



Vaasan yliopisto
UNIVERSITY OF VAASA

Petteri Viitaniemi

Oikosulkumoottorin häviöt ja niiden pienentäminen taajuusmuuttajakäytössä

Tekniikan ja innovaatiojohtamisen
akateeminen yksikkö
Kandidaatintutkielma
Sähkö- ja energiatekniikka

Vaasa 2026

VAASAN YLIOPISTO**Tekniikan ja innovaatiojohtamisen akateeminen yksikkö**

Tekijä:	Petteri Viitaniemi		
Tutkielman nimi:	Oikosulkumoottorin häviöt ja niiden pienentäminen taajuusmuuttajakäytössä		
Tutkinto:	Tekniikan kandidaatti		
Koulutusohjelma:	Sähkö- ja energiatekniikka		
Opintosuunta:	Sähkötekniikka		
Työn ohjaaja:	Kimmo Kauhaniemi		
Valmistumisvuosi:	2026	Sivumäärä:	36

TIIVISTELMÄ:

Tässä kandidaatintutkielmassa tarkastellaan oikosulkumoottorin häviöitä taajuusmuuttajakäytössä ja niiden vaikutusta moottorin lämpötilaan ja elinikään. Kolmivaiheiset oikosulkumoottorit muodostavat suuren osan teollisuuden sähkömoottoreista ja niiden osuus sähkönkulutuksesta on huomattava. Taajuusmuuttajakäyttö on yleistynyt, koska sen avulla moottorin pyörimisnopeus voidaan sovittaa prosessin hetkelliseen tarpeeseen ja näin ollen parantaa energiatehokkuutta ja ohjattavuutta. Taajuusmuuttajan pulssileveysmoduloitu jännite poikkeaa kuitenkin olennaisesti sinimuotoisesta verkkosyötöstä ja muuttaa moottorin sähkökäyttöön liittyviä häviöitä.

Tutkielman tavoitteena on selvittää, miten taajuusmuuttajakäyttö muuttaa oikosulkumoottorin häviöiden jakautumista verrattuna suoraan verkkoon kytkettyyn käyttöön, miten tämä näkyy moottorin lämpötilan nousuna ja millä tavoin nousut lämpötila vaikuttaa elinikään. Lisäksi tarkastellaan teknisiä ratkaisuja, joilla näitä haittoja, kuten eristerasitusta ja laakerivirtoja, voidaan rajoittaa.

Työ toteutetaan kirjallisuuskatsauksena. Aineistona hyödynnetään kansainvälisiä standardeja, tieteellisiä julkaisuja sekä valmistajien teknisiä ohjeita. Tarkastelu rajataan pieniin ja keskiuuriin kolmivaiheisiin oikosulkumoottoreihin ja tavallisiin taajuusmuuttajakäyttöihin. Myös erityisen suurta pyörimisnopeutta käyttävät koneet rajataan tarkastelun ulkopuolelle.

Kirjallisuuden perusteella todetaan, että taajuusmuuttajan aiheuttamat harmoniset yliaallot kasvattavat erityisesti kupari- ja rautahäviöitä. Kohonnut lämpötila on kriittinen tekijä eristyksen kestävyydelle; jo kymmenen asteen pysyvä lämpötilan nousu voi puolittaa käämieristyksen eliniän. Tulosten mukaan oikein valituilla suodatinratkaisuilla, optimoidulla kytkentätaajuudella ja eristetyillä laakereilla taajuusmuuttajakäyttö voidaan toteuttaa luotettavasti. Lopuksi todetaan, että häviöiden hallinta on keskeistä sähkökäytön kustannustehokkuuden ja kestäväen kehityksen tavoitteiden saavuttamiseksi teollisuudessa.

AVAINSANAT: Oikosulkumoottori, taajuusmuuttaja, hyötysuhde, yliaallot, häviöt, elinikä

Sisällys

1	Johdanto	6
1.1	Tutkimuksen taustat ja tavoitteet	6
1.2	Rajaus ja menetelmät	7
1.3	Tutkielman rakenne	7
2	Oikosulkumoottori	8
2.1	Oikosulkumoottorin rakenne ja toimintaperiaate	8
2.2	Moottorin häviöt ja hyötysuhde	9
3	Taajuusmuuttaja ja taajuusmuuttajakäyttö	13
3.1	Rakenne ja toimintaperiaate	13
3.2	Taajuusmuuttajan yliaallot	15
3.3	Taajuusmuuttajan häviöt ja hyötysuhde	16
4	Häviöt taajuusmuuttajakäytössä	18
4.1	Syöttötavan vaikutus häviöihin	18
4.2	Lämpötilan nousu ja vaikutus elinikään	22
5	Häviöiden pienentämisen tekniset ratkaisut	26
5.1	Systemi	27
5.2	Taajuusmuuttaja	28
5.3	Moottori	28
5.4	Suodattimet	28
5.5	Muut	30
6	Johtopäätökset	31
	Lähteet	33

Kuvat

Kuva 1. Oikosulkumoottorin räjäytyskuva (Mansour, 2020).	8
Kuva 2. Tehon jakautuminen moottorista (Nousiainen K.; Sähköenergiatekniikka; luentomoniste TTKK 1994).	12
Kuva 3. Taajuusmuuttajan piirikaavio (Polka, 2001).	13
Kuva 4. Taajuusmuuttajasta ulostuleva jännite (Polka, 2001).	14
Kuva 5. Yliaaltospektri (Korpinen ja muut, 2008).	16
Kuva 6. Taajuusmuuttajan häviöt (Sipilä, 2009).	17
Kuva 7. Taajuusmuuttajalla ohjattu oikosulkumoottorin kaavio (Kerszenbaum, 1992).	18
Kuva 8. 5.5 kW oikosulkumoottorin kokonaishäviöt kuormalla (Jiang ja muut, 2022).	20
Kuva 9. 5.5 kW sähkömoottorin staattorin kuparihäviöt kuormalla (Jiang ja muut, 2022).	20
Kuva 10. 5.5 kW sähkömoottorin roottorin kuparihäviöt kuormalla (Jiang ja muut, 2022).	21
Kuva 11. Moottorin mittauspisteet (Ding & Mi, 2011).	23
Kuva 12. Yliaaltoihin vaikuttavat järjestelmät (ABB, 2017).	27
Kuva 13. Kaaviokuva järjestelmästä, jossa on moottoripuolen aktiivitehosuodatin (Rao ja muut, 2020).	29

Taulukot

Taulukko 1. Kokeen tulokset ilman kuormaa (Ding & Mi, 2011).	19
Taulukko 2. Kokeen tulokset kuormalla (Ding & Mi, 2011).	19
Taulukko 3. Kokeen mittaustulokset (Ding & Mi, 2011).	23
Taulukko 4. Kolmivaihemoottorien eristysluokat (IEC 60034-1).	24

Lyhenteet

AC	Vaihtovirta (Alternating current)
DC	Tasavirta (Direct current)
DOE	Yhdysvaltain energiaministeriö (Department of Energy)

IEC	Kansainvälinen sähkötekninen komissio (International Electrotechnical Commission)
IGBT	Eristehilainen bipolaaritransistori (Insulated gate bipolar transistor)
IM	Oikosulkumoottori (Induction motor)
PWM	Pulssileveysmodulaatio (Pulse width modulation)
RMS	Tehollisarvo (Root mean square)
VFD	Taajuusmuuttaja (Variable frequency drive)
MSAPF	Moottoripuolen aktiivitehosuodatin (Motor side active power filter)

Symbolit

A, B	Eristekohtaiset vakiot (Insulation specific constants)
$\cos(\phi)$	Nimellinen tehokerroin (Nominal power factor)
f	Taajuus (Frequency)
I_m	Magnetoimisvirta (Magnetizing current)
I_n	Nimellisvirta (Nominal current)
L	Eristeen käyttöikä (Insulation life)
L_m	Magnetointi-induktanssi (Magnetizing inductance)
n	Roottorin nopeus (Rotor speed)
n_s	Tahtinopeus (Synchronous speed)
p	Napapariluku (Number of pole pairs)
P_1	Syöttöteho (Input power)
P_2	Akseliteho (Shaft power)
P	Taajuusmuuttajan lähtöteho (Inverter output power)
P_{cu1}	Staattorin kuparihäviöt (Stator copper losses)
P_{cu2}	Roottorin kuparihäviöt (Rotor copper losses)
P_{Fe}	Rautahäviöt (Iron losses)
P_i	Ilmaväliteho (Air gap power)
P_m	Mekaaninen teho (Mechanical power)
s	Jättämä (Slip)
T	Vääntömomentti (Torque)
T_A	Absoluuttinen lämpötila (Absolute temperature)
U	Jännite (Voltage)
U_n	Nimellisjännite (Nominal voltage)
η	Hyötysuhde (Efficiency)
ω	Roottorin kulmanopeus (Rotor angular velocity)
ω_s	Pyörivän kentän kulmanopeus (Synchronous angular velocity)

1 Johdanto

Sähkömoottorit muodostavat merkittävän osan teollisuuden sähkönkulutuksesta, ja niiden energiatehokkuuden parantaminen on keskeinen keino säästää energiaa. Kolmivaiheinen oikosulkumoottori on yksinkertaisen rakenteensa ja loistavan kestävyysvuoksi yleisin teollisuuden moottorityyppi. Perinteisesti näitä moottoreita on käytetty suoralla verkkosyötöllä, mutta nykyään on yhä yleisempää syöttää niitä taajuusmuuttajalla.

1.1 Tutkimuksen taustat ja tavoitteet

Taajuusmuuttajakäytön vahvuuksia on säädettävyys, minkä avulla moottorin pyörimisnopeus voidaan sovittaa vastaamaan tarkemmin prosessin tarpeeseen. Nopeudensäädön avulla voidaan pienentää energiakulutusta ja parantaa ohjattavuutta ilman mekaanisia kuristuksia tai venttiilejä.

