

KARELIA-AMMATTIKORKEAKOULU
Talotekniikan koulutus

Paavo Siitonen

SÄHKÖKÄYTTÖISEN MATERIAALINKÄSITTELYKONEEN
VAIKUTUKSET SYÖTTÖKAAPELIIN JA SÄHKÖVERKON
LIITYNTÄPISTEESEEN

Opinnäytetyö
Maaliskuu 2021



OPINNÄYTETYÖ
Maaliskuu 2021
Talotekniikan koulutus

Tikkarinne 9
80200 JOENSUU
+358 13 260 600 (vaihde)

Tekijä(t)
Paavo Siitonen

Sähkökäyttöisen materiaalinkäsittelykoneen vaikutukset syöttökaapeliin ja sähköverkon liityntäpisteeseen

Toimeksiantaja Mantsinen Group Ltd. Oy

Opinnäytetyö tehtiin Mantsinen Group Ltd. Oy:lle. Työn tarkoituksena oli tutkia sähkökäyttöisten materiaalinkäsittelykoneiden vaikutuksia syöttökaapeliin ja syöttävään sähköverkkoon.

Opinnäytetyössä selvitettiin, kuinka syöttökaapelin mitoitus toteutetaan kokonaisuuden kannalta mahdollisimman optimaalisesti. Lisäksi tutkittiin sähkömoottorin vaikutuksia syöttävään sähköverkkoon ja kuinka suunnittelussa tehtävillä valinnoilla voidaan vaikuttaa niihin.

Tutkimista varten tutustuttiin koneen rakenteisiin ja sähkösuunnittelussa tehtäviin ratkaisuihin. Työssä käydään läpi kaikki koneen sähköjärjestelmän pääkomponentit ja niiden keskinäiset vaikutukset. Työssä perehdytään erityisesti sähkömoottorin toimintaan ja siihen vaikuttaviin tekijöihin. Eri komponenttien vaikutuksia havainnollistetaan suunnittelu- ja laskentaesimerkkien avulla.

Työn konkreettinen tulos on Mantsinen Group Ltd Oy:lle toimitettava mitoitus työkalu. Työkalu pohjautuu tähän opinnäytetyöhön.

Kieli
suomi

Sivuja 55

Asiasanat
Sähkömoottori, kaapelin mitoitus, jännitteen alenema



THESIS
March 2021
Degree Programme in Building Services Engineering

Tikkarinne 9
80200 JOENSUU
FINLAND

Author (s)
Paavo Siitonen

Title
The Effects of Material Handler on the feeder Cable and Power Supply

Commissioned by Mantsinen Group Ltd. Oy

The thesis was carried out in collaboration with Mantsinen Group Ltd. Oy. The purpose of the work was to study the effects of electric material handler on the feeder cable and power supply.

The purpose of the thesis was to find out how the dimensioning of feeder cable is implemented optimally for the system. The work also investigated the effects of an electric motor on the power supply and how design choices can affect the results.

The structure of the material handling machine and the solutions which are made in the electrical design were studied for the thesis. All the main components of the machine's electrical system and their interdependent effects are elaborated in this document. The thesis introduces electrical theory for the operation and application of an electric motor in various uses. The effects of the various components are illustrated by using design and calculation examples.

The concrete result of the work is a planning tool which is delivered to Mantsinen Group Ltd Oy. The tool based on this thesis.

