteen. Samaan aikaan se on muuttanut koneen sisäistä sähkömagneettista ja termistä dynamiikkaa. Taajuusmuuttajan tuottama ei-sinimuotoinen jännite synnyttää moottorin ilmaväliin, magneettipiiriin ja käämityksiin korkeataajuisia aikaharmonisia yliaaltoja. PWM-jännitesyötön korkeampi harmoninen sisältö luo koneeseen ylimääräisiä häviöitä. Sähkömoottorin kokonaishäviöt kasvavat, lämpökuorma lisääntyy ja hyötysuhde heikkenee verrattuna puhtaaseen sinisyöttöön (Kärkkäinen ym. 2016)

Teoreettisessa aiheanalyysissä perehdytään yksityiskohtaisesti PWM-syötön ja sinisyötön välisiin eroihin häviöiden muodostumisen kannalta, minkä lisäksi se erittelee tarkasti rautahäviöiden komponentit, eli pyörrevirta-, hystereesi- ja lisähäviöt. Lopuksi analysoidaan roottorin virranahtoilmiötä (skin effect) ja sen mekanismia taajuusmuuttajan aiheuttamien lisähäviöiden lähteenä kiertokenttäkoneissa.

2.1 Taajuusmuuttajakäytöt teollisuudessa

Teollisuuden energiankulutusta määrittelevät kansainväliset ilmastotavoitteet asettavat nykyaikaiselle teollisuudelle paineita sähkömoottorikäyttöjen energiatehokkuuden parantamiselle. Teolliset sähkökäytöt ovatkin yksi suurimmista sähkön loppukuluttajista, muodostaen lähes 50 prosenttia globaalista sähkönkulutuksesta (Nevoloso ym. 2025).

Perinteisten lisähäviöiden ja aikaharmonisten lisähäviöiden välisen korrelaation tutkiminen voisi osaltaan mahdollistaa invertterisyöttöön tarkoitettujen koneiden valmistuksen tehok-

kaamman laadunvalvonnan (Cao ym. 2010). Tämä mahdollistaisi tehokkaammat ja kestävämmät käyttöratkaisut.

Perinteisesti valtaosa teollisuuden oikosulkumoottoreista on kytketty suoraan sähköverkkoon eli Direct-On-Line (DOL) -syöttöön. Tällöin moottorit pyörivät vakionopeudella riippumatta prosessin todellisesta nopeustarpeesta. Taajuusmuuttajien kehittymisen myötä moottorin pyörimisnopeutta ja vääntömomenttia voidaan säätää portaattomasti, ja kuten on todettu, invertterien käyttö parantaa koko käyttöjärjestelmän energiatehokkuutta (Cao ym. 2010). Taajuusmuuttajien kehitys on ollut tärkeää näiden etujen saavuttamisessa. Nykyään jopa 20 % sähkömoottoreista hyödyntää nopeussäätöä. (Danfoss, 2022)

Valtaosassa säädettäviä sähkökäyttöjä moottori saa virtansa kaksitasoisesta jännitevälipiirillisestä vaihtosuuntaajasta (2L-VSI) (Nevoloso ym., 2025). Niiden toimintaperiaate perustuu nopeisiin jännitteen suunnanvaihtoihin, jotka synnyttävät ”simuloidun” aaltomuodon. Suurjännitesovelluksissa on alettu siirtyä kehittyneempiin monitasoisiin inverttereihin (Multilevel Inverters, MLI). Ne mukailevat ideaalista siniaaltoa useammalla porrastetulla jännitetasolla, jolla saavutetaan pienemmät häviöt puolijohdekomponenteissa, parantunut sähkönlaatu sekä alhaisempi sähkömagneettinen häiriösäteily (Nevoloso ym. 2025). Lisäksi monitasoiset invertterit (eng. Multilevel inverter, MLI) tuottavat perinteisiin kaksitasoisiin inverttereihin verrattuna vähemmän harmonisia komponentteja, minkä ansiosta saavutetaan alhaisempi harmoninen kokonaissärö (THD) ja pienemmät häviöt moottorissa (Alamri & Darwish, 2015).

2.2 PWM-syötön ja sinisyötön ero häviöiden kannalta

Sähkömoottorin fysikaalisten häviöiden suuruus ja luonne muuttuvat perustavanlaatuisesti siirryttäessä ideaalisesta sinisyötöstä taajuusmuuttajan tuottamaan pulssinleveysmoduloituun syöttöön. Ideaalisessa sinimuotoisessa kolmivaihesyötössä koneeseen indusoituu vain puhtaasti perustaajuinen magneettivuo. Moottorissa syntyvät tehohäviöt muodostuvat yksinomaan perusaallon aiheuttamista ilmiöistä: virtalämpöhäviöistä, perustaajuisista rautahäviöistä, mekaanisista kitka- ja tuuletushäviöistä sekä perinteisistä kuormituslisähäviöistä. Perinteiset lisähäviöt muuttuvat hyvin tarkasti suhteessa sovelletun kuormitusmomentin neliöön (Cao ym. 2010).

Taajuusmuuttajakäytössä moottoria syöttävä jännite ei ole puhdas siniaalto, vaan muodostuu nopeista suorakaidepulssimaisista jännitevaihteluista. Näihin pulsseihin sisältyy korkeataajuisia komponentteja, jotka synnyttävät moottoriin aikaharmonisia virtoja. Nämä virrat synnyttävät lisähäviöitä ja lämpöä suoraan staattorissa. Moottorin ilmaväli suodattaa osan virtarippelistä pois, joten vain läpäisevä osa siirtyy akselille asti aiheuttamaan vääntömomentin sykkimistä. Näitä ilmiöitä kutsutaan invertterisyötön aiheuttamiksi aikaharmonisiksi lisähäviöiksi. Näiden korkeiden harmonisten häviöiden vaikutus lasketaan tyypillisesti analysoimalla harmonisten komponenttien sisältöä taajuusspektristä (Otypka ym. 2017). Lasku- ja mittaustapoja on useita, eikä tutkijoilla ole yhteistä mielipidettä siitä, mikä kuvaa häviöitä kaikkein tarkimmin.

Kokonaishäviöiden analyyttinen tarkastelu perustuu tehon jakamiseen perusaallon ja yliaaltojen komponentteihin diskreetin Fourier'n muunnoksen (DFT) avulla. Taajuusmuuttajasyötetyn moottorin aktiivinen sähköinen ottoteho voidaan esittää taajuustasossa summana.

$$P_{el} = P_{DC} + \sum_{h=1}^{N} V_h I_h \cos(\varphi_h) \tag{2.1}$$

Ottoteho jakautuu tasavirtakomponenttiin (P_{DC}), perusaallon tehoon h = 1 ja koko muun spektrin kattavaan harmoniseen pätötehoon h > 1. Tämä tehon komponenttien erottelu toteutuu diskreetissä Fourier'n muunnoksessa (DFT) puhtaasti vain, jos jännite- ja virtadatan näytteistysväli on täsmälleen puolet pääaallon jaksonajasta, jolloin spektrissä on ainoastaan yhtälön mukaiset taajuuskomponentit. Olettamalla, että korkeataajuisilla yliaalloilla on merkityksetön vaikutus vääntömomentin tuottamiseen, moottorin kokonaishäviöt ΔP_{tot} voidaan laskea sähköisen ottotehon ja mekaanisen antotehon erotuksena $\Delta P_{\mathrm{tot}} = P_{\mathrm{el,tot}} - P_{\mathrm{m}}$ (Nevoloso ym. 2025). Näin ollen taajuusmuuttajan aiheuttamat harmoniset lisähäviöt P_{HL} on määriteltävissä invertterikäytön kokonaishäviötehon $P_{\mathrm{tot,Con}}$ ja puhtaan sinisyötön kokonaishäviötehon P_{tot} erotuksena.

$$P_{\mathrm{HL}} = P_{\mathrm{tot,Con}} - P_{\mathrm{tot}} = \sum_{h=2}^{N} V_h I_h \cos(\varphi_h) \tag{2.2}$$

Ilmiön kvantifioimiseksi teollisuusstandardit käyttävät harmonista häviösuhdetta r_{HL}, joka kuvaa harmonisten häviöiden määrää kokonaishäviöistä (Kärkkäinen ym. 2016).

$$r_{\mathrm{HL}} = \frac{P_{\mathrm{HL}}}{P_{\mathrm{tot}}} \times 100\% \tag{2.3}$$

Häviöiden käyttäytyminen PWM-syötöllä poikkeaa perinteisistä lisähäviöistä. Siinä missä perinteiset lisähäviöt ovat vahvasti kuormituksesta riippuvaisia, aikaharmoniset lisähäviöt johtuvat ensisijaisesti staattoriin syötetyn jännitteen harmonisesta spektristä. Se taas riippuu muun muassa modulaation parametreista, kytkentätaajuudesta, invertterin välipiirin jännitteestä sekä koneen induktanssista. Siksi aikaharmoniset lisähäviöt ovat suhteellisen riippumattomia moottorin mekaanisesta kuormituksesta vakiopyörimisnopeudella. Koska kyseessä on usein suhteellisen pieni häviökomponentti, sen luotettava mittaaminen pelkällä sähköisen ja mekaanisen tehon erotuksella on haastavaa. Kehittyneiden kalorimetristen menetelmien ja harmonisen injektion mahdollistavien tekniikoiden saatavuuden myötä näiden pienten häviökomponenttien tarkka mittaaminen on kuitenkin tullut mahdolliseksi (Cao ym. 2010).

Vaikka absoluuttiset harmoniset lisähäviöt kasvavat hieman kuormituksen kasvaessa magneettisten vuosiltojen saturoitumisen vuoksi, ylimääräisten harmonisten lisähäviöiden suhteellinen osuus kasvaa kohti pienempiä kuormituksia ja toimintataajuuksia (Kärkkäinen ym. 2016).

2.3 Rautahäviöt: pyörrevirta, hystereesi, excess

Sähkökoneen rautahäviöt (core losses) syntyvät sekä staattorin että roottorin rautasydämessä magneettivuon tiheyden vaihteluiden seurauksena (Stella ym. 2024). Perinteisesti rautahäviöt jaetaan kolmeen fysikaaliseen pääkomponenttiin: staattisiin hystereesihäviöihin, klassi-

siin pyörrevirtahäviöihin ja nk. excess- eli lisähäviöihin (Gmyrek ym. 2008). Eri häviökomponentit reagoivat eri tavoin magneettivuon tiheyteen ja syöttötaajuuteen.

2.3.1 Hystereesihäviöt

Hystereesihäviöt johtuvat magneettisen materiaalin mikroskooppisten magneettisten alueiden jatkuvasta uudelleensuuntautumisesta vaihtuvan magneettikentän mukana. Steinmetzin yhtälön mukaisesti hystereesihäviöiden suuruus puhtaalla sinisyötöllä riippuu taajuudesta f ja huippuvuontiheydestä B potenssissa α, missä α on materiaalikohtainen vakio ja k_h hystereesihäviökerroin (Strandt ym. 2014).

$$P_{\text{hystereesi}}(f, B) = k_h f^{\alpha} B^{\beta} \tag{2.4}$$

PWM-syötössä invertterin korkeataajuiset jännitekomponentit indusoivat moottorin rautasydämeen ylimääräisiä pieniä hystereesisilmukoita (minor hysteresis loops), jotka lisäävät kokonaishystereesihäviöitä ja siten moottorin lämpenemistä (Strandt ym. 2014).