Taajuusmuuttaja ei ole silti pelkkä häviötön lisäys perinteiseen oikosulkumoottoriin. Pulssileveysmoduloitu (PWM) jännite poikkeaa merkittävästi sinimuotoisesta verkkosyötöstä ja muuttaa siten moottorin häviöiden rakennetta. Syöttötavan seurauksena moottorin kuparihäviöt, rautahäviöt ja muut lisähäviöt voivat kasvaa. Tämä näkyy moottorissa lämpötilan nousuna, mikä taas toisaalta voi vaikuttaa moottorin arvioituun elinikään.

Tämän tutkielman tavoitteena on selvittää, miten taajuusmuuttajakäyttö muuttaa oikosulkumoottorin häviöitä ja miten näiden häviöiden kasvu vaikuttaa moottorin lämpötilaan ja elinikään. Tarkastelu keskittyy erityisesti tutkimaan syöttötavan vaikutusta häviöihin sekä keinoihin, millä taajuusmuuttajakäytöstä aiheutuneita lisähäviöitä voidaan pienentää. Lisäksi tarkastellaan lyhyesti koko sähkökäytön eli taajuusmuuttajan ja sähkömoottorin hyötysuhdetta, jotta voidaan paremmin ymmärtää, miksi taajuusmuuttajia käytetään lisähäviöistä huolimatta.

1.2 Rajaus ja menetelmät

Työ toteutetaan kirjallisuuskatsauksena. Lähdeaineisto kerättiin pääasiassa sähkötekniikan tieteellisistä tietokannoista. Akateemisten ja vertaisarvioitujen tutkimusartikkelien lisäksi aineistona hyödynnetään kansainvälisiä sähkötekniikan standardeja sekä laitevalmistajien, kuten ABB:n ja WEG:n, teknisiä manuaaleja. Laitevalmistajien ohjeiden sisällyttäminen katsaukseen on perusteltua, jotta työn teoreettinen analyysi pystytään sitomaan tiiviisti teollisuuden käytännön ratkaisuihin.

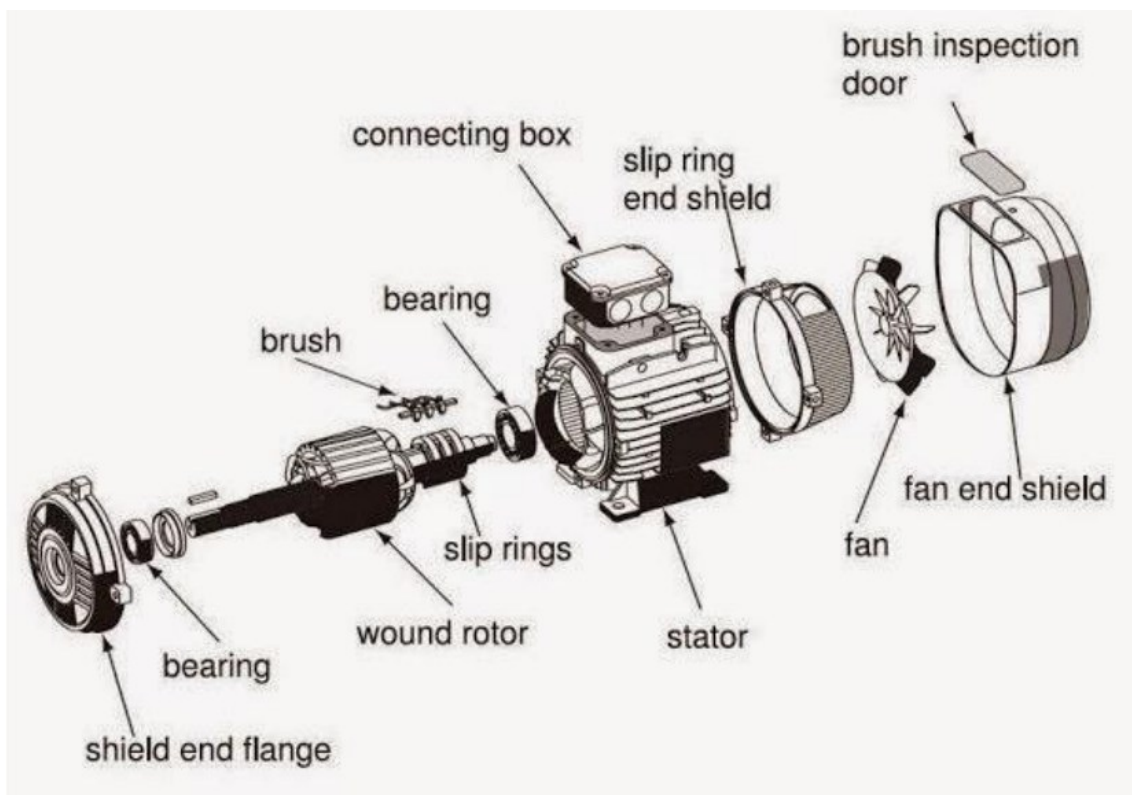
Tutkielman tarkastelu on rajattu yleisesti teollisuudessa käytettäviin pieniin ja keskisuurisiin kolmivaiheisiin oikosulkumoottoreihin sekä tavallisiin taajuusmuuttajakäyttöihin. Erittäin suuritehoiset tai hyvin suurta pyörimisnopeutta käyttävät erikoiskoneet on rajattu työn ulkopuolelle, jotta analyysi pysyy tiiviinä ja vertailukelpoisena. Katsauksen rajoitteena voidaan pitää sitä, että eri tutkimuksissa käytetyt moottorikoot ja koejärjestelyt poikkeavat toisistaan, minkä vuoksi tarkkojen numeeristen arvojen vertailu vaatii tulosten suhteuttamista kokonaisuuteen.

1.3 Tutkielman rakenne

Luvussa kaksi esitellään oikosulkumoottorin rakenne, toiminta sekä häviöiden ja hyötysuhteen perusjako. Luvussa kolme käydään läpi taajuusmuuttajan rakenne ja toiminta-periaate sekä tarkastellaan lyhyesti taajuusmuuttajakäytön häviöitä. Luvussa neljä analysoidaan, miten taajuusmuuttajakäyttö muuttaa moottorin häviöitä ja miten tämä näkyy lämpötilassa ja eliniässä. Luvussa viisi tarkastellaan häviöiden pienentämiseen liittyviä teknisiä ratkaisuja, minkä jälkeen luvussa kuusi esitetään työn yhteenveto ja johtopäätökset.

2 Oikosulkumoottori

Oikosulkumoottori on yksinkertaisen rakenteensa vuoksi yleisimpiä moottoreita teollisuudessa. Yksinkertaisen rakenteen ansiosta se on myös hyvin kestävä moottori. Oikosulkumoottorissa sekä roottorin että staattorin käämityksissä kulkee vaihtovirta. Roottorissa on häkkikäänitys ja staattorissa kolmivaihekäänitys. Vaihtovirta tuotetaan suoraan staattorin käämityksiin ja roottorin käämeihin sähkömagneettisen induktion avulla (Korpinen, 2008). Tämän takia oikosulkumoottoria kutsutaan myös induktiomoottoriksi.



Kuva 1. Oikosulkumoottorin räjäytyskuva (Mansour, 2020).

2.1 Oikosulkumoottorin rakenne ja toimintaperiaate

Kolmivaiheinen oikosulkumoottori koostuu staattorista ja häkkikäänitetystä roottorista. Staattorin käämitys muodostuu kolmesta sähköisesti samanlaisesta vaiheesta, jotka on sijoitettu staattorin uriin sähköisesti 120 asteen kulmaan toisistaan nähden. Kun näihin käämeihin syötetään symmetrinen kolmivaiheinen jännite, staattorin käämien sijoittelun

ansiosta koneen ilmarakoon muodostuu pyörivä magneettikenttä (Verkkonen, 2017). Yhtälön mukaan kenttä kiertää koneessa verkon taajuuteen ja napaparilukuun sidotulla tahtinopeudella

$$n_s = 60 \cdot \frac{f}{p}, \quad (1)$$

missä f ilmaisee taajuutta ja p napaparilukua. Pyörivä magneettikenttä leikkaa roottorin sauvoja ja indusoi niihin jännitteen, joka synnyttää niihin roottorivirran. Lenzin lain mukaisesti virrat pyrkivät vastustamaan magneettikentän pyörimistä roottoriin nähden, jolloin roottoriin kohdistuu vääntömomentti, joka saa sen pyörimään kentän suuntaisesti. Roottori ei saavuta koskaan kentän nopeutta, vaan pyörii hieman hitaammin. Tätä nopeuseroa kuvataan yhtälöllä

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

missä s ilmaisee jättämää ja n ilmaisee roottorin nopeutta. Tyypillisesti pienten ja keski suurten moottorien jättämä on noin 5–15 %, suurilla alle 2 %. Näin sähköverkosta syötetty kolmivaihevirta muuttuu staattorikäämitysten ja roottorin kautta akselilta saatavaksi mekaaniseksi tehoksi (Korpinen, 2008).

2.2 Moottorin häviöt ja hyötysuhde

Kuvan 2 avulla voidaan havainnollistaa moottorin häviöiden jakautumista. Kuvassa 2 Oikosulkumoottori saa verkosta syöttötehon P_1 . Osa tästä tehosta häviää staattorissa rauta- P_{Fe} ja staattorin kuparihäviöiden P_{Cu1} muodossa. Ilmaväliteho P_i siirtyy magneettikentän avulla roottoriin (Korpinen, 2008).