Language
Finnish

Pages 55

Keywords
electric motor, cable dimensioning, voltage drop

Sisältö

Lyhenteet	5
1 Johdanto	6
2 Mantsinen GROUP	7
2.1 Materiaalinkäsittelykoneet	7
2.2 Sähkökäyttöisten materiaalinkäsittelykoneet	8
3 Sähkömoottorin toiminta	10
3.1 Sähkömoottorintyyppi ja kytkentä	11
3.2 Sähkömoottorin teho ja käyttöjännite	14
3.3 Sähkömoottorin suojaus ja käynnistämistavat	15
3.3.1 Suorasähkökäynnistys	17
3.3.2 Taajuusmuuttaja	17
3.3.3 Pehmokäynnistys	18
3.4 Vääntömomentti ja virta	19
3.3 Materiaalinkäsittelykoneen syöttökaapeli	24
3.4 Jännitteenalenema	28
4 Rajoittavat tekijät materiaalinkäsittelykoneessa	30
4.1 Kaapelikela	30
4.2 Käynnistystapa	31
4.3 Syöttävä sähköverkko	32
5 Syöttöpisteen vaadittavan oikosulkuvirran laskeminen	32
5.1 Syöttökaapelin ja kaapelikelan mitoittaminen	32
5.2 Jännitteenalenemien selvittäminen	36
5.3 Oikosulkusuojauksen tarkastelu	40
6 Suunnittelun vaikutukset kokonaisuuteen	44
6.1 Käyttöjännite	44
6.2 Käynnistystapa	46
6.3 Syöttävä sähköverkko	47
6.4 Syöttökaapelin vaikutukset	48
6.5 Vaikutuksien ja ongelmien huomioiminen suunnittelua tehdessä	52
7 Yhteenveto	53
Lähteet	55

Lyhenteet

A	ampeeri, virran yksikkö
$\cos\varphi$	tehokerroin
f	taajuus
I	virta
kA	kiloampeeri, kerrannaisyksikö 1kA=1000A
kV	kilovoltti, kerrannaisyksikkö 1kV=1000V
kW	kilowatti, kerrannaisyksikkö 1kW=1000W
M	sähkömoottori
P	teho
s	sekunti
T	vääntömomentti
U	jännite
V	voltti, jännitteen yksikkö
VA	volttiampeeri, näennäistehon yksikkö
VAC	volttia vaihtosähköä
W	watti, tehon yksikö
Ω	ohmi, resistanssin, reaktanssin ja impedanssin yksikkö

1 Johdanto

Opinnäytetyö tehtiin Mantsinen Group Ltd Oy:n toimeksiannosta. Työssä käsitellään Mantsisen valmistamia materiaalinkäsittelykoneita. Työ keskittyy sähkökäyttöisiin koneisiin ja erityisesti niiden tarkasteluun käynnistymishetkellä. Tarkoitukseni on tutkia koneen sähkömoottorin käynnistymisen ja syöttökaapelin vaikutuksia ja sitä, millaisia vaikutuksia koneen käynnistymisellä on syöttävään sähköverkkoon. Koneita toimitetaan ympäri maailmaa, joten myös paikallisten sähköverkkojen laadussa voi olla isoja eroja. Työn päätavoitteena on selvittää syöttävän sähköverkon minimivaatimukset ja kuinka vaatimukseen voidaan vaikuttaa erilaisilla ratkaisuilla materiaalinkäsittelykoneiden sähkösuunnittelussa.

Työn tarkoitus on toimia apuna materiaalinkäsittelykoneiden mitoittamisessa ja suunnittelussa. Tässä työssä saadut tulokset vaikuttavat monien eri päätekijöiden mitoittamiseen, kuten syöttökaapelin valintaan, käyttöjännitteeseen ja koneen käynnistämistapaan. Opinnäytetyön ulkopuolella teen Mantsiselle taulukko-työkalun. Työkalun pohjana toimii tämä opinnäytetyö.

Työn alussa käydään läpi sähkömoottoreita yleisesti ja tutustutaan niiden toimintaan, sekä siihen, mitä sähkömoottorissa tapahtuu käynnistymishetkellä. Seuraavaksi tutkitaan materiaalinkäsittelykoneiden rajoittavia tekijöitä ja tutustutaan koneissa käytettäviin komponentteihin. Materiaalinkäsittelykoneissa on paljon normaalista sähkömoottorikäytöstä poikkeavia tekijöitä, joten näiden tarkastelu on tärkeitä. Lopuksi tutkitaan kaikkien näiden yhteisvaikutusta, sekä esitellään ja analysoidaan saadut tulokset.

2 Mantsinen Group Ltd Oy

Mantsinen Group Ltd Oy on Pohjois-Karjalassa Ylämyllyllä sijaitseva kansainvälinen yritys. Mantsisen toiminta alkoi 1960-luvulla ja 1990-luvulla he laajensivat toimintansa materiaalinkäsittelykoneisiin. Mantsisen koneiden käyttö sijoittuu satamiin, tehdasympäristöihin sekä terminaaleihin. Materiaalinkäsittelykoneiden lisäksi Mantsinen tarjoaa logistiikkapalveluita moniin eri käyttötarkoituksiin. [1.]