2.3.2 Pyörrevirtahäviöt

Pyörrevirtahäviöt (eddy current losses) muodostuvat, kun vaihtuva magneettivuo indusoi sähköä johtavaan rautasydämeen kiertäviä sähkövirtoja, jotka muuttuvat lämmöksi materiaalin resistiivisyyden vuoksi. Klassisen mallin mukaan pyörrevirtahäviöt ovat verrannollisia taajuuden ja vuontiheyden tulon neliöön f^2B^2 (Strandt ym. 2014). Yhtälössä k_e on materiaalin ominaisuuksista riippuva pyörrevirtahäviökerroin.

$$P_{\text{pyörrevirta}}(f, B) = k_e f^2 B^2 \tag{2.5}$$

2.3.3 Excess, eli lisähäviöt

Excess- eli lisähäviöillä tarkoitetaan sitä rautahäviöiden osuutta, jota perinteiset hystereesi- ja makroskooppiset pyörrevirtamallit eivät pysty täysin selittämään. Tilastollisen häviöteorian (Statistical Theory of Losses, STL) perusteella excess-häviöillä on tunnettu lineaarinen riippuvuus taajuuden neliöjuuresta, ja tutkimusten mukaan tämä riippuvuus pätee jopa noin 10 kHz:n taajuuksiin saakka (Zhao ym. 2017). Zhao ym. mallintavat excess-häviökomponenttia W_{exc} yhtälöllä, jossa se on riippuvainen taajuudesta *f*, magneettivuon tiheyden huippuarvosta B_{p} sekä materiaalista (Zhao ym. 2017).

$$W_{\mathrm{exc}}\left(B_{\mathrm{p}}, f\right) = 8.76 \cdot \sqrt{\sigma G S V_0\left(B_{\mathrm{p}}\right)} B_{\mathrm{p}}^{1.5} \sqrt{f} \tag{2.6}$$

Yhtälössä σ on materiaalin sähkönjohtavuus, G on dimensioton vakio (0,1356), S on levynäytteen poikkipinta-ala ja V_0 on tilastollinen parametri, joka kasvaa huippuvuontiheyden funktiona (Zhao ym. 2017).

Suuressa osassa taajuusmuuttajasyöttöä käsittelevästä tutkimuskirjallisuudesta excess-häviöitä ei erotella omaksi matemaattiseksi komponentikseen. Esimerkiksi Stella ym. toteavat impedanssipohjaisessa mallissaan, että excess-häviöt on sisällytetty suoraan yleisiin rautahäviöihin (Stella ym. 2024). Vastaavasti Strandt ym. nojaa kaksiportaiseen klassiseen jakoon (Steinmetzin yhtälöön), jossa rautahäviöiden oletetaan koostuvan kokonaisuudessaan ainoastaan hystereesi- ja pyörrevirtahäviöistä.

2.3.4 Taajuuden ja kuormituksen yhteisvaikutus

Kun siirrytään invertterin tuottamiin korkeisiin kytkentätaajuuksiin, rautahäviöiden sisäinen dynamiikka muuttuu. Hystereesihäviöt pienenevät nopeasti suhteessa pyörrevirtahäviöihin, jolloin pyörrevirtahäviöistä tulee hallitseva rautahäviökomponentti korkeilla taajuuksilla (Stella ym. 2024).

Vaikka harmoniset rautahäviöt ovat pitkälti riippuvaisia kytkentätaajuudesta, perustaajuiset rautahäviöt laskevat myös hieman moottorin kuormituksen kasvaessa. Tämä ilmiö johtuu siitä, että moottorin kuormituksen ja virran kasvaessa staattorikäämityksen resistanssin aiheuttama jännitehäviö kasvaa (Kärkkäinen ym. 2016).

Korkeilla taajuuksilla PWM-ohjauksen aiheuttamat rauta- ja magneettihäviöt nousevat nopeasti hallitsevaksi suhteessa perinteisiin virtalämpöhäviöihin (Stella ym. 2024).

2.4 Virranahto & läheisyysvaikutus

Virranahto on ilmiö, jossa johtimessa kulkevan virran synnyttämä oma magneettikenttä indusoi johtimeen pyörrevirtoja (Benharref ym. 2025). Silloin korkeataajuinen teho pakkautuu johtimen pintaosiin. Ilmiö pienentää virran käytössä olevaa poikkipinta-alaa ja kasvattaa siten johtimen efektiivistä resistanssia.

Läheisyysvaikutus puolestaan syntyy, kun viereisen johtimen luoma ulkoinen magneettikenttä indusoi pyörrevirtoja tarkasteltavaan johtimeen (Benharref ym. 2025). Taajuusmuuttajakäytössä tämä ilmiö luo koneeseen ylimääräisiä kuparihäviöitä (Burkard ym. 2025).

Kiertokenttäkoneissa läheisyysvaikutuksen merkitys on erityisen suuri, sillä koneen käämitykset on tyypillisesti upotettu lähekkäin ahtaisiin uriin.

Näiden taajuusriippuvaisten ilmiöiden vaikutus on keskeinen osa taajuusmuuttajan aiheuttamien harmonisten lisähäviöiden matemaattista mallinnusta. Teoreettisissa häviömalleissa kokonaisharmoniset häviöt jaetaan tyypillisesti kupari- ja rautahäviökomponentteihin. Hothongkham ja Kinnares (2007) esittävät harmonisten häviöiden P_{h} riippuvuuden harmonisesta jännitteestä V_n ja taajuudesta f_n seuraavalla yhtälöllä:

$$P_{\mathrm{h}} = \sum_{n \neq 1} \left(\frac{A}{f_n^{\alpha}} + \frac{B}{f_n^{\beta}} \right) V_n^2 \tag{2.7}$$

Yhtälön ensimmäinen termi kuvaa harmonisia kuparihäviöitä ja toinen termi harmonisia rautahäviöitä. Yhtälössä A on konekohtainen kuparihäviökerroin ja B on rautahäviökerroin. Virranahtoilmiön fysikaalinen vaikutus sisällytetään malliin kuparihäviöiden taajuuseks-

ponentilla α, jonka arvoksi määritellään tyypillisesti 1,5. Vastaavasti symboli β on rautahäviöiden taajuuseksponentti, jonka arvo vaihtelee tyypillisesti 0,3 ja 0,5 välillä riippuen materiaalin tyypistä ja levyjen paksuudesta. (Hothongkham & Kinnares 2007)

Vastaavaa matemaattista mallia käyttävät myös Cao ym. (2010), joiden esittämässä yhtälössä harmoninen lisähäviö P_{loss} kertaluvulle k määritellään harmonisen jännitteen V_k ja taajuuden f_k funktiona.

$$P_{\text{loss}}(k) = V_k^2 \times \left(\frac{A}{f_k^{\alpha}} + \frac{B}{f_k^{\beta}} \right) \tag{2.8}$$

Tässä mallissa yhtälön ensimmäinen taajuusriippuvainen termi $\frac{A}{f_{\text{k}}^{\alpha}}$ edustaa matalataajuisia komponentteja ja johdinhäviöihitä, kun taas jälkimmäinen termi $\frac{B}{f_k^{\beta}}$ edustaa korkeataajuisia komponentteja ja rautahäviöitä. Termit A, B, α ja β ovat testattavan moottorin konekohtaisia vakioita. (Cao ym. 2010)

3 Kirjallisuustutkimus

Tässä luvussa tarkastellaan aiheeseen liittyvää tieteellistä kirjallisuutta. Luku käsittelee tutkimuksissa käytettyjä menetelmiä sekä häviöihin vaikuttavia syöttö- ja ohjausparametreja.

3.1 Tutkimus- ja mittausmenetelmät kirjallisuudessa

Luvussa kartoitetaan ensin alan tieteellisessä kirjallisuudessa käytettyjä kokeellisia mittausjärjestelyjä sekä laskennallisia simulointimenetelmiä aikaharmonisten lisähäviöiden erottelussa. Työssä syvennytään sähkökäytön keskeisiin ohjaus- ja toimintaparametreihin, jotka vaikuttavat taajuusmuuttajasyötön aiheuttamien lisähäviöiden suuruuteen ja paikalliseen jakautumiseen oikosulkumoottoreissa.

3.1.1 Sähköiset suureet: Input-output-menetelmä ja epäsuora menetelmä

Koko sähkömoottorikäytön hyötysuhteen määrittämistä ohjaa standardi IEC 61800-9-2. Taajuusmuuttajasyötettyjen moottoreiden tehohäviöiden ja hyötysuhteen määrittämisessä standardi IEC 60034-2-3 puolestaan määrittelee suoran input-output-menetelmän, jossa häviöt ja hyötysuhde lasketaan suoraan sähköisen ottotehon ja mekaanisen antotehon perusteella (Nevoloso ym. 2025).

Koska pelkkä suora menetelmä ei kuitenkaan erottele eri häviökomponentteja toisistaan, standardoiduissa kuormituspisteissä häviöiden erittelyyn voidaan soveltaa epäsuoria menetelmiä, kuten standardin mukaista häviöiden summausmenetelmää. Tässä IEC 60034-2-3 -standardin menetelmässä harmoniset lisähäviöt määritetään tyhjäkäynnissä sini- ja invertterisyöttöjen erotuksena (Nevoloso ym. 2025).

Taajuusmuuttajasyötössä sähköisten suureiden analysointi on monimutkaista. Esimerkiksi Tiihosen ym. (2025) ehdottamassa epäsuorassa menetelmässä pätöteho jaetaan perustaajuiseen ja harmoniseen tehoon analysoimalla mitattuja aaltomuotoja taajuustasossa Fourier-muunnoksen avulla (Tiihonen ym. 2025).

3.1.2 Kalorimetri ja lämpötilaan perustuvat menetelmät

Sähkömoottoreiden tehohäviöiden mittaaminen perinteisillä menetelmillä sähköisen otto- ja antotehon erotuksena (input-output-menetelmä) on altis mittausvirheille, erityisesti silloin, kun koneen hyötysuhde on korkea ja mitattavat harmoniset lisähäviöt muodostavat vain pienen osan kokonaishäviöistä. Tällaisissa tilanteissa kalorimetrinen menetelmä tarjoaa tarkemman mittaustavan, vaikka menetelmän käytännön toteutus ja laitteisto ovatkin perinteisiä mittauksia monimutkaisempia (Zhang ym. 2017). Kehittyneiden kalorimetristen menetelmien ansiosta näiden suhteellisen pienten häviökomponenttien tarkka erottelu ja mittaaminen on tullut mahdolliseksi (Cao ym. 2010).

Kalorimetrian lisäksi moottorin termistä käyttäytymistä voidaan hyödyntää suorempana ja laitteistoltaan yksinkertaisempana indikaattorina häviöille. Koska sähkökoneen todellisten häviöiden erottelu suorilla tehomittauksilla on haastavaa, koneen toimintalämpötilaa voidaan käyttää epäsuorana mittarina PWM-syötön aiheuttamille lisähäviöille (Stella ym. 2024). Seuraamalla koneen vakiotilan lämpötilaa, voidaan tehdä luotettavia päätelmiä laitteen hyötysuhteesta (Stella ym. 2024)

Keskeinen ongelma on, että se antaa tulokseksi vain moottorin kokonaishäviöt. Koska menetelmä mittaa ainoastaan laitteesta poistuvaa kokonaislämpöä, yksittäisiä häviökomponentteja ei voida erotella toisistaan.