Kuvasta 2 nähdään, että roottorissa ilmaväliteho jakautuu kahteen osaan. Osa muuttuu roottorin kuparihäviöiksi P_{Cu2} ja osa kitka- ja tuuletushäviöiksi P_r . Lopputeho muodostaa

moottorin kehittämän mekaanisen tehon P_m . Akselilta ulos saatavaa hyödyllistä tehoa P_2 voidaan kuvata yhtälön avulla

$$P_2 = P_m - P_r. \quad (3)$$

Mekaaninen teho voidaan esittää momentin ja kulmanopeuden tulona yhtälön mukaan

$$P_m = \omega_r \cdot T, \quad (4)$$

missä ω_r on roottorin kulmanopeus ja T ilmaisee vääntömomenttia. Vastaavasti ilmapölyteho esitetään yhtälön

$$P_i = \omega_s \cdot T, \quad (5)$$

missä ω_s on pyörivän kentän kulmanopeus. Moottorin mekaaninen teho saadaan yhtälöstä

$$P_m = (1 - s) \cdot P_i. \quad (6)$$

Roottorin resistiiviset häviöt saadaan yhtälön 7 avulla

$$P_{cu2} = s \cdot P_i. \quad (7)$$

Yhtälöstä 7 nähdään, että roottorin resistiiviset häviöt ovat suoraan verrannollisia jättämään. Suurella jättämällä merkittävä osa ilmapölytehosta kuluu roottorin lämmittämiseen (Korpinen, 2008). Ääripäiden tarkastelu auttaa hahmottamaan ilmiötä. Kun $s = 1$, roottori ei pyöri ja ilmapölyteho kuluu roottorihäviöiksi, kun taas $s = 0$ roottorissa ei kulje virtaa eikä häviöitä tai momenttia synny (Mansour, 2020).

Perinteisten häviökomponenttien lisäksi oikosulkumoottorissa esiintyy lisähäviöitä, jotka määritellään kuormituksesta riippuviksi epämääräisiksi häviöiksi. Nämä häviöt syntyvät muun muassa magneettivuon yliaalloista ja vuovuodoista staattorin ja roottorin rautaosissa (Verkkonen, 2017).

Aikaisemmin mainitut staattorin kuparihäviöt ovat suoraan verrannollisia johtimen resistanssiin, joka kasvaa lämpötilan noustessa. Lämpötila onkin moottorin mitoituksen ja eliniän kannalta tärkeä tekijä, sillä taajuusmuuttajakäyttö nostaa käämitysten ja rungon lämpötilaa tyypillisesti enemmän kuin suora verkkokäyttö (ABB, 2019). Erityisesti taajuusmuuttajan aiheuttamat harmoniset virrat kasvattavat virran tehollisarvoa (Zhao ja muut, 2012). Virran tehollisarvo voidaan esittää yhtälöllä

$$I^2 = I_{av}^2 + I_{\sim}^2, \quad (8)$$

missä I_{av} on virran tasakomponentti ja I on yliaaltokomponenttien summa.

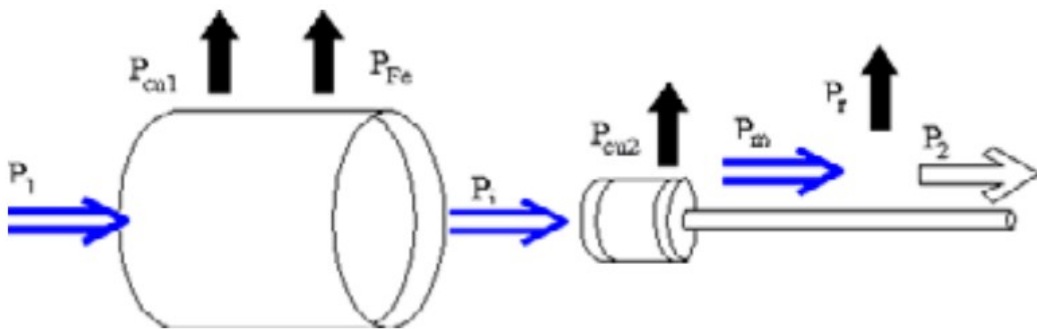
Häviöiden suhteellinen jakautuminen vaihtelee moottorin koon ja kuormituksen mukaan, mutta yleisesti staattorin kuparihäviöt muodostavat suurimman osan oikosulkumoottorin kokonaishäviöistä (Jiang ja muut, 2022). Taajuusmuuttajakäytössä häviöiden rakenne kuitenkin muuttuu, ja lisähäviöiden osuus kokonaisuudesta kasvaa verrattuna perinteiseen sinimuotoiseen verkkosyöttöön (Aarniovuori ja muut, 2016). Tästä syystä taajuusmuuttajalla syötetyn moottorin kokonaishäviöt ovat selvästi suuremmat kuin suorassa verkkokäytössä, mikä on huomioitava järjestelmän hyötysuhdetarkasteluissa (WEG, 2019).

Moottorin hyötysuhde saadaan vertaamalla akselitehoa syöttötehoon kaavan 9 mukaisesti

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} \quad (9)$$

Nimelliskäytössä se voidaan laskea myös arvokilven nimellisarvoista seuraavan yhtälön avulla (Korpinen, 2008):

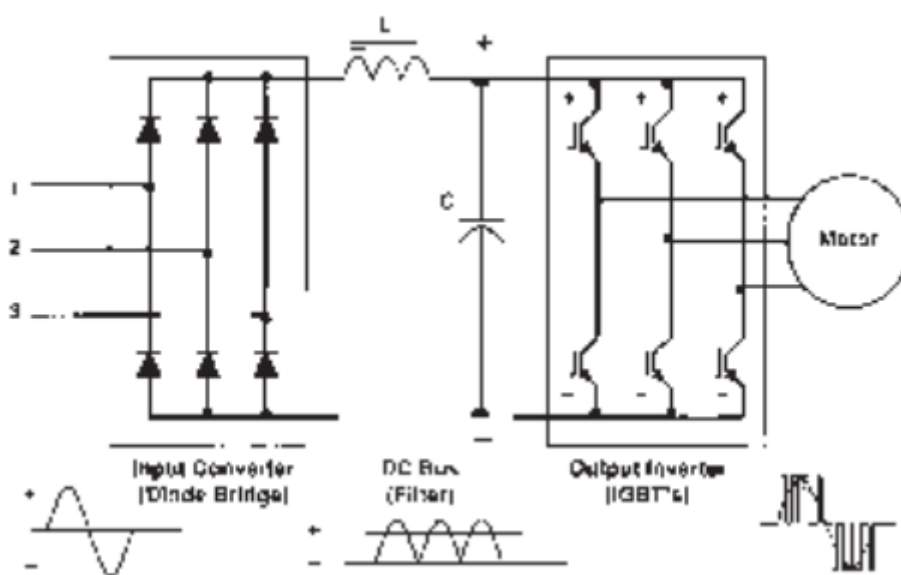
$$\eta = \frac{P_2}{\sqrt{3} \cdot U_n \cdot I_n \cdot \cos(\varphi_n)} \quad (10)$$



Kuva 2. Tehon jakautuminen moottorista (Nousiainen K.; Sähköenergiateknikka; luentomoniste TTKK 1994).

3 Taajuusmuuttaja ja taajuusmuuttajakäyttö

Taajuusmuuttaja on tehoelektronikkalaite, jolla ohjataan oikosulkumoottorin pyörimisnopeutta muuttamalla moottorille syötettävän jännitteen taajuutta ja suuruutta (Jokinen, 2018). Taajuusmuuttajalla on myös muita käyttökohteita, mutta keskitymme tässä työssä vain moottoriohjaukseen.



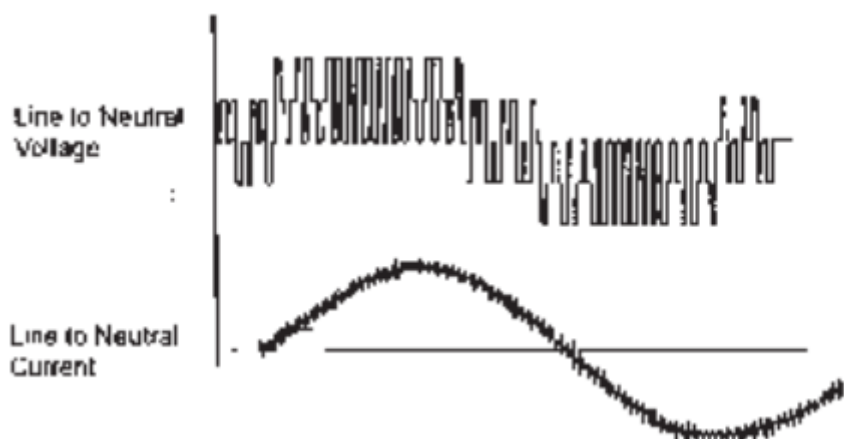
Kuva 3. Taajuusmuuttajan piirikaavio (Polka, 2001).

3.1 Rakenne ja toimintaperiaate

Kuvasta 3 näemme tavallisen taajuusmuuttajan rakenteen, mikä koostuu tasasuuntaajasta, välipiiristä sekä vaihtosuuntaajasta. Tavallisessa rakenteessa kolmivaiheinen verkko kytketään ensin tasasuuntaajaan, joka muuttaa vaihtojännitteen tasajännitteeksi. Tasajännite varastoidaan välipiiriin, missä on kondensaattorit ja mahdollinen kuristin. Välipiirissä kondensaattori ja kela pyrkivät suodattamaan aaltomuodon vaihtovirtakomponentit pois. Mitä puhtaampi tasavirta-aaltomuoto, sitä puhtaampi on taajuusmuuttajasta ulostuleva aaltomuoto (Polka, 2001). Välipiiristä energiaa syötetään kolmivaiheiseen vaihtosuuntaajaan, johon myös moottori on kytketty. Vaihtosuuntaajan kolme haara tuottavat moottorin napoihin jännitteet U_R , U_S ja U_T , jotka kytkeytyvät vuorotellen

tasajännitevälipiirin plus- ja miinuskiskoon. Näiden napajännitteiden erotuksista syntyy moottorin pääjännitteet (Jokinen, 2018).