Mantsinen on nykyään vahvasti kansainvälinen yritys ja materiaalinkäsittelykoneita toimitetaan ympäri maailmaa. Yritys panostaa vahvasti kehittämistyöhön ja uusia parempia ratkaisuja pyritään toteuttamaan mahdollisimman paljon asiakastarpeiden mukaan. Yrityksen juuret ovat vahvasti Pohjois-Karjalassa. Materiaalinkäsittelykoneiden valmistus tapahtuu suurimmaksi osaksi Ylämyllyllä ja osa loppukokoonpanosta toteutetaan Raumalla. Mantsinen tarjoaa logistiikkapalveluita Suomessa ja Venäjällä. Yrityksen tavoitteena on olla arvostetuin kumppani puu- ja romukenttien sekä terminaalien toiminnan ulkoistamisessa. [1.]

2.1 Materiaalinkäsittelykoneet

Mantsinen Group Ltd Oy valmistaa hydraulikkakäyttöisiä materiaalinkäsittelykoneita. Koneita käytetään teollisuudessa, esimerkiksi satamissa ja terminaaleissa. Koneilla käsitellään irto- ja kappaletavaroita, kuten puutavaraa, paperirullia ja kivihiiltä (kuva 1). [1.]



Kuva 1 Materiaalinkäsittelykone toiminnassa satamassa [1].

Koneita valmistetaan monessa eri kokoluokassa: pienimmät koneet painavat noin 50 tonnia ja suurin mallisarja n. 360 tonnia. Materiaalinkäsittelykoneiden ulottuma vaihtelee 20-30 metrin välillä riippuen mallisarjasta. [1.]

Koneet ovat hydraulikkatoimisia. Tämä tarkoittaa sitä, että pumppuvaihdetta pyörittää joko diesel- tai sähkömoottori. Sähkömoottorit ovat yleistyneet alhaisten käyttökustannuksien vuoksi. Materiaalinkäsittelykoneiden alustavaihtoehtoina on kisko, pyörä tai tela. Koneet voidaan sijoittaa myös kiinteästi, jos koneen liikuttamiselle ei ole tarvetta. Koneisiin on saatavana laaja valikoima erilaisia nostovälineitä käyttötarkoituksen mukaan. Nostovälineitä löytyy mm. puutavaraa, paperirullia, suursäkkejä ja esimerkiksi sahatavaraa varten. [1.]

2.2 Sähkökäyttöiset materiaalinkäsittelykoneet

Sähkökäyttöisessä materiaalinkäsittelykoneessa hydraulikkapumppuja pyörittää dieselmoottorin sijasta sähkömoottori. Sähkökäyttöisiä koneita syötetään joko pien- tai keskijännitteellä. Tässä opinnäytetyössä perehdytään pienjännitteillä syötettäviin koneisiin. Sähkömoottori on mitoitettu vastamaan dieselmoottorin

tuottamaa voimaa, jolloin koneiden tehossa ei synny eroja. Muilta osin koneiden toimintaperiaate on samanlainen. [1.]

Sähkömoottorikäyttöisen materiaalinkäsittelykoneen käyttökustannukset ovat huomattavasti pienemmät kuin dieselmoottorikäyttöisen. Tämä selittyy sähköenergian huomattavasti edullisemmalla hinnalla dieseliin verrattuna. Lisäksi sähkökäyttöistä konetta voidaan pitää toimintavarmempana ja sen huoltokustannukset ovat pienemmät. [1.]

Suurin ero sähkö- ja dieselkäyttöisissä koneissa syntyy koneen liikkuesssa. Sähkömoottori tarvitsee sähköenergiaa syöttökaapelin kautta riippumatta siitä, missä kone sijaitsee. Liikkumisen aiheuttama ongelma on ratkaistu asentamalla kaapelikela koneen kylkeen (kuva 2). Kela purkaa ja pitää syöttökaapelin sopivalla kireydellä sen mukaisesti, minne materiaalinkäsittelykone liikkuu. Syöttökaapelikelan pyörivästä osasta sähkö siirretään kiinteäksi liukurenkaiden avulla. Näillä toimenpiteillä on mahdollistettu sähkömoottorikäyttö myös liikkuvissa koneissa. Kaapelikelan koko on rajattu, tämän vuoksi sähkökäyttöisten koneiden liikkumasäde on rajallinen. [1.]