3.1.3 FEM, analyyttiset mallit ja muu mallinnus tai simulointi

Sähkömoottoreiden rautahäviöiden tarkan suuruuden ennustaminen pelkkien mittausten avulla on haastavaa, minkä vuoksi tutkimuksessa hyödynnetään laajasti erilaisia analyyttisiä malleja sekä numeerisia simulointimenetelmiä, kuten elementtimenetelmää (FEM). Nämä laskentatavat vaihtelevat nopeista analyyttisistä yhtälöistä raskaaseen aika-askellettuun mallinnukseen. Pääosin analyyttiset mallit perustuvat Bertottin häviöiden erottelumenetelmään, jossa kokonaisrautahäviö jaetaan hystereesi-, pyörrevirta- ja harmonisiin lisähäviöihin. Esimerkiksi Huang ja Hu esittivät Besselin funktioihin perustuvan analyyttisen mallin (Huang & Hu 2007). FEM-laskenta on raskasta (Huang & Hu 2007). Laskennan vaativuus johtuu simuloinnin vaatimista pienistä aika-askelista: jotta PWM-syötön ilmiöt pystytään ylipäätään mallintamaan, laskentataajuuden on oltava tyypillisesti kymmenkertainen kytkentätaa-

juuteen nähden (esimerkiksi 10 kHz kytkentätaajuudella vaaditaan 100 kHz laskentataajuus). Tästä syystä kevyempi analyyttinen malli on usein parempi vaihtoehto, erityisesti silloin kun halutaan vertailla nopeasti eri skenaarioita.

Analyyttisissä malleissa on omat rajoitteensa. Tutkittaessa PWM-syötön aiheuttamia dynaamisia alisilmukoita (minor loops) havaittiin, että paranneltu Bertottin fysiikkamalli sekä esimerkiksi paranneltu Steinmetzin yhtälö ennustavat tietyissä toimintapisteissä häviöitä virheellisesti (Matsumori ym. 2019). Tämä laskentavirhe johtuu siitä, että nämä mallit eivät huomioi magneettivuon tiheyden bias-arvoa, vaikka tasavirtabias pysyisikin vakiona (Matsumori ym. 2019).

Elementtimenetelmä mahdollistaa moottorin geometrian ja ytimen epälineaaristen magneettisten ominaisuuksien tarkemman huomioimisen. Gmyrek ym. korostavat aika-askelletun (time-stepping) FEM-laskennan merkitystä verrattuna taajuustason laskentaan, sillä taajuustason mallit jättävät tyypillisesti huomioimatta harmonisten komponenttien vaihekulmat (Gmyrek ym. 2008). Näillä vaihekulmilla on vaikutus magneettivuon todellisiin huippuarvoihin ja hystereesin alissilmukoiden muodostumiseen (Gmyrek ym. 2008). Virheiden välttämiseksi he toteuttivat 2D FEM-mallin, jossa eri vuokomponenttien aiheuttamat häviöt laskettiin jokaisessa elementissä erikseen ja staattinen hystereesihäviö mallinnettiin Jiles-Atherton-mallin avulla post-prosessointivaiheessa (Gmyrek ym. 2008).

Koska kokonaisvaltainen järjestelmätason simulointi on aikaa vievää ja laskennallisesti raskasta erityisesti useita eri toimintapisteitä vertailtaessa, on kehitetty nopeampia puolianalyyttisiä menetelmiä (Benharref ym. 2025). Benharref ym. hyödynsivät menetelmää, jossa invertterin jännite- ja virtaharmoniset ratkaistaan ensin analyyttisesti Fourier'n kaksoisintegraalin ja moottorin epälineaarisen dq-mallin avulla (Benharref ym. 2025). Nämä analyyttisesti lasketut virtojen aaltomuodot syötetään vasta tämän jälkeen FEM-ohjelmistoon, joka laskee koneen rauta- ja magneettihäviöt (Benharref ym. 2025). Hybridilähestymistapa nopeuttaa eri PWM-strategioiden häviövaikutusten vertailua koko moottorin toiminta-alueella (Benharref ym. 2025).

3.2 Vaikuttavat parametrit ja suureet

Harmonisten lisähäviöiden suuruus riippuu sähkökäytön ominaisuuksista. Seuraavissa alaluvuissa tarkastellaan kytkentätaajuuden, lämpötilan, kuormituksen ja moottorin rakenteen vaikutusta häviöihin.

3.2.1 Syöttötaajuus ja kytkentätaajuus

Kun kytkentätaajuutta nostetaan, virran yliaaltojen suuruus pienenee voimakkaasti. Van der Geestin ym. (2014) tekemissä 500 kW:n kestomagneettikoneen Simulink- ja elementtimenetelmän (FEM) simuloinneissa havaittiin, että 2 kHz:n kytkentätaajuudella suurimman yliaallon amplitudi on 5,6 prosenttia perusaallosta, kun taas 12 kHz:n taajuudella suurin huippu laskee 1,4 prosenttiin. (Van der Geest ym. 2014).

Moottorin eri komponentit reagoivat tähän virtarippelin pienenemiseen eri suhteissa. Roottorihäviöt reagoivat kytkentätaajuuden muutoksiin kaikkein voimakkaimmin (Van der Geest ym. 2014).

Staattorin rautahäviöissä trendi on samankaltainen (Cremente ym. 2022). Uusilla WBG-inverttereillä testattaessa yli 100 kHz:n alueella taajuuden nostaminen ei enää vähennä rautahäviöitä. WBG-invertterit (Wide-bandgap) perustuvat leveän kaistavälin puolijohdemateriaaleihin, kuten piikarbidiin (SiC) ja galliumnitridiin (GaN). (Cremente ym. 2022)

Jos käyttökohteessa joudutaan rajoittumaan mataliin kytkentätaajuuksiin esimerkiksi suurten tehojen vuoksi, ylimääräisiä häviöitä voidaan suodattaa ulkoisilla komponenteilla. Strandt ym. (2014) selittävät, että kuristimen tai sinifiltterin lisääminen on yksi ratkaisu matalilla kytkentätaajuuksilla.

Koko sähkökäytön järjestelmätasolla optimaalinen kytkentätaajuus on pitkälti kompromissi, sillä invertterin kytkentähäviöt kasvavat taajuuden mukana. Uuden sukupolven GaN-transistoreilla toteutetuissa mittauksissa sähkömoottorin sisäiset häviöt minimoituivat vasta korkealla taajuudella (Stella ym. 2024).

Vaikka kytkentätaajuuden nostaminen kasvattaa invertterin kytkentähäviöitä, niin nimellisvirralla toimiessa korkein PWM-taajuus voi silti johtaa koko sähkökäyttöjärjestelmän alhaisimpiin kokonaishäviöihin (Sergeant ym. 2014).

3.2.2 Lämpötila

Mittaukset toteavat käänteisen yhteyden invertterin kytkentätaajuuden ja moottorin lämpenemisen välillä: kun taajuutta lasketaan, moottorin kokema lämpökuorma kasvaa (Strandt ym. 2014).

Lämpötilan hallinta muodostuu erityisen kriittiseksi tekijäksi suuritehoisissa sovelluksissa, kuten tuulivoimaloiden sähkökäytöissä. Näissä sovelluksissa invertterin kytkentätaajuutta voidaan laskea taajuusmuuttajan tehonkeston ja oman hyötysuhteen maksimoimiseksi, mutta tämän optimoinnin varjopuolena on moottorin ylikuumenemisriski (Strandt ym. 2014).

Mikäli sovelluksen vaatima matala kytkentätaajuus nostaa moottorin lämpötilan korkealle tasolle, ylikuumenemista voidaan lieventää ulkoisilla suodinkomponenteilla. Kolmivaiheisen kuristimen (line reactor) asentaminen taajuusmuuttajan ja moottorin väliin on osoittautunut tehokkaaksi lämpötilanhallinnan keinoksi.

Tällainen terminen suojaus paitsi pidentää moottorin elinikää estämällä eristeiden lämpövaurioita, myös mahdollistaa koko sähkökäytön joustavamman operoinnin. Kun moottorin lämpökuorma saadaan pidettyä kuristimen avulla hallinnassa, taajuusmuuttajaa voidaan turvallisesti ajaa sellaisella kytkentätaajuudella, joka minimoi koko järjestelmän häviöt ja maksimoi kokonaishyötysuhteen (Strandt ym. 2014).

Kirjallisuuden perusteella suodatin on mahdollista optimoida käytännössä ja taloudellisesti kannattavasti siten, että sähkökäytön kokonaishyötysuhde paranee verrattuna tilanteeseen ilman suodatinta. LC-suodattimien suunnittelussa on esitetty menetelmiä, joissa suodattimen kondensaattori mitoitetaan kattamaan oikosulkumoottorin vaatima loisteho (Mishra & Maheshwari 2017). Silloin taajuusmuuttajalta vaadittava virta ja sen myötä johdinhäviöt pienenevät, mikä parantaa paitsi taajuusmuuttajan myös koko sähkökäytön tehokkuutta suodattamattomaan järjestelmään nähden (Mishra & Maheshwari 2017). Vaikka tällaisen optimoidun suodattimen toteuttaminen edellyttää isompaa alkuinvestointia, ratkaisu on kustannustehokkuudeltaan järkevä, sillä taajuusmuuttajan pienentynyt jäähdytystarve ja laitteiston parempi kokonaishyötysuhde kompensoivat suodattimesta aiheutuvat lisäkustannukset (Mishra & Maheshwari 2017).

3.2.3 Kuormittava vääntömomentti ja virta

Sähkömoottorin aikaharmonisten lisähäviöiden käyttäytyminen suhteessa moottorin mekaaniseen kuormitukseen (vääntömomenttiin) poikkeaa perinteisten lisähäviöiden dynamiikasta.

Absoluuttiset harmoniset lisähäviöt P_{HL} riippuvat sekä moottorin kuormituksesta että käyttötaajuudesta. Tulokset 15 kW:n oikosulkumoottorilla osoittavat, että nämä häviöt kasvavat vääntömomentin kasvaessa koko tarkastellulla taajuusalueella (Kärkkäinen ym. 2016). Häviöiden kasvaminen kuormituksen myötä on rajallista.

Vaikka absoluuttiset harmoniset häviöt kasvavatkin vääntömomentin kasvaessa, niin on huomattava, että niiden suhteellinen merkitys kokonaishäviöissä kehittyy päinvastaiseen suuntaan. Kun moottorin mekaaninen kuoritus pienenee, muiden kuormasta riippuvaisten häviöiden (kuten staattorin ja roottorin virtalämpöhäviöiden) osuus putoaa nopeasti. Harmonisen häviösuhteen (r_{HL}), eli harmonisten häviöiden prosentuaalisen osuus kokonaishäviöistä kasvaa kohti matalampia kuormituksia ja toimintataajuuksia (Kärkkäinen ym. 2016).

3.2.4 Vuo-ohje

Moottorin magneettivuon ja sitä kautta vuo-ohjeen (flux reference) dynaaminen säätäminen on keskeinen menetelmä sähkökäyttöjen sähköisten häviöiden minimointitekniikoissa (Electrical Loss Minimization Techniques, ELMT). Erityisesti osakuormilla ajettaessa moottorin hyötysuhdetta parannetaan säätämällä vuota sen sijaan, että sitä pidettäisiin jatkuvasti nimellisarvossaan.

Oikosulkumoottoreissa nämä optimointimenetelmät perustuvat tyypillisesti koneen magnetoinnin vähentämiseen matalilla vääntömomenteilla. Tämä toteutetaan ohjaamalla suoraan joko roottorin vuo-ohjetta tai staattorivirran d-akselin komponenttia (Di Piazza & Pucci, 2014). Oikein säädetyllä roottorin vuo-ohjeen optimoinnilla voidaan vähentää kokonaishäviöitä, ja vaikutus on selvästi suurin juuri pienillä kuormitusmomenteilla (Di Piazza & Pucci 2014).