Vaihtosuuntaajan jokainen haara muodostuu puolijohdekytkimestä ja tämän rinnalle kytketystä diodista. Sitä ohjataan siten, että moottorin napa kytkeytyy nopeasti vuoroitellen välipiirin plus- ja miinuskiskoon. Koska välipiirin tasajännite on vakio, ulostulojännitteiden tehollisarvoa ei muuteta jännitteen huippuarvoa muuttamalla, vaan pulssinleveysmodulaatiolla (PWM). Jännite katkaistaan osaksi jaksoa nolaksi ja pulssien pituutta säätämällä saadaan aikaan haluttu tehollisarvo ja sinimuotoista perusaaltoa seuraava jännite (Jokinen, 2018). Taajuusmuuttajasta tulee ulos pulssimaista aaltomuotoa, mikä muistuttaa siniaaltoa (Polka, 2001).



Kuva 4. Taajuusmuuttajasta ulostuleva jännite (Polka, 2001).

Oikosulkumoottorin synkroninen pyörimisnopeus määräytyy aikaisemmin esitetyn kaavan yksi mukaan eli taajuuden ja napapariluvun perusteella, joten taajuusmuuttajaa ohjaamalla voidaan säätää moottorin nopeutta. Pelkkä taajuuden muuttaminen ei riitä, vaan pitää myös muuttaa jännitteen tehollisarvoa. Yhtälössä 11 esitetään magnetoimisvirta, mikä on kääntäen verrannollinen taajuuteen, eli likimäärin

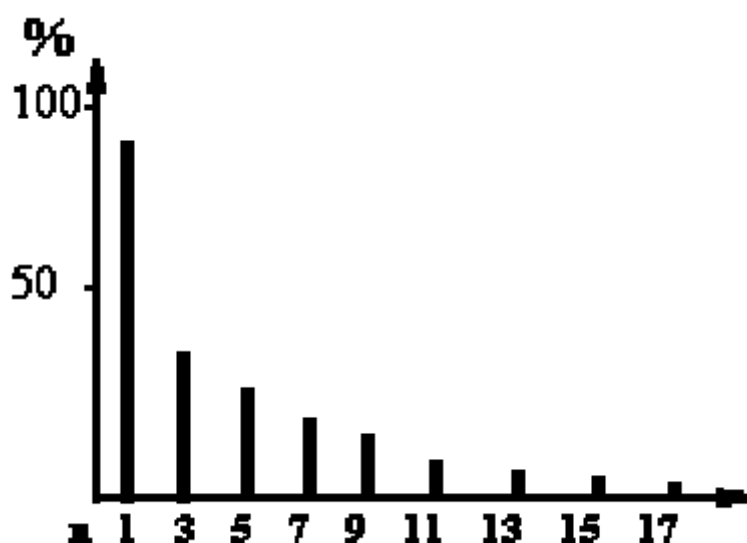
$$I_m = \frac{U}{2\pi \cdot f \cdot L_m}. \quad (11)$$

Jos taajuutta pienennetään, mutta jännite pidetään vakiona, magnetoimisvirta ja magneettivuon suuruus kasvaisivat liikaa. Jotta moottorin momentti ja lämpeneminen pysyisivät toivottuina, taajuutta ja jännitettä säädetään niin, että suhde $\frac{U}{f}$ pysyy nimellistajuuteen asti likimain vakiona (Polka, 2001). Tämän jälkeen jännitettä ei voida enää nostaa, vaan nopeuden kasvu tapahtuu kentänheikennysalueella, jossa magnetoimisvirta ja magneettivuo pienenee. Taajuusmuuttajaa käytetään siis yleisesti sovelluksissa, joissa tarvitaan portaattomasti säädettävää oikosulkumoottorin pyörimisnopeutta ja sen myötä ohjattavaa mekaanista tehoa.

3.2 Taajuusmuuttajan yliaallot

Induktiomoottori ja monet muut sähkölaitteet on suunniteltu toimimaan sinimuotoisella jännitteellä. Taajuusmuuttajat kuitenkin ovat luonteeltaan epälineaarisia kuormia, joiden verkosta ottama virta poikkeaa merkittävästi sinimuodosta. Tämä aaltomuodon vääristymä voidaan jakaa Fourier-analyysin avulla alkuperäiseen perustaajuiseen siniaaltoon sekä moneen eritaajuiseen harmoniseen yliaaltoon. Taajuusmuuttajakäytössä nämä yliaallot aiheuttavat ongelmia. Taajuusmuuttajan verkkopuoli syöttää tätä häiriötä takaisin verkkoon, kun taas laitteen moottoripuoli syöttää jännitettä sähkömoottorille, mikä voi vaikuttaa merkittävästi hyötysuhteeseen ja elinikään. (Korpinen ja muut, 2008).

Fourier-analyysin ensimmäinen termi on perustaajuus. Muut termit ovat harmonisia yliaaltoja, joita yleensä käsitellään kuvan 5 kaltaisen yliaaltospektrin avulla. Yliaaltojen suuruudet ilmoitetaan myös tavallisesti suhteellisuusarvoina (Korpinen ja muut, 2008).

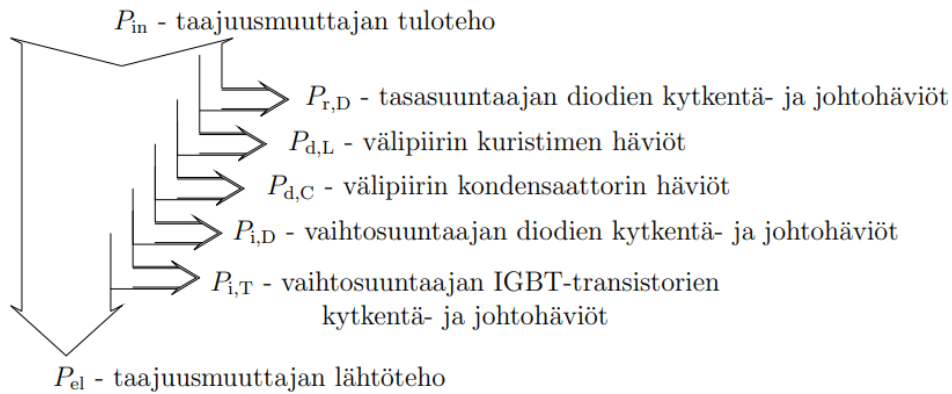


Kuva 5. Yliaaltospektri (Korpinen ja muut, 2008).

Kun oikosulkumoottoria syötetään taajuusmuuttajalla, säröytynyt virta ja jännite aiheuttavat sähkömoottorissa useita haittailmiöitä (Korpinen ja muut, 2008). Kaikkein merkittävistä näistä on moottorin kuparihäviöiden voimakas kasvu. Näiden ylimääräisten häviöiden seurauksena moottorin kokonaishyötysuhde laskee ja liiallinen lämpeneminen kasvattaa eristeiden vanhenemisnopeutta merkittävästi (Korpinen ja muut, 2008).

3.3 Taajuusmuuttajan häviöt ja hyötysuhde

Taajuusmuuttajan sisäiset häviöt muodostuvat useasta eri komponentista: tasasuuntaajan diodeista, välipiirin kuristimesta ja kondensaattorista sekä vaihtosuuntaajan diodeista ja IGBT-transistoreista. Näiden häviöiden keskinäistä jakautumista voidaan havainnollistaa kuvan 6 avulla.



Kuva 6. Taajuusmuuttajan häviöt (Sipilä, 2009).

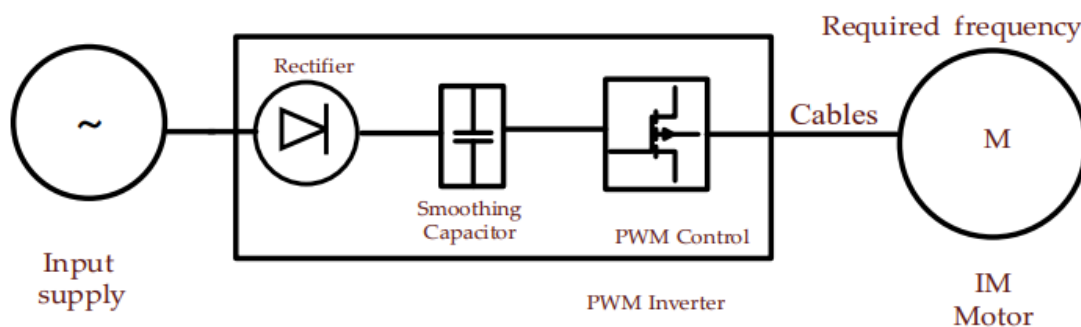
Puolijohdekomponenttien, kuten transistorien ja diodien, häviöt jaetaan kytkentä- ja johtohäviöihin (Haider ja muut, 2020). Johtohäviöt syntyvät silloin, kun komponentti on johtavassa tilassa ja sen läpi kulkee virta. Kytkentähäviöt taas syntyvät kytkentätaapahtuman aikana, jolloin puolijohde yllä vaikuttaa samanaikaisesti suuri jännite ja suuri virta, mikä aiheuttaa hetkellisen tehopiikin. Taajuusmuuttajan suurimmat häviöt painottuvat tyypillisesti vaihtosuuntaajaan, mikä selittyy nimenomaan suurella kytkentätaajuudella.

Kytkentätaajuuden valinta on keskeinen asia taajuusmuuttajakäytön optimoinnissa. Korkeampi kytkentätaajuus kasvattaa suoraan taajuusmuuttajan kytkentähäviöitä, mikä voi johtaa laitteen ylikuumenemiseen ja tarpeeseen rajoittaa lähtövirtaa (ABB, 2016). Vaikka kytkentätaajuuden nostaminen voi vaimentaa moottorin magneettista ääntä ja vähentää moottorissa syntyviä harmonisia häviöitä, energiatehokkuuden näkökulmasta sitä ei yleensä kannata nostaa enempää kuin sovellus vaatii (Ding & Mi, 2011). Taajuusmuuttajan hyötysuhde on yleisesti ottaen erittäin korkea.

4 Häviöt taajuusmuuttajakäytössä

Tässä kappaleessa tarkastellaan, miten oikosulkumoottorin häviöt muuttuvat taajuusmuuttajakäytössä verrattuna suoraan verkkoon kytkettyyn käyttöön. Ensin käydään läpi taajuusmuuttajan syöttötavan vaikutusta eri häviökomponentteihin. Tämän jälkeen katsomme, miten nämä muutokset vaikuttavat moottorin lämpötilaan ja arvioituun elinikään.