Kuva 2. Kuvassa sähkökäyttöinen materiaalinkäsittelykone [1].

Sähkömoottorikäyttöisissä materiaalinkäsittelykoneissa on myös suuria eroja koneen sisäisissä sähköjärjestelmissä. Sähkömoottorin käyttö edellyttää koneen sisälle asennetut sähkömoottorilähdön kojeet. Tämän vuoksi sähköjärjestelmän koko on suurempi sähkökäyttöisissä koneissa verrattuna dieselkäyttöisiin koneisiin. [1.]

Sähkömoottorikäyttöisiin materiaalinkäsittelykoneisiin sovelletaan seuraavia standardeja:

- SFS-EN 60204-1:2018 Koneturvallisuus. koneiden sähkölaitteisto Osa 1: Yleiset vaatimukset
- SFS-EN 60204-1 Pienjännitekeskukset, yleisvaatimukset osa 1
- SFS-EN 60204-1 Pienjännitekeskukset, ammattikäyttöön tarkoitettut keskukset osa 2
- SFS-EN 60204-32 Koneturvallisuus. Koneiden sähkölaitteisto osa 32: Vaatimukset nostokoneille
- yleiset IEC-standardit. [1.]

3 Sähkömoottorin toiminta

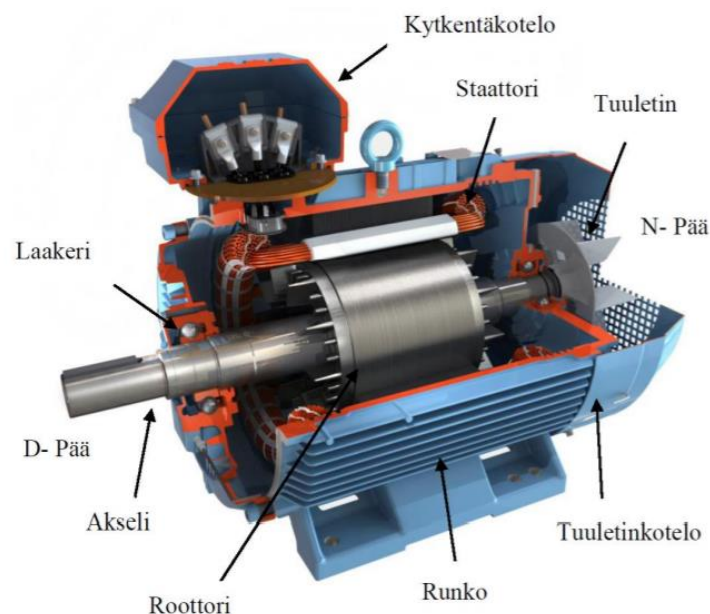
Sähkömoottoreita on monia erilaisia. Moottorit voidaan jakaa tasasähköllä ja vaihtosähköllä toimiviin. Vaihtosähköllä toimivat moottorit jakautuvat tahti- ja epätahtimoottoreihin. Materiaalinkäsittelykoneissa hydraulipumppua pyörittää 3-vaiheinen oikosulkumoottori. Oikosulkumoottori kuuluu epätahtimoottoreihin. Oikosulkumoottorit ovat kaikista yleisimmin käytettyjä moottoreita niiden yksinkertaisen rakenteen ja hyvän hyötysuhteen vuoksi. [2, 119, 267.]

Sähkömoottori on sähköenergian liike-energiaksi muuttava laite. Toiminta perustuu sähköllä luotaviin magneettikenttiin, joita voidaan kytkeä tarvittaessa päälle ja pois. Sähkömoottori voidaan jakaa kahteen pääkomponenttiin, jotka ovat roottori ja staattori. Moottorin ulkokehällä paikallaan pysyvää osaa on nimeltään staattori. Staattorin sisäpuolella pyörivä akseli on roottori. Muutamia poikkeustapauksia lukuunottamatta toimintaperiaatteena on luoda staattorin avulla

magneettikenttä, jonka sisällä on virallinen johdin (roottori). Roottorin ja staattorin välille syntyy voimavaikutus, jonka vuoksi roottori alkaa pyörimään. [3, 142-146.]