Vuotason ja nimenomaan taajuusmuuttajan PWM-syötöstä johtuvien harmonisten lisähäviöiden suhde on kuitenkin monimutkaisempi, mihin on kiinnitetty huomiota erityisesti eril-

lismagnetoitujen tahtikoneiden (EESM) kohdalla. Näissä koneissa vuota säädetään roottorin magnetointivirralla, ja Burkard ym. (2025) osoittavat voimakkaan korrelaation PWM-indusoitujen rautahäviöiden, magnetointiakselin käämivuon (flux linkage) sekä invertterin modulaatioindeksin välillä.

Suurimmat PWM-lisähäviöt keskittyvät tyypillisesti toimintapisteisiin, joissa koneen vuo on matala, kuten osakuormilla ja suurilla pyörimisnopeuksilla ajettaessa (Burkard ym. 2025).

3.2.5 Materiaalit ja moottorin rakenne

Sähkömoottorin materiaalivalinnoilla ja rakenteellisella suunnittelulla voidaan vaikuttaa PWM-syötön aiheuttamiin lisähäviöihin. Staattorisydämen sähkölevyjen paksuudella on suora yhteys rautahäviöiden muodostumiseen korkeataajuisilla herätteillä. Mittaukset näyttävät, että kantoaallon vaikutus rautahäviöihin on suurempi 0,35 mm paksuisella perinteisellä sähkölevyllä kuin ohuilla 0,08 mm tai 0,1 mm sähkölevyillä (Oka ym. 2020). Ohuesta sähkölevystä valmistettu staattori kykenee tehokkaasti vaimentamaan PWM-herätteen aiheuttamaa rautahäviöiden kasvua (Oka ym. 2020).

Myös käytetyn levymateriaalin laatu vaikuttaa häviöihin siten, että käsitelty teräs tuottaa pääsääntöisesti pienemmät rautahäviöt. Terästeollisuuden tuotantoerien väliset laatuvaihtelut voivat johtaa poikkeamiin, jolloin hyvän tuotantoerän puolikäsitellyllä teräksellä saattaa olla paremmat magneettiset ominaisuudet kuin heikomman tuotantoerän kalliimpi käsitelty teräs (Pires ym. 2007). Yleisesti sähköteräksen käsittely tarkoittaa materiaalin magneettisia ominaisuuksia optimoivaa lämpökäsittelyä.

Rakenteellisen suunnittelun puolella erityisesti kestomagneettikoneiden magneettien segmentointi on tärkeä keino rajoittaa roottorin pyörrevirtahäviöitä. Segmentoinnista saatava hyöty on huomattava kytkentätaajuuden ollessa matala, mutta sen häviöitä rajoittava vaikutus jää verrattain vähäiseksi korkeilla kytkentätaajuuksilla (Sergeant ym. 2014).

4 Kirjallisuusdatan analysointi

Tässä luvussa vertaillaan ja analysoidaan kerättyä kirjallisuusaineistoa. Aluksi esitellään aineiston rajaukset, minkä jälkeen tuloksista muodostetaan kvantitatiivinen synteesi.

4.1 Aineiston rajaukset ja valintaperusteet

Jotta tutkimustulokset olisivat keskenään mahdollisimman vertailukelpoisia ja vastaisivat tyypillisiä teollisuuden sähkökäyttöjä, laajasta lähdeaineistosta rajattiin pois useita tutkimuksia kolmella pääperusteella. Ensimmäinen rajaus koski materiaalitutkimuksia, joissa tarkasteltiin yksittäisten magneettilevyjen fyysistä käyttäytymistä kokonaisten sähkökoneiden sijaan. Tällaisia laboratoriomittauksia tehtiin esimerkiksi erilaisilla rengassydämillä (Cremente ym. "toroidally-wound laminated magnetic cores" 2022; Gmyrek ym. B, "two toroidal cores" 2008) ja ohuilla sähköteräslevyillä (Oka ym. "ring core specimen made of electrical steel sheets" 2020). Vastaavasti vertailusta jätettiin pois pelkkiin teräsmateriaalien ominaisuuksiin keskittyvät kokeet (Matsumori ym. "SiFe steel material" 2019; Zhao ym. "non-oriented steel sheets" 2017) sekä yleisluontoiset kirjallisuuskatsaukset (Boglietti ym. "iron losses" 2024), sillä nämä eivät huomioi sähkömoottorin todellisen rakenteen, kuten urituksen tai roottorihäkin, vaikutusta häviöiden muodostumiseen.

Toinen poissulkuperuste liittyi sähkökoneen tyyppiin, sillä moottorin topologia vaikuttaa häviöiden syntymiseen pulssinleveysmodulaatiolla (PWM) syötettäessä. Analyysistä rajattiin pois kaikki kestomagneettitahtikoneita käsittelevät tutkimukset, riippumatta siitä oliko kyseessä sisäisten magneettien rakenne (Benharref ym. "internal permanent magnet machine" 2025; Xue ym. "interior permanent magnet (IPM) machine" 2017), pintamagneettikone (Stella ym. "synchronous permanent magnet machine" 2024; Van Der Geest ym., "surface mounted PM machine" 2014) tai aksiaalivuokone (Sergeant ym. "axial flux permanent magnet synchronous machine (PMSM)" 2014). Samoin vertailun ulkopuolelle jätettiin vierasmagnetoiduttahtikoneet (Burkard ym. "Electrically Excited Synchronous Machines" 2025), kynsipolakoneet (Okunishi ym. "claw-pole type machine (CPM)" 2024)

sekä poikkeavat induktiokonerakenteet, kuten liukurengaskoneilla ajetut kokeet (Kaczmarek ym. "wounded rotor machine" 1996) ja teollisuusmoottoria vastaamattomat prototyypit (Gmyrek ym. "induction motor prototype" 2008).

Kolmas rajaus tehtiin invertteritopologioiden ja modulaatiomenetelmien perusteella. Vertailun tavoitteeksi otettiin tarkastella tavanomaisten kaksitasoisten invertterien vaikutuksia. Tästä syystä vertailukelvottomina jouduttiin hylkäämään tutkimukset, joissa moottoreita syötettiin monitasoinverttereillä (Hothongkham & Kinnares, "PWM multilevel cascaded H-bridge inverter" 2007). Lisäksi aineistosta poistettiin tutkimukset, joissa keskityttiin yksinomaan erikoismodulaatioihin (Liu ym. "active zero state PWM1 (AZSPWM1), near state PWM (NSPWM) and three-dimension AZSPWM (3D-AZSPWM)" 2015), sillä näiden menetelmät poikkeavat perinteisten avaruusvektorimodulaatiosta. Näiden rajausten myötä jäljelle jäänyt aineisto muodosti käyttökelpoisen kokonaisuuden.

4.2 Tutkitut konetyypit ja teholuokat

Haaste analyysin aineiston vertailussa on se, että tutkimuskirjallisuudessa käytetty terminologia on usein hämmentävää ja vaihtelee suuresti eri lähteiden välillä. Monet kirjoittajat tyytyvät käyttämään tutkituista koneista ja havaituista ilmiöistä varsin yleisluontoisia termejä sen sijaan, että määrittelisivät esimerkiksi moottorin rakenteelliset yksityiskohdat tai häviökomponentit täsmällisesti. Koska eri tutkijat saattavat käyttää jopa täysin samoja sanoja tarkoittamaan hieman eri asioita, tulosten luotettava ristiin vertailu vaikeutuu. Tämä epätäsmällisyys näkyy selvästi myös kerätyssä datassa, jossa jopa häviöiden muodostumisen kannalta kriittisiä muuttujia, esimerkiksi tarkka napapariluku tai käytetty kytkentätaajuus, on toisinaan jätetty kokonaan mainitsematta.

Edellä esitettyjen rajausten jälkeen aineisto muodostuu kymmenestä keskeisestä tutkimuksesta, jotka keskittyvät teollisuusstandardien mukaisiin oikosulkumoottoreihin. Vaikka tutkimusasetelmat on rajattu koskemaan vain induktiokoneita, esiintyvä moottoritekniikka ja tehoalue ovat monimuotoisia, mikä mahdollistaa häviöilmiöiden tarkastelun eri sovelluskohteiden näkökulmasta.

Tutkimus / Lähde	**Boglietti ym. (2010)**	**Cao ym. (2010)**	**Di Piazza & Pucci (2014)**	**Irimie ym. (2014)**	**Kärkkäinen ym. (2016)**
Konetyyppi	industrial induction motors	induction motors	three phase induction motor	three-phase cage-induction motor	squirrel-cage machine
Tutkimus / Lähde	**Otypka ym. (2017)**	**Pires ym. (2007)**	**Strandt ym. (2014)**	**Tiihonen ym. (2025)**	**Zhang ym. (2017)**
Konetyyppi	induction motor	three-phase cage induction motors	induction motor	converter-fed induction motor (IM)	induction motors

Taulukko 1. Kirjallisuustutkimuksen aineistossa tutkitut moottorityypit.

Kaikki analyysin aineistoon valikoituneet tutkimukset käsittelevät kolmivaiheisia oikosulkumoottoreita, mutta niistä käytetty terminologia vaihtelee lähteittäin. Taulukosta 1. voidaan havaita, että aineistossa esiintyy yleisluontoisia teollisuuden oikosulkumoottoreita (industrial induction motors), ja kolmivaiheisia häkkioikosulkumoottoreita (three-phase cage-induction motor). Yhteistä kaikille näille koneille on siis se, että ne edustavat teollisuuden sähkökäyttöjä, ilman kestomagneetteja. Napapariluku on ilmoitettu puolessa tarkastelluista tutkimuksista. Kaikissa näissä tapauksissa on käytetty kahden napaparin eli neljän navan konerakennetta. Loput tutkimukset eivät ole määritelleet napaparilukua.

Aineisto kattaa laajan tehoalueen 1,1 kilowatista aina 55 kilowattiin saakka. Tämä jakauma voidaan ryhmitellä karkeasti kolmeen kokoluokkaan. Pienkoneisiin eli alle 4 kW:n teholuokkaan kuuluvat aineistossa esiintyvät 1,1 kW:n ja 2,2 kW:n moottorit. Pääosa aineistosta muodostuu 4-30 kW:n keskisuurista teollisuuskoneista, joihin sisältyvät esimerkiksi 4 kW:n, 7,5-30 kW:n ja 15 kW:n moottorit. Yli 30 kW:n suuria teollisuuskoneita ja siten aineiston raskaampaa päätä edustavat puolestaan 37 kW:n, 50 hevosvoiman (~37 kW) sekä 55 kW:n

moottorit. Laajempi tutkimusasetelma erottuu edukseen osassa tutkimuksista, sillä niissä on analysoitu useita eri teholuokkia samanaikaisesti. Laajimmillaan on testattu peräti kuutta eri teholuokkaa (5,5-55 kW), mikä tarjoaa tietoa häviöiden käyttäytymisestä koneen koon kasvaessa ilman eri tutkimusten vertailusta ja eroavista koeasetelmista mahdollisesti aiheutuvia virheitä.

4.3 Syöttöparametrit, modulaatiomenetelmät ja kytkentätaajuudet

Sähkökoneen kokemien harmonisten lisähäviöiden luonteeseen ja suuruuteen vaikuttavat staattorille syötettävän jännitteen ja virran aaltomuodot, jotka määräytyvät taajuusmuuttajan parametrien sekä käytettävän modulaatiotekniikan mukaan. Tarkastelluissa tutkimuksissa moottorin syöttötaajuudet ovat useimmissa tapauksissa Euroopassa ja Aasiassa oleva verkon perustaajuus, 50 Hz. Tätä kiinteää taajuutta hyödynnetään myös muissa tutkimuksissa. Joissain tutkimuksissa on tarkasteltu laajemmin eri syöttötaajuuksilla. Joidenkin tutkimusten kohdalla puolestaan moottorin syöttötaajuutta ei ole määritelty lainkaan tarkasteltavassa aineistossa.