Verkkokäytössä olevien oikosulkumoottoreiden häviöt ja hyötysuhde määritellään IEC 60034-2-1-standardin mukaisesti, kun taas taajuusmuuttajakäyttöisille moottoreille on laadittu erillinen IEC 60034-2-3-standardi. Tämä kuvaa sitä, että pulssileveysmoduloitu syöttö muuttaa häviöiden määrää niin paljon, että taajuusmuuttajakäytölle tarvitaan omat testaus- ja mittausmenetelmät. Kun tarkastellaan häviöitä taajuusmuuttajakäytössä, on syytä tarkastella koko järjestelmää, jotta saadaan parempia tuloksia. Kuvasta 7 nähdään tyypillinen taajuusmuuttajalla ohjatun oikosulkumoottorijärjestelmän kokoonpano.



Kuva 7. Taajuusmuuttajalla ohjattu oikosulkumoottorin kaavio (Kerszenbaum, 1992).

4.1 Syöttötavan vaikutus häviöihin

Taajuusmuuttaja ei syötä moottoria puhtaalla siniaallolla vaan PWM-syötöllä, jossa perustaajuuden lisäksi esiintyy runsaasti korkeataajuisia harmonisia eli yliaaltoja. Näiden yliaaltojen on useissa tutkimuksissa osoitettu kasvattavan kupari- ja rautahäviöitä sekä

nostavan moottorin lämpötilaa verrattuna verkkokäyttöön. Ding ja Mi (2011) tekivät kokeita 3 hevosvoiman oikosulkumoottorilla, missä he vertailivat rauta- ja kuparihäviöiden suuruuksia eri syötöillä. He tekivät kokeet ilman kuormaa sekä kuorman kanssa.

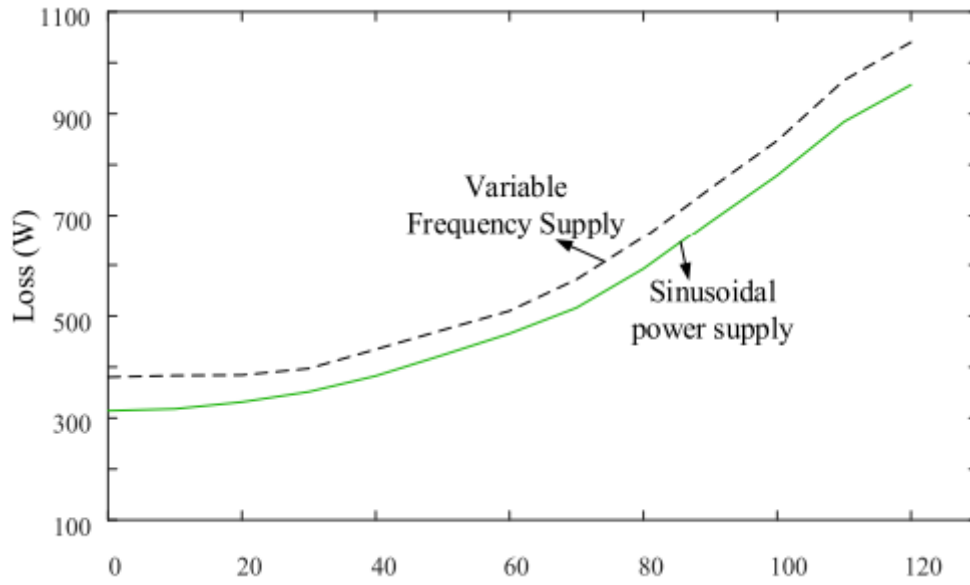
Taulukko 1. Kokeen tulokset ilman kuormaa (Ding & Mi, 2011).

Syöttötapa	Rautahäviöt (W)	Kuparihäviöt (W)
PWM-syöttö	104,0	133,7
Verkkosyöttö	55,8	58,8

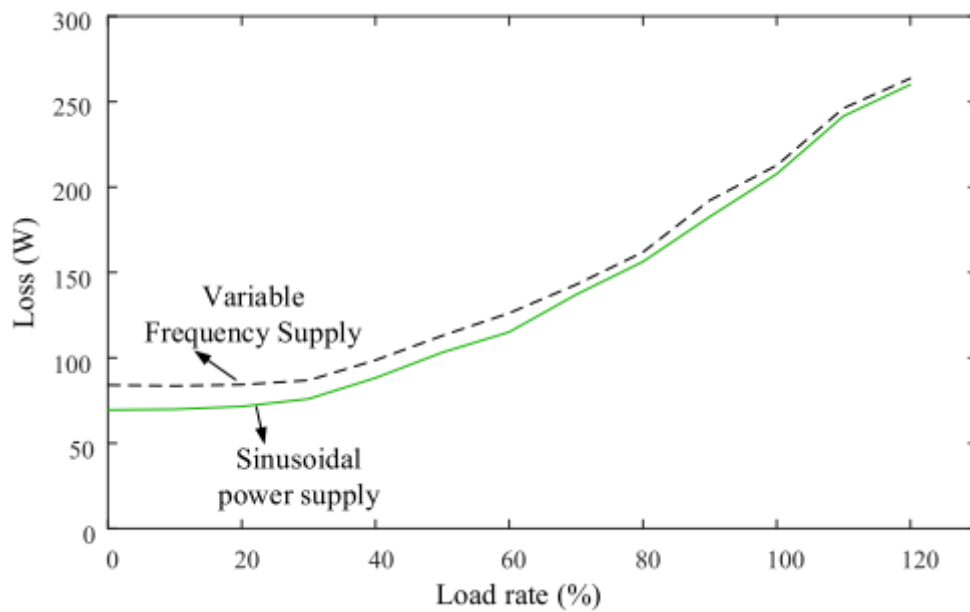
Taulukko 2. Kokeen tulokset kuormalla (Ding & Mi, 2011).

Syöttötapa	Rautahäviöt (W)	Kuparihäviöt (W)
PWM-syöttö	139,1	148,9
Verkkosyöttö	108,0	124,5

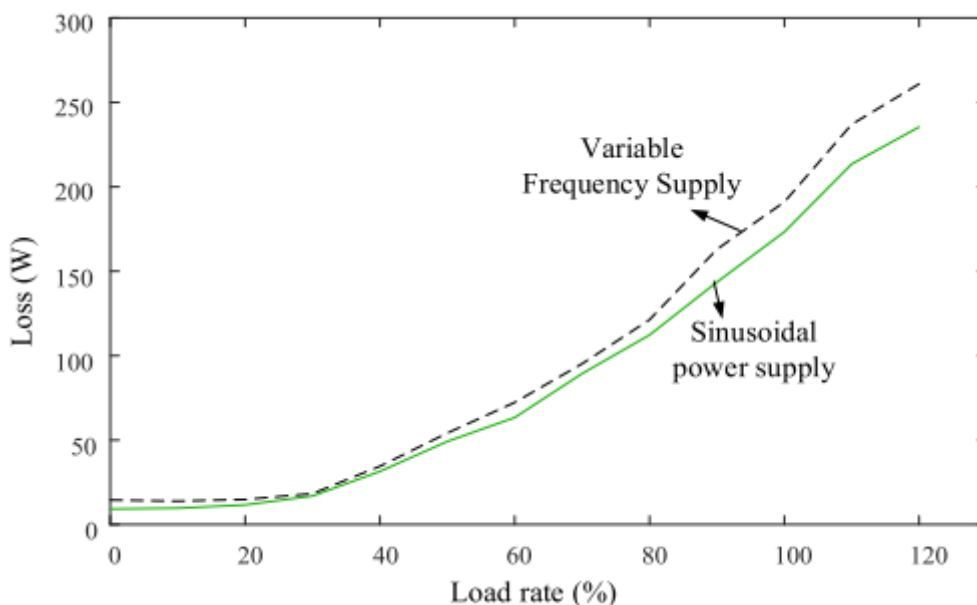
Taulukoista 1 ja 2 näemme, kuinka PWM-syöttö lisää häviöiden määrää, erityisesti kun moottoria ajetaan ilman kuormaa. Jiang ja muut (2022) tekivät myös testejä 5,5 kW oikosulkumoottorille, missä vertailtiin rauta- ja kuparihäviöitä verkkosyötössä sekä taajuusmuuttajakäytössä.



Kuva 8. 5.5 kW oikosulkumoottorin kokonaishäviöt kuormalla (Jiang ja muut, 2022).



Kuva 9. 5.5 kW sähkömoottorin staattorin kuparihäviöt kuormalla (Jiang ja muut, 2022).



Kuva 10. 5.5 kW sähkömoottorin roottorin kuparihäviöt kuormalla (Jiang ja muut, 2022).

Kuvista nähdään, että lähes kaikilla kuormitusasteilla verkkosyötetyn sähkömoottorin kupari- ja kokonaishäviöt ovat suuremmat kuin taajuusmuuttajakäytössä. Vertaillen Jiangin ja muiden (2022) sekä Dingin ja Min (2011) kokeellisia tuloksia havaitaan selkeä yhteys PWM-syötön haittavaikutuksista. Siinä missä Jiangin ja muiden tutkimus 5,5 kW:n moottorilla osoittaa kokonais- ja kuparihäviöiden kasvavan johdonmukaisesti koko kuormitusalueella, Dingin ja Min kokeet 3 hevosvoiman eli noin 2,2 kW:n moottorilla tarkentavat häviöiden suhteellista jakautumista. Dingin ja Min mittauksissa kuormitetun moottorin kuparihäviöt kasvoivat PWM-syötöllä noin 20 %, mutta erityisen voimakkaasti reagoivat rautahäviöt, jotka kasvoivat lähes 29 % verrattuna sinimuotoiseen syöttöön.