3.1 Sähkömoottorintyyppi ja kytkentä

Perehdytään tarkemmin materiaalinkäsittelykoneissa käytettävän 3-vaiheisen oikosulkumoottorin toimintaperiaatteeseen. Oikosulkumoottorin staattorissa sijaitsee symmetriset kolmivaiheiset käämitykset, joihin kytketään vaihtosähkö (kuva 3). Tämä synnyttää moottorin sisällä pyörivän magneettikentän. Magneettikenttä indusoituu roottorikäämitykseen. Indusoitumisen seurauksena roottoriin syntyy roottorivirta. Staattorikäämityksen magneettikentän ja roottorivirran voimavaikutuksesta roottori alkaa pyörimään. Tästä syntyy oikosulkumoottorin vääntömomentti. [3, 142-146.]



Kuva 3. Oikosulkumoottorin läpileikkaus

Roottorin pyörimänopeus on hyvin lähellä staattorin magneettikentän pyörimänopeutta, mutta roottorin pyöriminen on kuitenkin hieman jäljessä. Tästä syntyy moottorin nimitys epätahtimoottoriksi. Tahtinopeuden ja moottorin pyörimänopeuden välistä eroa kutsutaan jättämäksi. [3, 145-146.]

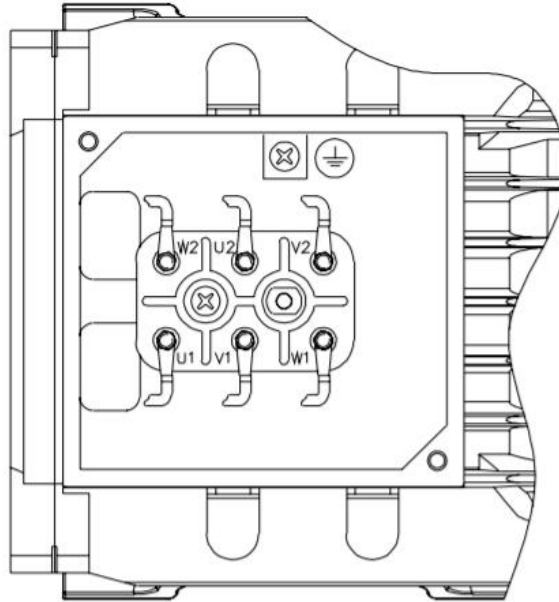
Oikosulkumoottorin vakionopeutta voidaan muuttaa lisäämällä tai vähentämällä staattorissa olevien käämien määrää. 3-vaiheisessa moottorissa on vähintään yksi käämi vaihetta kohti. Käämien määrän tuplaamisella kolmesta kuuteen saadaan kierrosnopeus puolitettyä. Toinen vaihtoehto pyörimänopeuden muuttamiseksi on taajuuden muuttaminen. Sähkömoottorin pyörimänopeus on ilmoitettu moottorissa sijaitsevassa tyyppikilvessä (kuva 4). [3, 144.]

V		Hz	kW	r/min	A	cos φ	I_A / I_N	t_E / s
690 Y	50	15	1460	16.7	0.82			
400 Δ	50	15	1460	29	0.82			
660 Y	50	15	1455	17.3	0.84			
380 Δ	50	15	1455	30	0.84			
415 Δ	50	15	1465	28	0.81			
440 Δ	60	18	1750	30	0.84			

Kuva 4. Sähkömoottorin tyyppikilpi [4, 22].

3-vaiheiset sähkömoottorit kytketään yleensä joko tähti- tai kolmiokytkennällä. Tämä mahdollistaa sähkömoottorin käyttämisen kahdella eri jännitealueella. Sähkömoottorin tyyppikilvessä esitetään käyttöjännite molemmille kytkennöille. Esimerkiksi tyyppikilven arvo "220-240 VD/380-420 VY" tarkoittaa kolmiokytkentään

220-240 VAC jännitettä ja tähtikytkentään 380-420 VAC jännitettä. Sähkömoottorin staattorikämmien liittimet nimetään yleensä W1, W2, U1, U2, V1 ja V2 (kuva 5). [5, 7.]