Modulaatiomenetelmien tarkastelu paljastaa selvän jaon kahteen lähestymistapaan. Aineistossa kaikki käyttävät pulssinleveysmodulaatiota, mutta osassa se on tarkennettu avaruusvektorimodulaatioon (SVM/SV-PWM). Alla oleva taulukko kokoaa yhteen nämä havaitut syöttöparametrit ja ohjaustavat.

Tutkimus / Lähde	**Syöttötaajuus**	**Modulointimenetelmä**	**Kytkentätaajuus**
Boglietti ym. (2010)	50 Hz	linear sine-triangle PWM	2 kHz
Cao ym. (2010)	50 Hz	pulse width modulation (PWM)	8 kHz
Di Piazza & Pucci (2014)	50	Space-vector pulsewidth modulation (SV-PWM)	5 kHz
Irimie ym. (2014)	50Hz	PWM voltage supply	Ei mainittu
Kärkkäinen ym. (2016)	50 Hz	classic space vector modulation	4 kHz
Otypka ym. (2017)	50Hz	PWM converter	5 kHz
Pires ym. (2007)	12 to 66 Hz	Space Vector Modulation	2.5, 5.0 and 10.0 kHz
Strandt ym. (2014)	30 Hz and 60 Hz	pulse-width modulated (PWM) waveforms	1.5 kHz, 2 kHz, and 4 kHz
Tiihonen ym. (2025)	45 Hz	pulse width modulation	2 kHz, 4 kHz and 8 kHz
Zhang ym. (2017)	Ei mainittu	PWM inverter supply	Ei mainittu

Taulukko 2. Kirjallisuustutkimuksen aineiston tutkimusten syöttötaajuudet, modulointimenetelmät ja kytkentätaajuudet.

Taulukosta 2 voidaan havaita, että kytkentätaajuuksien osalta aineistossa esiintyy hajontaa, mikä parantaa tutkimusotoksen kykyä arvioida taajuusriippuvaisia häviökomponentteja, kuten pyörrevirta- ja excess-häviöitä. Osassa tutkimuksista on tyydytty tarkastelemaan vain yhtä kiinteää matalaa kytkentätaajuutta (Boglietti ym. "2 kHz" 2010) tai yhtä suhteellisen korkeaa taajuuspistettä (Cao ym. "8 kHz" 2010). Muut keskittyvät suhteessa näihin keskivaiheille. Joissakin aineiston töissä tämä parametri on jätetty kokonaan ilmoittamatta.

Kytkentätaajuuden merkityksen tarkasteluun arvokkaimman ryhmän muodostavat ne tutkimukset, joissa kytkentätaajuutta on varioitu järjestelmällisesti laajalla alueella saman koeympäristön sisällä. Kuten työn teoreettisessa osuudessa on osoitettu, kytkentätaajuuden nostaminen vähentää harmonisia häviöitä, mutta toisaalta se kasvattaa rautahäviöiden pyörrevirtakomponenttien osuutta korkeilla taajuuksilla. Tästä syystä monen kytkentätaajuuden samanaikainen dokumentointi antaa kokeellista näyttöä siitä, miten invertterin aiheuttamat harmoniset lisähäviöt käyttäytyvät.

4.4 Tutkimustulosten synteesi ja parametrien vaikutus häviöihin

Tässä luvussa kootaan yhteen aineiston kokeelliset tulokset. Alaluvuissa arvioidaan kytkentätaajuuden ja kuormituksen vaikutusta sekä mallinnetaan lisähäviöiden suhdetta moottorin nimellistehoon.

4.4.1 Kytkentätaajuuden merkitys

Kytkentätaajuuden vaikutuksesta aikaharmonisiin lisähäviöihin voidaan vertailla aineistolla parhaiten. Useat tutkimukset puoltavat näkemystä, jonka mukaan kytkentätaajuuden ja häviöiden välillä on käänteinen yhteys. Esimerkiksi Strandt ym. (2014) havaitsivat kokeissaan suoraan, että taajuuden laskeminen pahentaa tilannetta (Strandt ym. 2014). Tätä havaintoa tukevat Tiihosen ym. (2025) tulokset, joissa kytkentätaajuuden nostaminen taas vastavuoroisesti pienensi häviöitä (Tiihonen ym. 2025). Tiihosen tutkimus tarkentaa Strandtin havaintoa osoittamalla hyödyn saturoitumisen: taajuuden nosto 2 kHz:stä 4 kHz:iin säästi jopa 70 W, mutta seuraava tuplaus 8 kHz:iin enää 20 W (Tiihonen ym. 2025).

Käytännön ratkaisuna matalien kytkentätaajuuksien aiheuttamiin lämpöongelmiin Strandtin ym. (2014) ehdottama verkkokuristimen käyttö osoittautuu tehokkaaksi keinoksi. Kuristin

suojaa konetta ylikuumenemiselta ja mahdollistaa taajuusmuuttajan käytön sellaisella kytkentätaajuudella, joka vähentää häviöitä (Strandt ym. 2014).

4.4.2 Kuormituksen merkitys

Caon ym. (2010) tulokset osoittavat harmonisten häviöiden olevan luonteeltaan staattisia verrattuna perinteisiin lisähäviöihin, jotka vaihtelevat kuorman mukaan (Cao ym. 2010). Zhang havaitsi, että vaikka PWM-häviöt ovat korkeita jo nimelliskuormalla, aivan erityisesti tyhjäkäynnillä tai pienellä kuormalla PWM-koneen virtalämpöhäviöt nousevat verrattuna sinisyöttöön (Zhang ym. 2017).

Ilmiötä, jossa absoluuttisten häviöiden vakiona pysyminen johtaa suhteellisten häviöiden kasvuun, selittävät Kärkkäinen ym. (2016): koska muut kuormasta riippuvat häviöt (kuten virtalämpö) putoavat kuorman pienentyessä, jäljelle jäävien harmonisten häviöiden suhteellinen osuus kokonaishäviöistä nousee jyrkästi (Kärkkäinen ym. 2016).

Di Piazzan & Puccin (2014) kokeissa, joissa harmoniset häviöt hallitsevat suhteellisesti eniten osakuormilla, myös sähköisten häviöiden minimointitekniikoilla (ELMT) saatavat säästöt ovat suurimmillaan juuri matalilla kuormitusmomenteilla. Tutkimus todistaa, että PWM-syötön hyötysuhde on heikoin vajaalla kuormalla.

4.4.3 Häviöiden suuruusluokka

Boglietti ym. (2010) arvioivat kokeidensa perusteella, että siirtymä sinisyötöstä PWM-syöttöön kasvattaa staattorin ja roottorin rautahäviöitä yhteensä noin 50 prosenttia (Boglietti ym. 2010). Tätä kasvua tukevat myös Zhangin ym. (2017) laajat moottoritestit, joiden mukaan nimelliskuormalla PWM-syötettyjen koneiden kokonaishäviöt ovat suuremmat kuin puhtaalla sinisyötöllä (Zhang ym. 2017).

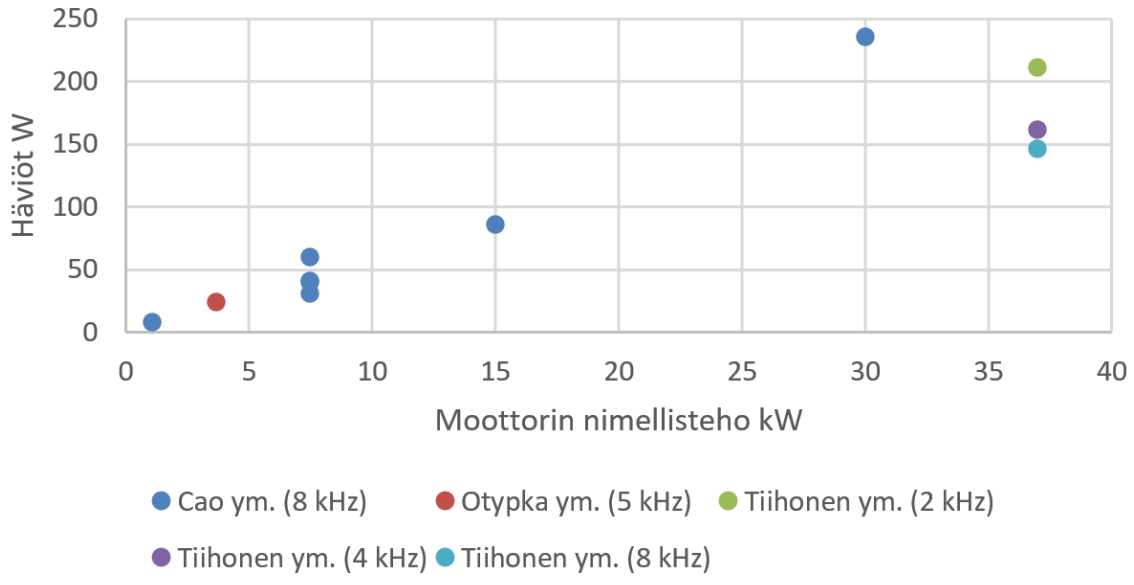
Kokonaiskasvun lisäksi PWM-syöttö vaikuttaa häviöiden paikalliseen jakautumiseen koneessa. Bogliettin (2010) havaintojen mukaan tyhjäkäynnillä pelkästään PWM-syötöstä johtuvat ylimääräiset roottorin rautahäviöt muodostavat 15–25 % koko koneen mitatuista kokonaisrautahäviöistä (Boglietti ym. 2010). Invertterisyöttö siis siirtää osan lämpökuormasta

suoraan roottoriin, jonka jäähdyttäminen on umpikoteloidussa rakenteessa lähtökohtaisesti staattoria vaikeampaa.

Irimien ym. (2014) tutkimuksen mukaan PWM-syötön aiheuttama magneettipiirin lisärasitus kohdistuu lähes täysin pyörrevirtoihin, sillä heidän matemaattisen mallinsa perusteella hystereesihäviöiden kasvun todettiin käytännössä nollaantuvan PWM-jännitettä käytettäessä (Irimie ym. 2014). Analyysissä hyödynnettiin tarkkuustehoanalysaattorilla määritettyä kerrointa, joka perustuu todellisen jännitteen ja perusaallon tehollisarvoihin, ja nimellisjännitteellä tämän kertoimen arvoksi mitattiin 1,178 (Irimie ym. 2014). Pyörrevirrat ovat PWM-syötöllä 1,388 kertaa suuremmat kuin puhtaalla sinisyötöllä (Irimie ym. 2014). Ilmiön voimakkuus on myös paikallista, sillä PWM-syöttö voi kasvattaa rautahäviöitä staattorin hampaissa jopa 73 % ja ikeen alueella noin 3 % (Irimie ym,, 2014)