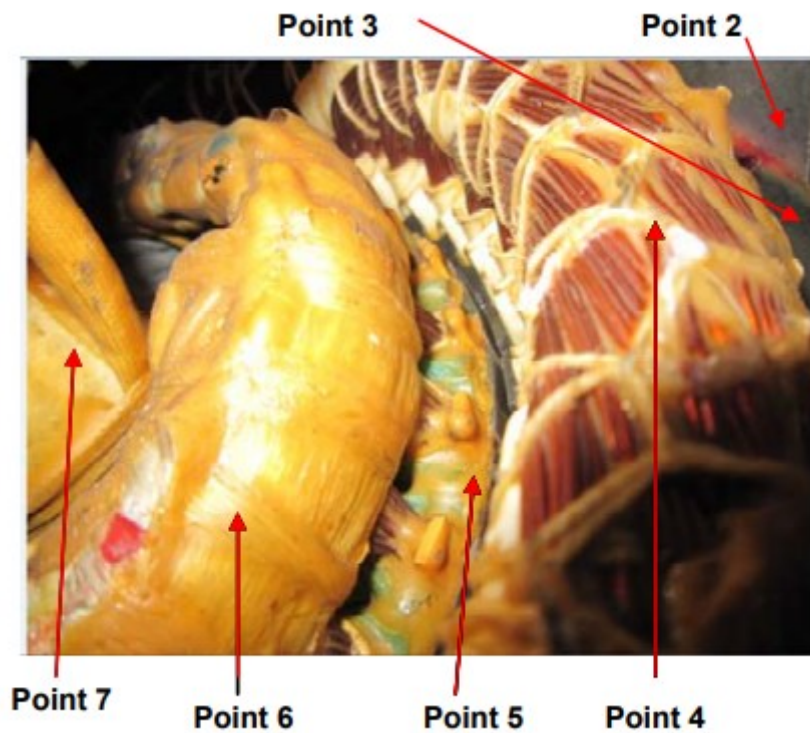
Tutkimustulokset täydentävät toisiaan: Jiangin ja muiden (2022) tulokset havainnollistavat häviöiden riippuvuutta kuormituksesta, kun taas Ding ja Mi (2011) osoittavat, miten nämä lisähäviöt siirtyvät suoraan moottorin rakenteiden lämpenemiseksi. Dingin ja Min mukaan jo tämä suhteellisen pieni häviöiden kasvu nosti moottorin kuumimman pisteen lämpötilaa yli neljällä asteella, mikä nähdään taulukosta kolme. On myös huomionarvoista, että Dingin ja Min kokeissa moottorin kokonaishäviöt laskivat hieman, kun taa-

juusmuuttajan kytkentätaajuutta nostettiin 3,5 kilohertsistä 9 kilohertsiin. Tämä vahvistaa sen, että PWM-syötön haittoja ei voida kokonaan poistaa, mutta niitä voidaan lieventää taajuusmuuttajan oikeilla asetusvalinnoilla, jota käsitellään myöhemmin luvussa 5.

4.2 Lämpötilan nousu ja vaikutus elinikään

Taajuusmuuttajakäytössä moottorin lämpötilan tarkastelu on tärkeää. Moottorin mitoitustas perustuu viime kädessä siihen, kuinka suuren lämpötilan nousun moottori kestää. Taajuusmuuttajasyötössä syntyvät lisähäviöt ja muuttunut jäähdytystilanne pitää huomioida lämpötilan käyttäytymisen kautta, sillä taajuusmuuttajakäytölle suunnitellut moottorit poikkeavat rakenteeltaan verkkomoottoreista juuri lämpö- ja eristysrasituksen takia. Myös valmistajien ohjeissa todetaan, että lämpötila on päämitoitustekijä ja että taajuusmuuttajakäyttö voi nostaa käänitysten ja rungon lämpötilaa verrattuna verkkokäyttöön (ABB Low Voltage Motor Guide, 2019).

PWM-syöttö sisältää paljon yliaaltoja, jotka nostavat moottorin lämpötilaa merkittävästi verrattuna verkkosyöttöön (Ding & Mi, 2011). Yliaaltopitoinen virta kasvattaa staattorin ja roottorin virran RMS-arvoa, josta seuraa suuremmat kuparihäviöt. Nopeiden jännitepulssien aiheuttamat lisämuutokset magneettivuossa kasvattavat rautahäviöitä, erityisesti pyörrevirta- ja hystereesikomponenteissa (Aarniovuori ja muut, 2016). Useat tutkimukset ja valmistajien ohjeet osoittavat, että taajuusmuuttajalla syötetyn oikosulkumoottorin kokonaishäviöt ovat selkeästi suuremmat ja siten myös lämpötilan nousu on suurempi kuin verkkosyötetyllä moottorilla. Ding ja Mi (2011) vertasivat kuormitetun sähkömoottorin eri pisteiden lämpötiloja verkkosyötössä sekä PWM-syötössä. Taulukossa 3 nähdään, että PWM-syötössä kaikkien pisteiden lämpötila oli korkeampi kuin verkkosyötössä. Kuvassa 11 näkyy mittauspisteet. Mittauspiste yksi on sähkömoottorin kotelon ulkopinnan keskellä, joten sitä ei näy kuvassa.



Kuva 11. Moottorin mittauspisteet (Ding & Mi, 2011).

Taulukko 3. Kokeen mittaustulokset (Ding & Mi, 2011).

Mittauspiste	Verkkosyöttö (°C)	PWM-syöttö (°C)
1	34,2	41,8
2	41,4	47,8
3	47,0	52,8
4	50,8	57,2
5	60,5	63,9
6	59,9	63,3
7	67,6	71,7

Taajuusmuuttajakäytössä lämpötilaa nostaa myös jäähtymisen heikkeneminen. Usein teollisuusmoottoreissa tuuletin on kytketty mekaanisesti roottoriin, joten kun nopeutta

pienennetään, niin myös jäähditys heikkenee, mutta häviöt ei pienene samassa suhteessa. Tästä seuraa, että staattorin ja roottorin lämpötilat nousevat herkemmin (WEG, 2019).

Moottorin käyttöikään vaikuttaa osien lämpötila. Lämpötila taas vaikuttaa erityisesti eristysaineisiin. Moottorit jaetaan eristysluokkiin ja niiden rajat määritellään kansainvälisessä IEC 60034-1 standardissa, jotka on esitetty taulukossa 4.

Taulukko 4. Kolmivaihemoottorien eristysluokat (IEC 60034-1).

Eristysluokka	Maksimilämpötila (°C)	Sallittu lämpenemä (K)
A	105	60
E	120	75
B	130	80
F	155	105
H	180	125

Eristemateriaalin käyttöikää kuvataan yhtälön avulla, joka tunnetaan myös Arrheniuksen lakina

$$L = A \cdot e^{\frac{B}{T_A}}, \quad (12)$$

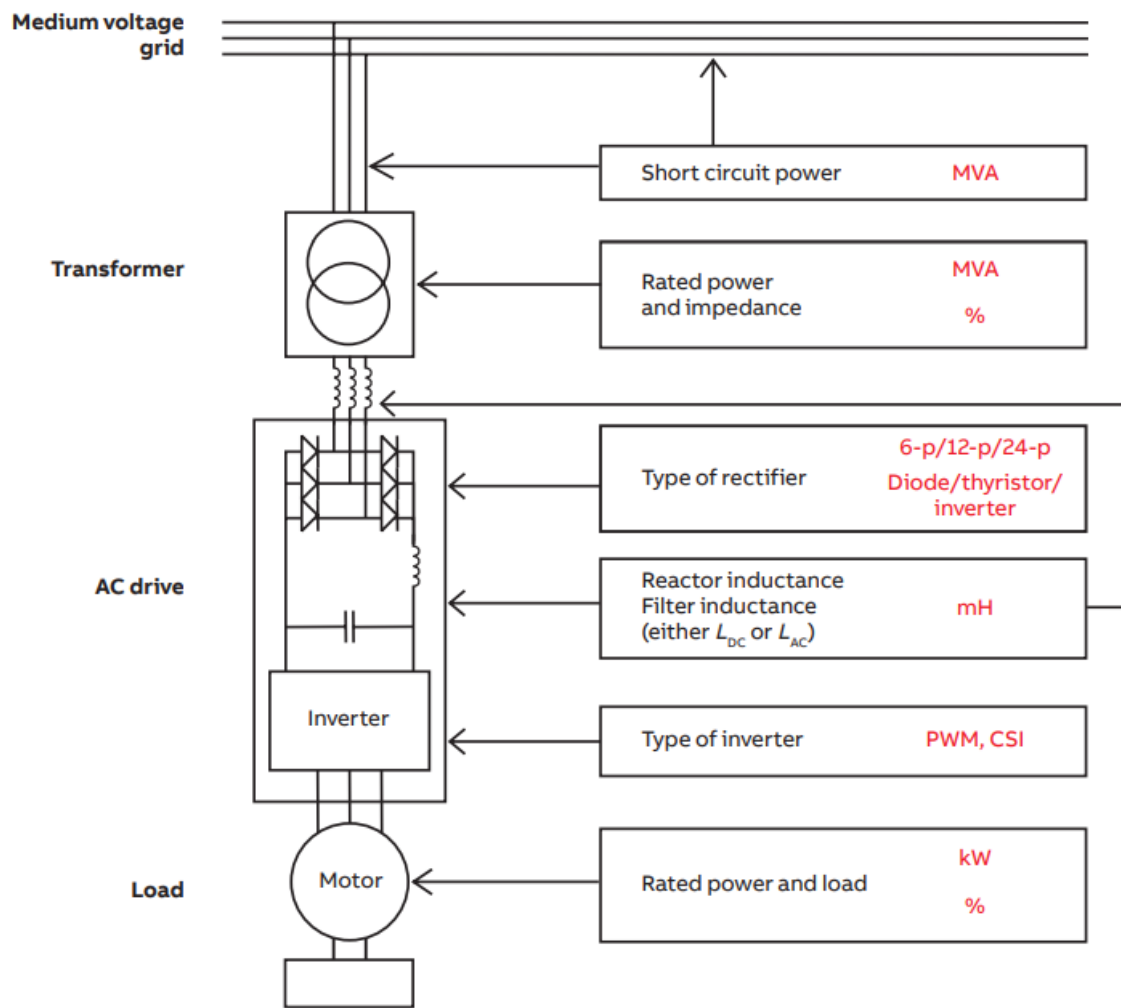
missä L = eristeen käyttöikä tunneissa, T_A = absoluuttinen lämpötila kelvineissä
A ja B ovat eristekohtaisia vakioita. Taajuusmuuttajakäytössä tämä tarkoittaa sitä, että pysyvä lämpötilan nousu staattorin käämityslämpötilaan voi lyhentää moottorin suunniteltua käyttöikää merkittävästi, mikä pitää huomioida moottorin valinnassa, että sallittuja kuormitusalueita määrittäessä (Verkkonen, 2017).