Kuva 5. Moottorin liittimet kytkentäkotelon sisältä [4, 13]

Tähtikytkennässä vaiheet L1, L2 ja L3 kytketään moottorin käämeihin, käämien toiset päät kytketään nollapisteeseen. Tähtikytkennässä yhden staattorikämmen yli vaikuttaa siis yhden vaiheen jännite (kuva 6).

Kolmiokytkennässä staattorin käämit kytketään puolestaan vaiheiden välille, jolloin tähtipistettä ei tarvita. Tällöin staattorin käämiin vaikuttava jännite on kahden vaiheen välinen jännite (kuva 6). [5, 7.]

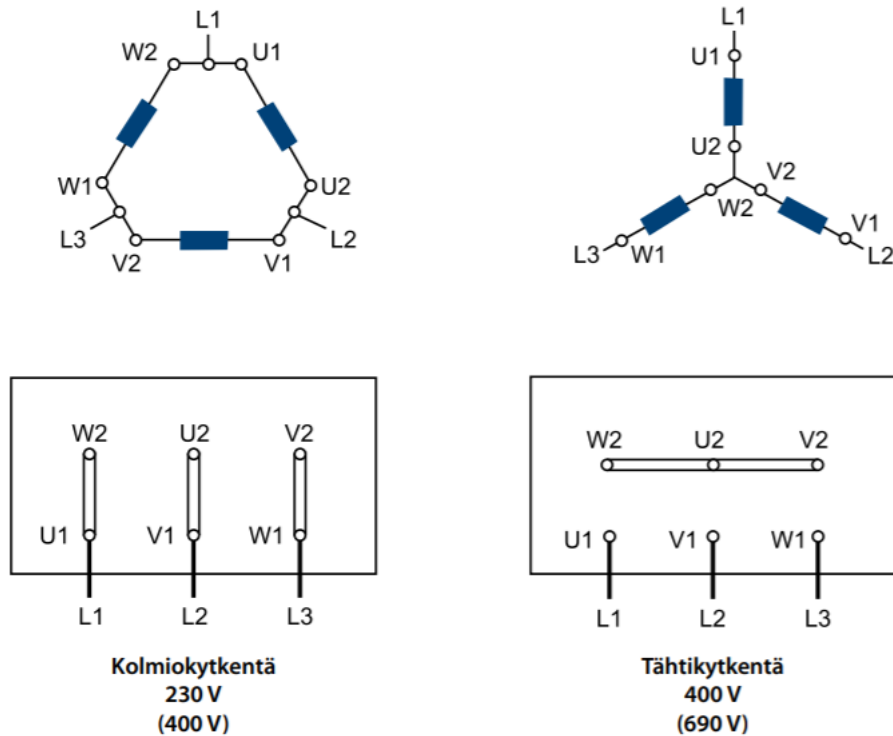
Kolmiokytkennässä staattorinkäämiin vaikuttava jännite saadaan kaavasta:

$$U_{w1} = U_{L1} * \sqrt{3} \quad (1)$$

jossa:

U_{w1} =Käämiin kohdistuva jännite

U_{L1} =vaihejännite



Kuva 6. Tähti- ja kolmiokytkentä [5, 7].

3.2 Sähkömoottorin teho ja käyttöjännite

Sähkömoottoreita löytyy monia eritehoisia. Materiaalinkäsittelykoneissa käytettävät sähkömoottorit ovat teholtaan 200-375 kW. Moottorin koko riippuu materiaalinkäsittelykoneen koosta. Sähkömoottorin kuluttama teho kuluu pääosin mekaanisen voiman tuottamiseen. Osa tehosta kuluu moottorin käämityksissä ja rautaosissa. Tämä tehohäviö muuttuu lämmöksi [3, 154-155]. Mekaanisen voiman tuottamiseen käytettävä teho on pätötehoa (tunnus P). Staattorikämmityksissä ja rautaosissa tehoa kuluu magnetointiin. Tähän kuluva teho on loistehoa (tunnus Q). Sähkömoottorin käyttämän lois- ja pätötehon avulla voidaan selvittää (kaava 2) moottorin tehokerroin ($\cos\varphi$), joka kuvastaa pätötehon suhdetta loistehoon. [6, 11.]