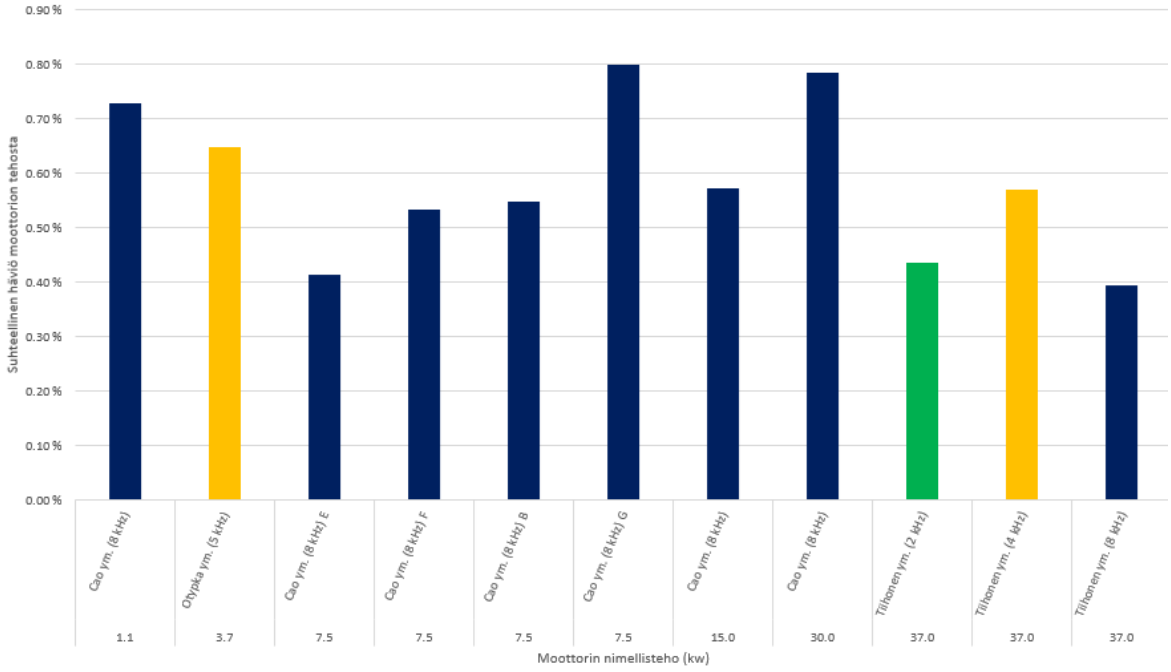
4.4.4 Harmonisten lisähäviöiden suhde moottorin nimellistehoon

Kun kirjallisuudesta kerättyä dataa tarkastellaan kvantitatiivisesti kokonaisuutena, voidaan havaita selkeä yleinen riippuvuus taajuusmuuttajan aiheuttamien aikaharmonisten lisähäviöiden ja moottorin nimellistehon välillä. Kuvassa alla on esitetty eri tutkimuksista kerätyt harmoniset lisähäviöt suhteutettuna moottorin nimellistehoon tutkimuksittain eroteltuna.



Kuva 1. Kirjallisuustutkimuksesta kerätyt harmoniset lisähäviöt moottorin nimellistehon funktiona.

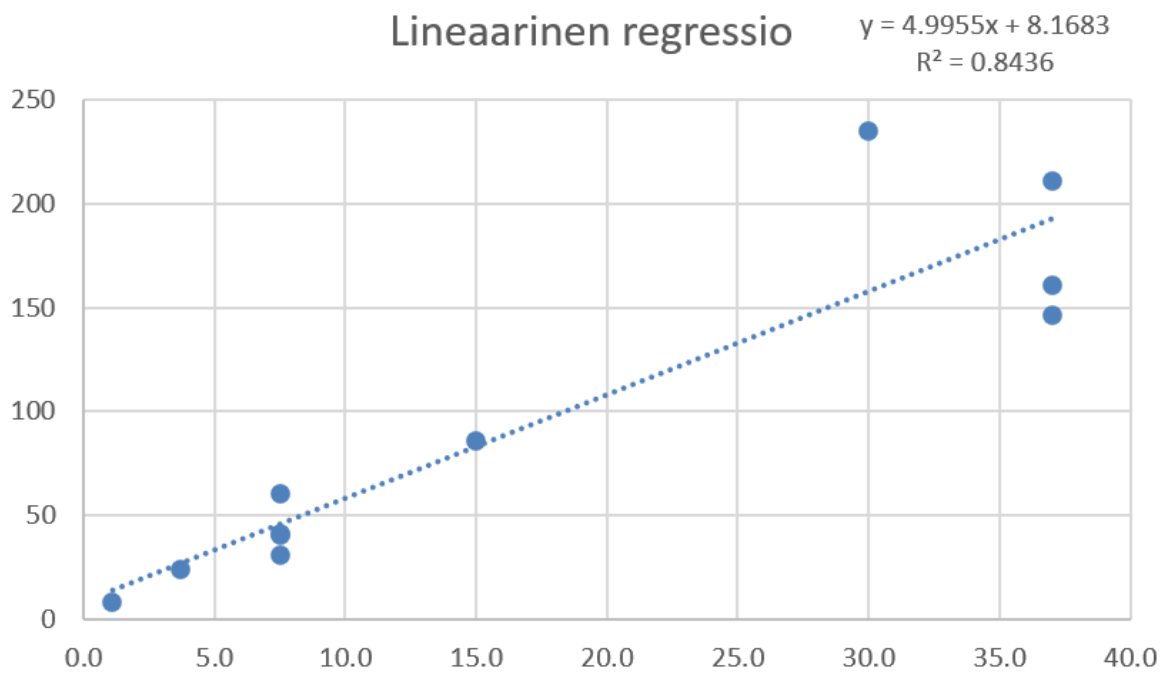
Kuvassa alla on esitetty eri tutkimuksista kerätyt aikaharmoniset lisähäviöt suhteutettuna moottorin nimellistehoon tutkimuksittain eroteltuna. Caon ym. (2010) aineiston kohdalla 7,5 kW:n teholuokassa on eroteltu kirjaimin (B, E, F ja G) neljä eri valmistajien moottoria, jotta saman teholuokan koneiden välinen hajonta tulee esiin



Kuva 2. Harmonisten lisähäviöiden suhteellinen osuus moottorin nimellistehosta prosentteina. Pylväiden värien selitykset: alle 3 kHz, vihreä, 4-6 kHz, keltainen. yli 7 kHz, sininen.

Pylväskaaviosta voidaan havaita, että vaikka moottorin absoluuttinen teho kasvaa yli 30 kilowattiin, harmonisten lisähäviöiden suhteellinen osuus pysyy varsin stabiilina. Kerätyssä aineistossa nämä suhteelliset lisähäviöt asettuvat pääosin 0,4 % ja 0,8 % väliin. Esimerkiksi Caon ym. tuloksissa (8 kHz kytkentätaajuudella) häviöt vaihtelevat 0,41 % ja 0,80 % välillä, kun taas Tiihosen ym. kokeissa (2-8 kHz) haitari on 0,39 %-0,57 %. Tämä tukee oletusta siitä, että harmonisten häviöiden suuruusluokka on karkeasti arvioitavissa suoraan moottorin kilpiarvon perusteella riippumatta koneen tarkasta kokoluokasta.

Ilmiön matemaattista mallintamista varten kaikille kerätyn kirjallisuusaineiston datapisteille sovitettiin yhteinen lineaarinen regressiomalli (Kuva 3). Tämä malli perustuu oletukseen aikaharmonisista lisähäviöistä suhteessa moottorin nimellistehoon.



Kuva 3. Lineaarinen regressiomalli kerätylle kirjallisuusdatalle.

Regressioanalyysin perusteella absoluuttisten lisähäviöiden y (W) ja moottorin nimellistehon x (kW) välistä yleistä suhdetta voidaan koko aineiston laajuisesti kuvata suoran yhtälöllä.

$$y = 4{,}9955x + 8{,}168$$

Koko aineistolle lasketun mallin selitysaste (R^2) on 0,8436. Lineaarinen korrelaatio nimellistehon ja lisähäviöiden välillä on vahva, vaikka data yhdistää useita erillisiä tutkimuksia ja erilaisia koeasetelmia.

Se, että selitysaste ei ole täysin täydellinen (1,0), vastaa työn teoreettisessa osassa tehtyjä havaintoja: harmoniset lisähäviöt eivät riipu pelkästään moottorin nimellistehosta, vaan niihin vaikuttavat voimakkaasti myös ohjausparametrit ja koneen fyysiset ominaisuudet.

5 Yhteenveto ja johtopäätökset

Tähän lukuun on koottu diplomityön keskeisimmät havainnot. Aluksi kerrataan tutkimuksen tavoitteet ja tulokset, joiden pohjalta esitetään käytännön johtopäätökset.

5.1 Tutkimuksen tausta ja tavoitteet

Vaikka pulssinleveysmodulaatioon (PWM) perustuvat sähkökäytöt ovat nykyään teollisuuden standardi prosessien säädettävyydessä, niiden tuottama ei-sinimuotoinen jännite aiheuttaa ylimääräisiä energiahäviöitä. Työssä asetettuihin tutkimuskysymyksiin haettiin vastauksia selvittämällä näiden häviöiden teoreettiset perusteet, analysoimalla niihin vaikuttavia parametreja sekä kartoittamalla alan kokeellisia ja laskennallisia tutkimusmenetelmiä. Järjestelmällisen kirjallisuustutkimuksen avulla luotiin synteesi olemassa olevasta tutkimustiedosta teollisuuden oikosulkumoottoreilla laajalla 1,1–55 kilowatin tehoalueella ja muodostettiin tilastollisesti luotettava matemaattinen regressiomalli lisähäviöiden nopeaa arviointia varten.

5.2 Keskeiset tutkimustulokset ja parametrien vaikutukset

Aineiston perusteella PWM-syötön aiheuttamien lisähäviöiden käyttäytymisessä on selkeitä säännönmukaisuuksia. Seuraavassa esitellään havainnot kytkentätaajuuden, kuormituksen ja häviöiden kohdentumisen vaikutuksista.

5.2.1 Kytkentätaajuuden ja suodatuksen merkitys

Tutkimusaineisto vahvisti, että invertterin kytkentätaajuudella on selvä käänteinen yhteys moottorissa syntyviin harmonisiin lisähäviöihin. Kytkentätaajuutta nostamalla jännitteen ja virran yliaaltojen suuruus pienenee, mikä laskee moottorin kokonaishäviöitä ja erityisesti roottorin häviöitä. Tästä huolimatta hyöty on epälineaarinen ja tasaantuva. Kirjallisuudessa tehtyjen kokeiden perusteella kytkentätaajuuden noston matalalta tasolta (esimerkiksi 2

kHz:stä 4 kHz:iin) havaittiin säästävän tehoa, mutta taajuuden jatkuva kasvattaminen (esimerkiksi 8 kHz:iin) tuottaa enää marginaalisen pienennyksen häviöissä. Samalla kytkentätaajuuden kasvattaminen lisää taajuusmuuttajan omia kytkentähäviöitä, joten koko käytön optimaalisen hyötysuhteen saavuttaminen on aina kompromissi.

Mikäli sähkökäytön suurten tehojen vuoksi joudutaan rajoittumaan mataliin kytkentätaajuuksiin, kasvaa moottorin kokema lämpökuorma ja ylikuumenemisriski. Näissä tilanteissa tehokkaaksi lämpötilanhallinnan ja häviöiden minimoinnin ratkaisuksi nousi ulkoinen suodatus. Kolmivaiheisen kuristimen (line reactor) tai suodattimen asentaminen taajuusmuuttajan ja moottorin väliin suojaa moottorin eristeitä ylikuumenemiselta ja mahdollistaa taajuusmuuttajan ajamisen järjestelmän häviöitä minimoivalla matalammalla taajuudella.

5.2.2 Kuormituksen vaikutus ja osakuormakäyttö

Aineisto paljasti myös, että harmonisten lisähäviöiden dynamiikka suhteessa moottorin mekaaniseen kuormitukseen poikkeaa täysin perinteisten lisähäviöiden käyttäytymisestä. Siinä missä perinteiset lisähäviöt ja lämpöhäviöt reagoivat vääntömomenttiin, taajuusmuuttajasyötön absoluuttiset harmoniset häviöt johtuvat ensisijaisesti jännitespektristä ja pysyvät siksi melko staattisina.