Taajuusmuuttajakäyttö synnyttää moottorin akselille korkeataajuista yhteismuotoista jännitettä, joka johtuu vaihtosuuntaajan nopeista kytkennöistä. Tämä jännite pyrkii purkautumaan maahan helpointa mahdollista reittiä, joka on usein moottorin laakerien ohut voitelukalvo. Kun jännite ylittää voiteluaineen eristyskyvyn, tapahtuu sähköinen purkaus, joka aiheuttaa laakeripintoihin mikroskooppisia kraattereita. Ajan myötä nämä toistuvat purkaukset muodostavat laakereihin kulumisjälkiä, mikä johtaa melun kasvuun, värinän lisääntymiseen sekä ennen aikaiseen rikkoutumiseen (Muetze & Binder, 2006).

Vaurioiden ehkäisemiseksi ja moottorin luotettavuuden varmistamiseksi taajuusmuuttajakäytöissä suositellaan teknisiä ratkaisuja, kuten eristettyjä laakereita tai akselille asennettavia maadoitusharjoja. Nämä ratkaisut ohjaavat purkausvirrat pois laakeripintojen läpi kulkevalta reitiltä, suojaten moottorin mekaanista rakennetta (Muetze & Binder, 2006).

5 Häviöiden pienentämisen tekniset ratkaisut

Kun oikosulkumoottoria syötetään PWM-syötöllä, häviöitä syntyy sekä taajuusmuuttajassa että moottorissa. Moottorin puolella keskeisintä on, että PWM-syöttö tuo jännitteeseen ja virtaan yliaaltokomponentteja, jotka kasvattavat häviöitä verrattuna verkkosyöttöön (Jiang ja muut, 2022). Yliaaltoihin voidaan vaikuttaa monella eri tavalla. Kuvassa 12 on esitetty eri järjestelmiä, minkä avulla voidaan vaikuttaa yliaaltojen suuruuteen. Taajuusmuuttajan puolella merkittäviä ovat puolijohteiden johtumis- ja kytkentähäviöt, jotka riippuvat kytkentätaajuudesta sekä komponenttien valinnasta (Haider ja muut, 2020).



Kuva 12. Yliaaltoihin vaikuttavat järjestelmät (ABB, 2017).

5.1 Systemi

Häviöiden pienentäminen kannattaa aloittaa järjestelmätasolta, koska suurimmat säästöt syntyvät siitä, että koko käyttö on järkevä eikä niinkään yksittäisten komponenttien hiomisesta (ABB, 2016). Mitoituksessa yleinen häviöiden aiheuttaja on jatkuva vajaa-kuorma. Moottorit on suunniteltu toimimaan noin 50–100 % nimelliskuormasta ja hyötysuhde huipentuu usein noin 75 %:n kohdalla, kun taas selvästi alle 50 %:n kuormalla hyötysuhde heikkenee huomattavasti (DOE, 2001).

5.2 Taajuusmuuttaja

Taajuusmuuttajan omat häviöt ovat usein matalat, mutta niitä pystytään pienentämään valinnoilla ja asetuksilla, jolla vältetään tarpeeton lämpökuorma ja ylimääräiset sähköiset ilmiöt (ABB, 2016). Eräs yleinen keino on pitää kytkentätaajuus tarkoituksenmukaisena. Korkeampi kytkentätaajuus kasvattaa tyypillisesti taajuusmuuttajan kytkentähäviöitä, joten häviöiden näkökulmasta sitä ei yleensä kannata nostaa enempää kuin sovellus vaatii (ABB, 2016).

Uudet puolijohdemateriaalit tulevat myös parantamaan taajuusmuuttajan energiatehokkuutta. Perinteisten piipohjaisten IGBT-transistorien rinnalle on tulossa uusia puolijohdemateriaaleja, joista merkittävimpinä voidaan pitää piikarbidia. Piikarbidikytkimet mahdollistavat merkittävästi nopeammat kytkentäajat sekä pienemmät kytkentä- ja johtamishäviöt (Mishra ja muut, 2020).

5.3 Moottori

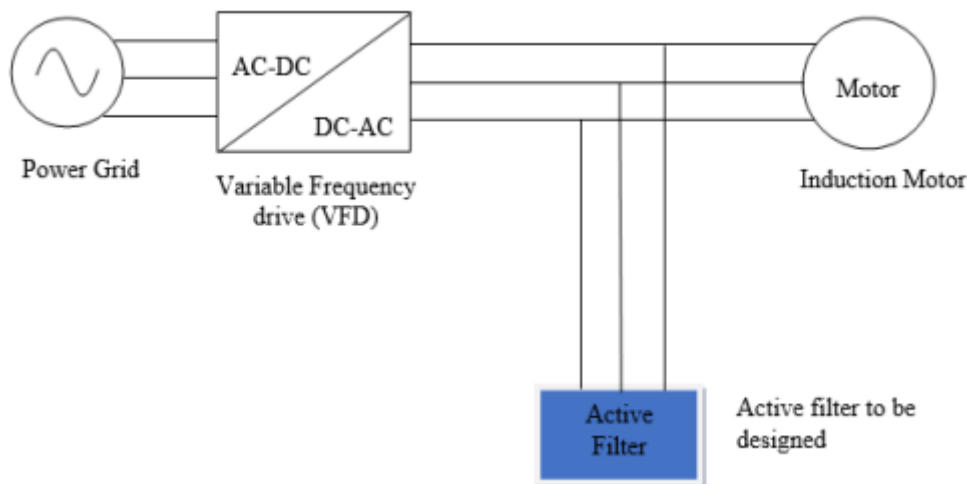
Moottorin puolella häviöiden pienentäminen perustuu oikeaan hyötysuhdeluokkaan, oikeaan kokoon ja siihen, että moottori on tarkoitettu taajuusmuuttajakäyttöön. Samalla mitoitus on kriittinen, sillä jos moottori käy jatkuvasti selvästi alle puolen kuorman, hyötysuhde heikkenee selvästi ja syötetystä energiasta muuttuu enemmän lämmöksi kuin tarpeen (DOE, 2001).

Keskeinen keino eristeiden vikaantumisen ehkäisemiseksi on staattorin hartsaus. Hartsitunkeutuu käämien välisiin tyhjiöihin ja syrjäyttää ilman, jolloin osittaispurkausten syttymisjännite kasvaa huomattavasti, mikä pidentää sähkömoottorin elinikää (Kaufhold ja muut, 2000).

5.4 Suodattimet

Suodattimet ovat yleisin keino suodattaa taajuusmuuttajasta tulevaa yliaaltopitoista jännitettä. Suodattimia on monia erilaisia, joiden toiminnot eroavat toisistaan. Suodattimia

voidaan laittaa syöttöpuolelle eli verkon ja tasasuuntaajan väliin tai tasajännitevälipiiriin kuin myös lähtöpuolelle eli moottorin ja taajuusmuuttajan väliin.



Kuva 13. Kaaviokuva järjestelmästä, jossa on moottoripuolen aktiivitehosuodatin (Rao ja muut, 2020).

Syöttöpuolella suodattimena käytetään usein AC-kuristimia. Niiden tehtävänä on pienentää sähköverkosta tulevan virran yliaaltosäröä sekä suojata verkkoa. AC-kuristimet suojaavat samalla tasasuuntaajaa verkon ylijännitteiltä. DC-kuristin sijaitsee usein taajuusmuuttajan sisällä tasajännitevälipiirissä. (ABB, 2017.)

Lähtöpuolella on monenlaisia suodattimia, kuten passiiviset LC-sinisuodattimet. LC-sinisuodattimet koostuvat nimensä mukaisesti kelasta ja kondensaattorista. Ne muokkaavat PWM-signaalin takaisin lähes puhtaaksi siniaalloksi. LC-suodattimen kondensaattori voidaan mitoittaa vastaamaan oikosulkumoottorin loistehon tarvetta. Tämän ansiosta suodatin syöttää moottorille tarvittavan tehon ja vaihtosuuntaajalta vaadittava virta pienee. Tämä vähentää tehohäviöitä koko järjestelmässä. (Salunkhe ja muut, 2019.)

Lähtöpuolelle on myös uusi moottoripuolen aktiivitehosuodatin (MSAPF). Se kytetään taajuusmuuttajan ja moottorin väliin kuvan 13 tavalla. Suodatin mittaa virran säröä ja

laskee referenssisignaalin eri teorioiden avulla ja syöttää moottorikaapeliin vastakkaisvaiheista yliaaltovirtaa (Rao ja muut, 2020). Aktiivitehosuodattimet ovat todella tehokas yliaaltohäviöitä ja lämpenemistä vastaan. Rao ja muut (2020) tekivät kokeen, jossa he saivat aktiivitehosuodattimella moottorivirran särön putoamaan noin 13 %:sta alle 1 %:iin. Tämän ansiosta hyötysuhde paranee ja mekaaninen elinikä pitenee huomattavasti.