Kolmivaihemoottorin teho kilowatteina saadaan seuraavasta kaavasta:

$$P = \frac{\sqrt{3} \cdot U \cdot I_n \cdot \cos\varphi}{1000} \quad (2)$$

jossa:

U =Käyttöjännite

I_n =Nimellisvirta

$\cos\varphi$ =tehokerroin

Sähkömoottoreita valmistetaan monille eri käyttöjännitteille. Jännitteellä on iso merkitys tehokkaassa ja toimivassa tehonsiirrossa. Suurempi käyttöjännite laskee moottorin tarvitsemaa virtamäärää. Virran ja jännitteen suhde on lineaarinen. Virta-arvon pieneneminen taas mahdollistaa ohuempien kaapeleiden käytön. Suuremman kokoluokan moottoreissa sekä pitkillä kaapelointimatkoilla käytetään korkeampaa käyttöjännitettä. Yleisimmät käyttöjännitteet moottoreissa ovat 400 V ja 690 V. Muitakin käyttöjännitteitä on, mutta niitä käytetään harvemmin.

Jännitteen suhde virtaan:

$$U = R * I \quad (3)$$

jossa:

U =Käyttöjännite

I =Virta

R =Resistanssi

3.3 Sähkömoottorin suojaus ja käynnistämistavat

Sähkömoottorit suojataan käytönaikaisia vikatilanteita varten. Suojauksella saadaan estettyä materiaalivahingot moottorissa ja sitä syöttävässä kaapelissa. Moottorin suojaus koostuu kahdesta eri suojauksesta, joita ovat oikosulku- ja ylikuormitussuojaus. [2, 527-529.]

Oikosulkusuojauksen tarkoituksena on suojata moottoria vikatilanteessa, joissa moottoripiirin virta nousee äkillisesti erittäin suureksi [2, 532]. Tilanteen voi aiheuttaa esimerkiksi kaapelin eristevaurio tai virheellinen kytkentä. Oikosulkusuojaus toteutetaan yleensä johdonsuojakatkaisijoilla, kompaktikatkaisijoilla, tulppa- tai kahvasulakkeilla [5, 62].

Materiaalinkäsittelykoneessa moottorin oikosulkusuojaus sijaitsee koneen sisällä olevassa keskuksessa. Lisäksi konetta syöttävässä keskuksessa on oikosulkusuojaus koneen syöttökaapelia varten. [1.]

Ylikuormitussuojauksen tehtävänä on estää moottorin ja sitä syöttävän kaapelin liiallinen lämpeneminen. Lämpenemistä tapahtuu, kun moottorin virta nousee esimerkiksi moottorin kuormituksen lisääntymisen vuoksi. Ylivirtasuojaus toteutetaan joko moottorin lämpötilamittauksella tai seuraamalla moottorin virrankulutusta. Yleisimpiä suojalaitteita ovat lämpörele, moottorinsuojakytkin, kompaktikatkaisija ja pehmokäynnistin. [2, 527-529.]

Materiaalinkäsittelykoneessa ylivirtasuojaus on syöttökaapelin koneen puoleisessa päädyssä, jonka takia sitä ei tarvitse huomioida suunnittelussa. Materiaalinkäsittelykoneen syöttökaapelia tarkastellessa tulee huomioida ainoastaan oikosulkusuojaus.

Sähkömoottoreiden käynnistystapa valitaan käyttötarkoitusta palvelevaksi. Moottorin sijoituskohde ja erityisesti verkon rakenne voivat aiheuttaa tiettyjä tarpeita käynnistystavan valintaan.

Käynnistämistapaan vaikuttavia tekijöitä:

- moottorin teho
- käynnistymisen nopeus
- moottorin pyörimänopeuden säätö
- sähköverkon oikosulkuteho
- jarruttava kuorma
- kustannukset.

Käynnistämistavan valintaan vaikuttaa hyvin monta asiaa ja sen valinta ei ole aina yksinkertaista. Sähkömoottoreilla voi olla useita käynnistämistapoja, joilla saavutetaan optimaalinen tulos toiminnan kannalta. Sähköisissä materiaalinkä-

sittelykoneissa käytettävät käynnistystavat ovat suorasähkökäynnistys, taajuusmuuttaja ja pehmökäynnistys. Seuraavaksi perehdytään näihin käynnistystapoihin. Miten ne eroavat toisistaan? Mitä hyötyjä ja haittoja erilaisista käynnistämistavoista löytyy? [5, 10-12.]