Häviöiden keskinäinen dynamiikka on käänteinen: kun moottorin mekaaninen kuormitus pienenee, muiden häviöiden laskiessa harmonisten häviöiden prosentuaalinen osuus kokonaishäviöistä nousee jyrkästi. Koska harmoniset lisähäviöt hallitsevat suhteellisesti eniten osakuormilla ajettaessa, sähköisten häviöiden minimointitekniikoiden (ELMT) ja vuo-ohjeen dynaamisen säätämisen avulla saavutettavat tehokkuushyödyt ovat suurimmillaan juuri matalilla kuormitusmomenteilla.

5.2.3 Häviöiden suuruusluokka ja komponenttitason erittely

Analyyttisten mallien ja mittausten mukaan PWM-syötön aiheuttama magneettipiirin lisärasitus kohdistuu lähes täysin klassisiin pyörrevirtahäviöihin. Pyörrevirtahäviöiden on mitattu olevan PWM-syötöllä jopa noin 1,39 kertaa suuremmat kuin sinisyötöllä, kun taas hystereesihäviöiden kasvu voi invertterikäytössä jopa nollaantua.

Näiden häviöiden jakautuminen koneen rakenteisiin on epätasaista. Mittaukset osoittavat rautahäviöiden kasvun pakkautuvan paikallisesti: PWM-syöttö voi kasvattaa häviöitä staattorin hampaistossa 73 %, kun taas ikeen alueella kasvu on maltillisempaa, noin 3 %. Yksi kriittisimmistä havainnoista on lämpökuorman siirtyminen roottoriin. Tyhjäkäynnillä pelkästään PWM-syötöstä johtuvat ylimääräiset roottorin rautahäviöt voivat muodostaa 15-25 % koko koneen kokonaisrautahäviöistä, minkä jäähdyttäminen umpikoteloidussa moottorirakenteessa on haastavaa.

5.3 Nimellistehon ja harmonisten lisähäviöiden suhde (Regressiomalli)

Harmonisten lisähäviöiden suhteellinen osuus pysyy koko tarkastellulla 1,1-37 kilowatin tehoalueella varsin stabiilina, asettuen pääosin 0,4 % ja 0,8 % väliin moottorin nimellistehosta. Tämä viittaa vahvasti siihen, että häviöiden suuruusluokka on karkeasti arvioitavissa suoraan moottorin kilpiarvon perusteella absoluuttisesta kokoluokasta riippumatta. Yhdistetylle aineistolle muodostettiin lineaarinen regressiomalli.

$$y = 4{,}9955x + 8{,}1683$$

Yhtälössä x on moottorin nimellisteho kilowatteina ja y ennustettu harmoninen lisähäviö watteina. Mallin selitysaste R^2 on 0,8436, mikä osoittaa vahvan tilastollisen korrelaation, vaikka yhdistetty data koostuu useista erillisistä tutkimuksista ja poikkeavista koeasetelmista. Mallin luonnollinen hajonta johtuu muun muassa eri tutkimuksissa käytetyistä kytkentätaajuuksista ja moottorien materiaalieroista. Kokonaisuudessaan regressioyhtälö tarjoaa käytännönläheisen ja nopean työkalun PWM-syötön lisähäviöiden karkeaan arviointiin ilman vaativaa elementtimenetelmän simulointia tai kalliita kalorimetrisiä kokeita.

5.4 Johtopäätökset

Taajuusmuuttajakäyttöjen energiatehokkuuden maksimointi edellyttää aina kokonaisvaltaista järjestelmätason tarkastelua. Pelkän sähkömoottorin tai taajuusmuuttajan erillinen optimointi ei riitä, sillä järjestelmän optimaalinen hyötysuhde on kompromissi invertterin kytkentähäviöiden ja moottorin harmonisten lisähäviöiden välillä. Opinnäytetyön kirjallisuus-

analyysin ja kerätyn datan pohjalta teollisuuden sähkökäyttöjen suunnitteluun ja käyttöön voidaan antaa seuraavat käytännön suositukset:

1. Lämpökuorman hallinta ja ulkoinen suodatus: taajuusmuuttajasyöttö lisää roottoriin kohdistuvaa lämpökuormaa verrattuna perinteiseen sinisyöttöön. PWM-syötöstä johtuvat roottorin ylimääräiset rautahäviöt voivat muodostaa jopa 15–25 % koneen kokonaisrautahäviöistä. Vaikka tämä roottorin lisäkuorma on rautahäviöiden tasolla merkittävä, koko moottorin tasolla tarkasteltuna harmoniset lisähäviöt ovat suhteellisen pieniä: noin 0,4–0,8 % moottorin nimellistehosta. Kuitenkin, mikäli invertterin kytkentätaajuus joudutaan pitämään matalana suurten tehojen vuoksi, kolmivaiheisen verkkokuristimen tai LC-suodattimen käyttö on suositeltavaa moottorin eristeiden suojaamiseksi ja ylikuumenemisen estämiseksi.

2. Häviöiden arviointi esisuunnitteluvaiheessa: työssä kehitettyä lineaarista regressiomallia voidaan hyödyntää suoraviivaisena, suuntaa antavana työkaluna taajuusmuuttajakäyttöjen alustavassa mitoituksessa. Malli ei sellaisenaan korvaa tarkkaa elementtimenetelmän (FEM) simulointia tai yksityiskohtaista termistä mallinnusta lopullisessa laitesuunnittelussa, mutta sen avulla suunnitteluinsinöörit saavat nopean ensiarvion häviöiden suuruusluokasta pelkän moottorin kilpitehon perusteella. Tämä auttaa hahmottamaan alustavaa ylimääräistä jäähdytystarvetta ja tunnistamaan jo hankkeen alkuvaiheessa ne kriittiset kohteet, jotka vaativat tarkempaa numeerista jatkoanalyysiä.

Tulevaisuudessa työssä esitettyä regressiomallia olisi mahdollista tarkentaa keräämällä lisää standardoitua empiiristä mittausdataa. Uusien teholuokkien ja kytkentätaajuuksien sisällyttäminen malliin parantaisi sen yleispätevyyttä ja luotettavuutta suunnittelutyökaluna.

Lähteet

Alamri, B. ja Darwish, M. (2015) ”Power loss investigation in HVDC for cascaded H-bridge multilevel inverters (CHB-MLI)”, 2015 IEEE Eindhoven PowerTech. 2015 IEEE Eindhoven PowerTech, Eindhoven, Netherlands: IEEE, s. 1–7. Saatavissa: https://doi.org/10.1109/PTC.2015.7232810.

Benharref, S. ym. (2025) ”Fast Computational Method for PWM Strategy Comparison of Machine and Inverter Electrical Losses: Application on WLTC Cycle”, IEEE Transactions on Industrial Electronics, 72(6), s. 5549–5557. Saatavissa: https://doi.org/10.1109/TIE.2024.3482006.

Boglietti, A. ym. (2010) ”Core loss estimation method for PWM inverter fed induction motors”, IECON 2010 - 36th Annual Conference on IEEE Industrial Electronics Society. IECON 2010 - 36th Annual Conference of IEEE Industrial Electronics, Glendale, AZ, USA: IEEE, s. 811–816. Saatavissa: https://doi.org/10.1109/IECON.2010.5675180.

Boglietti, A. ym. (2024) ”About the Evolution of the Iron Losses: From Sinusoidal to PWM Inverter Supply”, 2024 International Conference on Electrical Machines (ICEM). 2024 International Conference on Electrical Machines (ICEM), Torino, Italy: IEEE, s. 1–7. Saatavissa: https://doi.org/10.1109/ICEM60801.2024.10700380.

Burkard, F., Gneiting, A. ja Parspour, N. (2025) ”PWM Loss Analysis in Electrically Excited Synchronous Machines: Implications for Loss-Optimal Operation”, 2025 IEEE International Electric Machines & Drives Conference (IEMDC). 2025 IEEE International Electric Machines & Drives Conference (IEMDC), Houston, TX, USA: IEEE, s. 697–702. Saatavissa: https://doi.org/10.1109/IEMDC60492.2025.11061020.

Cao, W. ym. (2010) ”Comparison of Stray Load and Inverter-Induced Harmonic Losses in Induction Motors Using Calorimetric and Harmonic Injection Methods”, IEEE Transactions on Industry Applications, 46(1), s. 249–255. Saatavissa: https://doi.org/10.1109/TIA.2009.2036675.

Cremente, D. ym. (2022) ”Measurements and Prediction of Iron Losses in Laminated Magnetic Cores Supplied By Ultra-High Switching Frequency PWM”, 2022 IEEE Energy Con-

version Congress and Exposition (ECCE). 2022 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE), Detroit, MI, USA: IEEE, s. 01–07. Saatavissa: https://doi.org/10.1109/ECCE50734.2022.9947601.

Di Piazza, M.C. ja Pucci, M. (2014) ”Efficiency analysis in induction motor drives with discontinuous PWM and electrical loss minimization”, 2014 International Conference on Electrical Machines (ICEM). 2014 XXI International Conference on Electrical Machines (ICEM), Berlin, Germany: IEEE, s. 736–743. Saatavissa: https://doi.org/10.1109/ICELMACH.2014.6960263.

Gmyrek, Zbigniew, Boglietti, A. ja Cavagnino, A. (2008) ”Estimation and analysis of iron losses in induction motors under sinusoidal and PWM excitation”, 2008 18th International Conference on Electrical Machines. 2008 International Conference on Electrical Machines (ICEM), Vilamoura, Portugal: IEEE, s. 1–6. Saatavissa: https://doi.org/10.1109/ICELMACH.2008.4800065.

Gmyrek, Z., Boglietti, A. ja Cavagnino, A. (2008) ”Iron Loss Prediction With PWM Supply Using Low- and High-Frequency Measurements: Analysis and Results Comparison”, IEEE Transactions on Industrial Electronics, 55(4), s. 1722–1728. Saatavissa: https://doi.org/10.1109/TIE.2008.917067.

Hothongkham, P. ja Kinnares, V. (2007) ”Investigation into Harmonic Losses in a PWM Multilevel cascaded H-Bridge Inverter Fed Induction Motor”, 2007 7th International Conference on Power Electronics and Drive Systems. 2007 7th International Conference on Power Electronics and Drive Systems, Bangkok, Thailand: IEEE, s. 1043–1048. Saatavissa: https://doi.org/10.1109/PEDS.2007.4487832.

Huang, P. ja Hu, Q. (2007) ”A novel model for predicting iron losses of electric machine fed by PWM inverter”, 2007 International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS). 2007 International Conference on Electrical Machines and Systems, Seoul, Korea (South): IEEE, s. 1076–1079. Saatavissa: https://doi.org/10.1109/ICEMS12746.2007.4411969.

Irimie, D.L. ym. (2014) ”Loss analysis of small three-phase cage-induction motors under sinusoidal and PWM voltage supply”, 2014 International Conference on Applied and Theoretical Electricity (ICATE). 2014 International Conference on Applied and Theoretical Elec-

tricity (ICATE), Craiova, Romania: IEEE, s. 1–5. Saatavissa: https://doi.org/10.1109/ICATE.2014.6972642.

Kaczmarek, R., Amar, M. ja Protat, F. (1996) ”Iron loss under PWM voltage supply on Epstein frame and in induction motor core”, IEEE Transactions on Magnetics, 32(1), s. 189–194. Saatavissa: https://doi.org/10.1109/20.477571.

Karkkainen, H. ym. (2016) ”Converter-fed induction motor losses in different operating points”, 2016 18th European Conference on Power Electronics and Applications (EPE’16 ECCE Europe). 2016 18th European Conference on Power Electronics and Applications (EPE’16 ECCE Europe), Karlsruhe: IEEE, s. 1–8. Saatavissa: https://doi.org/10.1109/EPE.2016.7695508.