5.5 Muut

Monet piilohäviöt ja käyttövarmuusongelmat syntyvät kaapeloinnista ja ulostulon sähköilmiöistä, joten kaapelin pituus ja suodatus ovat aidosti energiatehokkuusasia silloin, kun ne pakottavat ajamaan epäoptimaalisilla asetuksilla tai aiheuttavat lämpökuormaa. Pitkät moottorikaapelit voivat kasvattaa moottorin napajännitteeseen syntyvää ylijännitettä PWM-syötössä ja tarvittaessa dv/dt - tai sinisuodatus on tyyppillinen tapa hallita nous nopeuksia ja jännitehuippuja moottorin päässä. (ABB, 2024.)

6 Johtopäätökset

Tutkielman perusteella voidaan todeta, että taajuusmuuttajakäyttö muuttaa oikosulkumoottorin häviörakennetta merkittävästi verrattuna suoraan verkkosyöttöön. PWM-syötön korkeataajuiset harmoniset yliaallot kasvattavat erityisesti kupari- ja rautahäviöitä, mikä johtaa moottorin lämpötilan nousuun. Tämä on kriittisin tekijä eristyksen kulumisen ja eliniän kannalta. Järjestelmätasolla tarkasteltuna taajuusmuuttaja on kuitenkin energiatehokas ratkaisu, sillä sen tarjoama säädettävyys mahdollistaa prosessin optimoinnin ja akselitehon pienentämisen osakuormilla ajettaessa.

Teollisuuden kannalta on olennaista ymmärtää, ettei pelkkä taajuusmuuttajan lisääminen takaa optimaalista energiatehokkuutta, jos moottorin kuormitusastetta ja jäähdytystä ei huomioida. Erityisesti matalilla pyörimisnopeuksilla itsetuulettuvan moottorin jäähdytyskapasiteetti heikkenee, mikä vaatii joko virran rajoittamista tai teknisiä lisäratkaisuja, kuten ulkopuolista jäähdytystä.

Luotettavuuden varmistamiseksi taajuusmuuttajakäytöissä tulisi suosia optimoitua kytkentätaajuutta, ehkäistä eristeiden kulumista huolellisella käämien hartsauksella ja tarvittaessa suojata mekaaniset osat eristetyillä komponenteilla. Näiden lisäksi luotettavuutta voidaan edelleen parantaa asianmukaisilla suodatinratkaisuilla. Vaikka taajuusmuuttaja lisää järjestelmän monimutkaisuutta ja potentiaalisia häviökomponentteja, sen tarjoama säädettävyys on silti merkittävin keino saavuttaa energiansäästöä prosessitasolla. Tulevaisuuden uudet puolijohdemateriaalit ja entistä tarkemmat ohjaustyylit tulevat todennäköisesti pienentämään tässä työssä käsiteltyjä haittavaikutuksia entisestään, tehden sähkökäyttöistä entistä kestävämpiä ja tehokkaampia.

Taajuusmuuttajakäyttö on keskeinen osa nykyaikaista, kestävästä kehitystä tukevaa teollisuutta. Sen tarjoama energian säästöpotentiaali parantaa tuotannon kustannustehokkuutta, kunhan moottorin häviöt ja rasiustekijät hallitaan oikeaoppisesti. Optimoimalla

sähkökäytön hyötysuhdetta ja elinikää voidaan saavuttaa merkittäviä säästöjä niin energiankulutuksessa kuin kunnossapitokustannuksissakin, mikä tekee ratkaisusta sekä teknisesti että taloudellisesti perustellun.

Lähteet

- Aarniovuori, L., Rasilo, P., Niemela, M., & Pyrhonen, J. J. (2016). *Analysis of 37-kW Converter-Fed Induction Motor Losses*. *IEEE transactions on industrial electronics* (1982), 63(9), 5357-5365. <https://doi.org/10.1109/TIE.2016.2555278>
- ABB. (2016). *Technical guide No. 7: Dimensioning of a drive system*. https://library.e.abb.com/public/e555e5106a3c44e882f48b75a44f6807/Technical_guide_No_7_3AFE64362569_RevD_EN_lowres.pdf
- ABB. (2017). *Technical guide No. 6 Guide to harmonics with AC drives*. https://library.e.abb.com/public/bc35ffb4386c4c039e3a8ec20cef89c5/Technical_guide_No_6_3AFE64292714_RevF_EN.pdf
- ABB. (2019). *Low voltage motor guide*. https://library.e.abb.com/public/1fd380f8ca8b4934ae3fa609d764fd33/21043_ABB_Motor_Guide_REV_D.pdf
- ABB. (2024). *Technical note 176: Motor cable distance from drives*. https://library.e.abb.com/public/6704602d55da42778215ff96c7bd3d7c/Technical_Note_176_MotorCableDistanceFromDrives.pdf?x-sign=XzMAVImetMBKgA8gd7wD6CFmP2kdczd6zBnxVbxmUlcio2hIMgmejCiauHlbexZg
- Ding, X., & Mi, C. C. (2011). Impact of inverter on losses and thermal characteristics of induction motors. *International Journal of Power Electronics*, 3(6), 641–651. <https://doi.org/10.1504/IJPELEC.2011.042805>
- DOE (U.S. Department of Energy). (2001). *Determining electric motor load and efficiency*. <https://www.energy.gov/sites/prod/files/2014/04/f15/10097517.pdf>

Haider, M., Guacci, M., Bortis, D., Kolar, J. W., & Ono, Y. (2020). *Analysis and evaluation of active/hybrid/passive dv/dt-filter concepts for next generation SiC-based variable speed drive inverter systems*. IEEE. <https://doi.org/10.1109/ECCE44975.2020.9236148>

International Electrotechnical Commission. (2024). Rotating electrical machines - Part 2-1: Standard methods for determining losses and efficiency from tests (excluding machines for traction vehicles) (IEC 60034-2-1:2024).

International Electrotechnical Commission. (2024). Rotating electrical machines - Part 2-3: Standard methods for determining losses and efficiency from tests (excluding machines for traction vehicles) (IEC 60034-2-3:2024).

International Electrotechnical Commission. (2017). Rotating electrical machines. (IEC 60034-1).

Jiang, M., Tian, J., Goh, H. H., Yi, J., Li, S., Zhang, D., & Wu, T. (2022). Experimental study on the influence of high frequency PWM harmonics on the losses of induction motor. *Energy Reports*, 8, 332–342. <https://doi.org/10.1016/j.egy.2022.09.158>

Jokinen, K. (2018). *Tehoelektroniikka* [Luentomoniste]. Vaasan ammattikorkeakoulu. https://portal.vamk.fi/pluginfile.php/1201370/mod_resource/content/10/Tehoelektroniikka_19.pdf

Kaufhold, M., Aninger, H., Berth, M., Speck, J., & Eberhardt, M. (2000). Electrical stress and failure mechanism of the winding insulation in PWM-inverter-fed low-voltage induction motors. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 47(2), 396–402. <https://doi.org/10.1109/41.836355>

- Kerszenbaum, I. (1992). *Shaft currents in electric machines fed by solid-state drives*. IEEE. <https://doi.org/10.1109/ICPS.1992.163388>
- Korpinen, L. (2008). *Sähkövoimatekniikkaopus: Sähkökoneet osa 1*. Tampereen teknillinen yliopisto. https://leenakorpinen.com/archive/svt_opus/10sahkokooneet_1osa.pdf
- Korpinen, L., Mikkola, M., Keikko, T & Falck, E. (2008). *Yliaalto-opus*. <https://leenakorpinen.com/archive/opukset/yliaalto-opus.pdf>
- Mansour, F. (2020). *Induction motors: Construction, principle of operation, power and torque calculations, characteristics and speed control*. ResearchGate. <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.15490.71360>
- Mishra, P., & Maheshwari, R. (2020). Design, Analysis, and Impacts of Sinusoidal LC Filter on Pulsewidth Modulated Inverter Fed-Induction Motor Drive. *IEEE transactions on industrial electronics* (1982), 67(4), 2678-2688. <https://doi.org/10.1109/TIE.2019.2913824>
- Muetze, A., & Binder, A. (2006). Don't lose your bearings: Mitigation techniques for bearing currents in inverter-fed drive systems. *IEEE Industry Applications Magazine*, 12(4), 22–31. <https://doi.org/10.1109/MIA.2006.1678327>
- Nousiainen, K. (1994). *Sähköenergiatekniikka*. (Tampereen teknillinen korkeakoulu, Sähköenergiajärjestelmät, Opetusmoniste). Tampereen teknillinen korkeakoulu.
- Polka, D. (2001). *What is a VFD?* [Training notes]. Valin Online. <https://files.valinonline.com/userfiles/documents/what-is-a-vfd.pdf>

- Rao, H. G., Mala, R., & Joshi, A. (2020). Motor side active power filter for induction motor. *International Journal of Power Electronics and Drive Systems*, 11(4), 1711. <https://doi.org/10.11591/ijpeds.v11.i4.pp1711-1718>
- Salunkhe, S., & Kalkhambkar, V. N. (2019). VFD Control for Industrial Machines using PLC and LC Filter. IEEE. <https://doi.org/10.1109/ICICICT46008.2019.8993387>
- Sipilä, T. (2009). *Oikosulkumoottorikäytön kokonaishäviöiden pienentäminen vaihtosuuntaajan kytkentätaajuuden valinnalla*. [Diplomityö, Teknillinen korkeakoulu]. Noudettu 15.1.2026 osoitteesta <http://lib.tkk.fi/Dipl/2009/urn100064.pdf>
- Verkkonen, Vesa. (2017). *Sähkömoottorikäytöt, Epätahtikoneet*. [file:///C:/Users/pette/Downloads/Ep%C3%A4tahtikone%20\(2\).pdf](file:///C:/Users/pette/Downloads/Ep%C3%A4tahtikone%20(2).pdf)
- WEG. (2019). *Induction motors fed by PWM frequency inverters*. <https://static.weg.net/medias/downloadcenter/hcb/h20/WEG-induction-motors-fed-by-pwm-frequency-inverters-50029350-brochure-english-web.pdf>
- Zhao, K., Ciufu, P., & Perera, S. (2012). Induction motors subject to regular voltage fluctuations: Stator and rotor current analysis from a heating perspective. IEEE. <https://doi.org/10.1109/ICHQP.2012.6381214>