Liu, F. ym. (2015) ”Iron loss evaluation and comparison in application of reduced common mode voltage PWM methods”, 2015 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE). 2015 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition, Montreal, QC, Canada: IEEE, s. 4026–4032. Saatavissa: https://doi.org/10.1109/ECCE.2015.7310228.

Matsumori, H. ym. (2019) ”Iron loss calculation under PWM inverter switching for SiFe steel materials”, 2019 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE). 2019 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE), Baltimore, MD, USA: IEEE, s. 2315–2320. Saatavissa: https://doi.org/10.1109/ECCE.2019.8912818.

Mishra, P. ja Maheshwari, R. (2017) ”LC filter design method for pulse width modulated inverter Fed induction motor drive”, 2017 IEEE Transportation Electrification Conference (ITEC-India). 2017 IEEE Transportation Electrification Conference (ITEC-India), Pune, India: IEEE, s. 1–6. Saatavissa: https://doi.org/10.1109/ITEC-India.2017.8356945.

Nevoloso, C. ym. (2025) ”On the Inadequacy of IEC 60034-2-3 and IEC 60034-30-2 Standards for Power Losses, Efficiency and Energy Class Evaluation in PWM Multilevel Inverter-Driven PMSM”, IEEE Open Journal of the Industrial Electronics Society, 6, s. 962–981. Saatavissa: https://doi.org/10.1109/OJIES.2025.3574857.

Oka, M. ym. (2020) ”Iron Loss Measurements under PWM Excitation for Ring Cores Made of Ultrathin Electrical Steel Sheets for a Stator Core”, 2020 International Conference on Electrical Machines (ICEM). 2020 International Conference on Electrical Machines

(ICEM), Gothenburg, Sweden: IEEE, s. 2294–2300. Saatavissa: https://doi.org/10.1109/ICEM49940.2020.9270980.

Okunishi, Y. ym. (2024) ”Modelling for PWM Carrier Loss Evaluation in Claw-pole Machine using MATLAB/Simulink”, 2024 27th International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS). 2024 27th International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS), Fukuoka, Japan: IEEE, s. 2687–2693. Saatavissa: https://doi.org/10.23919/ICEMS60997.2024.10921352.

Otypka, J. ym. (2017) ”The influence of nonharmonic voltage source on losses in induction motor”, 2017 18th International Scientific Conference on Electric Power Engineering (EPE). 2017 18th International Scientific Conference on Electric Power Engineering (EPE), Kouty nad Desnou, Czech Republic: IEEE, s. 1–6. Saatavissa: https://doi.org/10.1109/EPE.2017.7967246.

Pires, W.L. ym. (2007) ”A Study on Induction Motors’ Iron Losses Taking Frequency Variation into Account - Sinusoidal Versus PWM Supply”, 2007 IEEE International Electric Machines & Drives Conference. 2007 IEEE International Electric Machines and Drives Conference, IEMDC07, Antalya: IEEE, s. 1605–1609. Saatavissa: https://doi.org/10.1109/IEMDC.2007.383669.

Danfoss (2022). SEMIKRON and Danfoss Silicon Power join forces to establish the ultimate partner in Power Electronics Saatavissa: https://www.danfoss.com/en/about-danfoss/news/cf/semikron-and-danfoss-silicon-power-join-forces/ (Viitattu: 30. huhtikuuta 2026).

Sergeant, P. ym. (2014) ”Losses in VSI-PWM fed axial flux machines”, 2014 16th European Conference on Power Electronics and Applications. 2014 16th European Conference on Power Electronics and Applications (EPE’14-ECCE Europe), Lappeenranta, Finland: IEEE, s. 1–6. Saatavissa: https://doi.org/10.1109/EPE.2014.6910787.

Stella, F. ym. (2024) ”PWM-Induced Losses Estimation in Electrical Motor Driven with GaN-Based Inverter”, 2024 International Conference on Electrical Machines (ICEM). 2024 International Conference on Electrical Machines (ICEM), Torino, Italy: IEEE, s. 1–6. Saatavissa: https://doi.org/10.1109/ICEM60801.2024.10700058.

Strandt, A., Hu, J. ja Wei, L. (2014) ”No-load power losses and motor overheating effects versus PWM switching frequencies”, 2014 International Conference on Renewable Energy Research and Application (ICRERA). 2014 International Conference on Renewable Energy Research and Application (ICRERA), Milwaukee, WI, USA: IEEE, s. 280–283. Saatavissa: https://doi.org/10.1109/ICRERA.2014.7016570.

Tiihonen, M. ym. (2025) ”Loss Segregation Method For Converter-Fed Induction Machines Based On Experimental Testing”, IECON 2025 – 51st Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society. IECON 2025 – 51st Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society, Madrid, Spain: IEEE, s. 1–6. Saatavissa: https://doi.org/10.1109/IECON58223.2025.11221064.

Van Der Geest, M., Polinder, H. ja Ferreira, J.A. (2014) ”Influence of PWM switching frequency on the losses in PM machines”, 2014 International Conference on Electrical Machines (ICEM). 2014 XXI International Conference on Electrical Machines (ICEM), Berlin, Germany: IEEE, s. 1243–1247. Saatavissa: https://doi.org/10.1109/ICELMACH.2014.6960341.

Waide, P. & Brunner, C. U. (2011). Energy-Efficiency Policy Opportunities for Electric Motor-Driven Systems. International Energy Agency (IEA) Working Paper.

Xue, S. ym. (2017) ”Iron Loss Model for Electrical Machine Fed by Low Switching Frequency Inverter”, IEEE Transactions on Magnetics, 53(11), s. 1–4. Saatavissa: https://doi.org/10.1109/TMAG.2017.2696360.

Zhang, D. ym. (2017) ”Loss characteristic analysis of small and medium-sized induction motors fed by PWM inverter based on the experiment measurements”, IECON 2017 - 43rd Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society. IECON 2017 - 43rd Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society, Beijing: IEEE, s. 2053–2058. Saatavissa: https://doi.org/10.1109/IECON.2017.8216345.

Zhao, H. ym. (2017) ”Magnetic Loss Versus Frequency in Non-Oriented Steel Sheets and Its Prediction: Minor Loops, PWM, and the Limits of the Analytical Approach”, IEEE Transactions on Magnetics, 53(11), s. 1–4. Saatavissa: https://doi.org/10.1109/TMAG.2017.2701299.

Liite

Liite 1. kirjallisuustutkimustaulukot

Tutkimus / Lähde	**Kone-tyyppi**	**Napa-pari-luku (Navat)**	**Syöttö-taajuus**	**Teho**	**Modulointime-netelmä**
Boglietti ym. (2010)	industrial induction motors	2 paria	50 Hz	7.5 to 30 kW	linear sine-tri-angle PWM
Cao ym. (2010)	induction motors	2 paria	50 Hz	1.1, 7.5, 15 to 30 kW	pulse width mo-dulation (PWM)
Di Piazza & Pucci (2014)	three phase induction motor	2 paria	50	2.2 kW	Space-vector pulsewidth mod-ulation (SV-PWM)
Irimie ym. (2014)	three-phase cage-in-duction motor	Ei mai-nittu	50Hz	2.2kW	PWM voltage supply
Kärkkäinen ym. (2016)	squirrel-cage machine	2 paria	50 Hz	15 kW	classic space vector modula-tion

Otypka ym. (2017)	induction motor	Ei mainittu	50Hz	4kW	PWM converter
Pires ym. (2007)	three-phase cage induction motors	2 paria	12 to 66 Hz	3.7 kW ja 55 kW	Space Vector Modulation
Strandt ym. (2014)	induction motor	Ei mainittu	30 Hz and 60 Hz	50 hp	pulse-width modulated (PWM) waveforms
Tiihonen ym. (2025)	converter-fed induction motor (IM)	Ei mainittu	45 Hz	37.0 kW	pulse width modulation
Zhang ym. (2017)	induction motors	Ei mainittu	Ei mainittu	5.5 kW, 22 kW, 30 kW, 37 kW, 45 kW and 55 kW	PWM inverter supply

Tutkimus / Lähde	**Kytkentätaajuus**	**Tulos, suora lainaus**
Boglietti ym. (2010)	2 kHz	"The total stator and rotor iron loss increase passing from sinusoidal to PWM supply can be roughly assumed equal to 50%, for fundamental line-to-line voltages in the range 200-310 V." "The reported results show that in no-load condition the additional rotor iron losses due to the PWM supply can be quantified around 15-25% of the total measured iron losses."

Cao ym. (2010)	8 kHz	"As a percentage of output power, the harmonic loss is respectively approximately 0.3%, 0.5%, 0.6%, and 0.8% of output power for the 1.1, 7.5, 15, and 30 kW machines..." "This feature implies that, for any particular operating speed, harmonic loss is virtually independent of load unlike stray load loss which is load dependent."
Di Piazza & Pucci (2014)	5 kHz	"As far as the ELMT is concerned, it can be easily observed that the power losses reduction due to its adoption is much more significant at low load torques..."
Irimie ym. (2014)	Ei mainittu	"the iron losses of the small three-phase cage-induction motor under study increase under PWM voltage supply as compared to the sinusoidal voltage supply from 216 to 235 W." "so that the increase of hysteresis loss component is nullified under PWM voltage supply." "With Kinetiq PPA2530 precision power analyzer, the components of x factor (RMS values of real and fundamental voltages) can be determined... for the rated voltage this factor is 1.178." "The eddy-current losses under PWM voltage supply are 1.388 higher than under sinusoidal voltage supply." "showing that, at rated voltage, the iron losses are with 73% higher, in the teeth, and with 3% higher, in the yoke, in respect to sine-waveform voltage supply."
Kärkkäinen ym. (2016)	4 kHz	"According to Fig. 5a, the additional harmonic losses (PHL) are dependent on both load and operating frequency." "Although the PHI values are decreases with operating frequency, the relative proportion of the additional harmonic losses increases significantly towards lower loads and operating frequencies..."
Otypka ym. (2017)	5 kHz	"The eddy current loss and additional loss are only given by voltage harmonic components in relationships (33) and (37) whereas influence hysteresis loss is eliminated by voltage frequency ratio" "The supply voltage distortion THDU is 20.5% and current distortion THD1 9.7% for VSD." "The efficiency difference is only 24 W for operating point 3.7 kW"

Pires ym. (2007)	2.5, 5.0 and 10.0 kHz	"- The better the steel lamination quality, the lower the iron losses (Li NP > Li SP > Li FP);""- The higher the operation frequency, the higher the iron losses (Li60Hz > Li36Hz > Li12Hz);""- Lower iron losses with sinusoidal supply than with PWM converter supply."
Strandt ym. (2014)	1.5 kHz, 2 kHz, and 4 kHz	"Experimental results indicate that as the drive PWM switching frequency decreases, the input power to the motor increases and the losses and heating in the motor increase." "Addition of a small line reactor should be sufficient to protect the motor from overheating when run with a low switching frequency" "The reactor will protect the motor and also permit operating the drive with a switching frequency which reduces losses and increases efficiency."
Tiihonen ym. (2025)	2 kHz, 4 kHz and 8 kHz	"The total loss presented in Table II decreases 70 W when using the carrier frequency 4 kHz over 2 kHz, but only 20 W when using 8 kHz over 4 kHz." "The fundamental iron loss decreases as the carrier frequency increases."
Zhang ym. (2017)	Ei mainittu	"Under rated load condition, the value of total losses of those six induction motors fed by PWM inverter are significantly larger than those fed by sinusoidal supply." "Under no load or small load conditions, the value of stator I2R loss... fed by PWM inverter is obviously larger than that fed by sinusoidal supply."