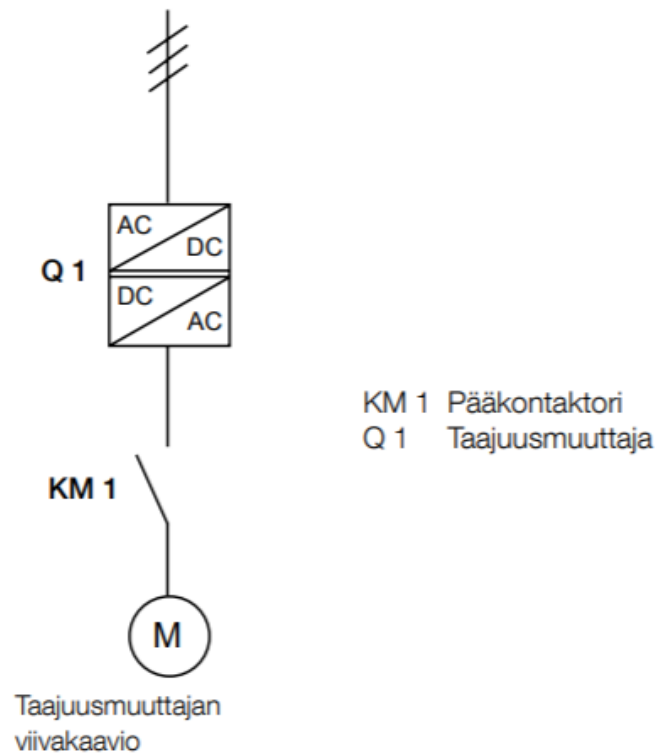
3.3.1 Suorasähkökäynnistys

Suorasähkökäynnistys on kaikkein yleisimmin käytetty sähkömoottoreiden käynnistystapa. Tässä käynnistystavassa nimensä mukaisesti sähkömoottori kytetään suoraan sähköverkkoon. Tämä tapahtuu joko kolmio- tai tähtikytkennällä. Suorasähkökäynnistyksen suurimpia etuja on sen edullisuus ja kompakti koko. Haasteita suorasähkökäynnistyksessä tuottaa sen ottama suuri virtapiikki käynnistyshetkellä. Suuri virtapiikki aiheuttaa jännitteenalenemaa koko sähköverkkoon ja tämä on huomioitava suunniteltaessa. Toinen merkittävä haitta on käynnistämisen tapahtuva moottorin vääntömomentin äkillinen nousu. Äkillinen nousu johtuu moottorin nopeasta käynnistymisnopeudesta (normaalisti <1 s.). Äkillinen vääntömomentin nousu saattaa aiheuttaa ongelmia tietyissä käyttökohteissa, kuten esimerkiksi kuljettimissa. [3, 151.]

3.3.2 Taajuusmuuttaja

Taajuusmuuttajakäynnistyksessä moottori käynnistetään sähköä taajuuden muuttamisen avulla. Taajuusmuuttaja on suoraan sähkökäynnistystä huomattavasti kalliimpi moottorin käynnistystapa. Laite sisältää paljon elektroniikkaa, joka myös lisää moottorin eri käyttömahdollisuuksia. Taajuusmuuttaja on suosittu moottorin käyttötapa sellaisissa kohteissa, joissa vaaditaan tarkkaa moottorin pyörimisnopeuden ja momentin säätöä. Taajuusmuuttajassa on kaksi pääosaa. Ensimmäisessä osassa taajuusmuuttaja muuttaa vaihtosähköä tasasähköksi. Toinen osa taas muuttaa tasasähköä takaisin vaihtosähköksi. Taajuusmuuttaja pystyy hallitsemaan uudestaan vaihtosähköksi muutetun jännitteen taajuutta. Näin ollen sähkömoottorille menevän jännitteen taajuuden säädöllä voidaan kontrolloida moottorin pyörimänopeutta. Materiaalinkäsittelykoneissa taajuusmuutta-

jaa käytetään ainoastaan moottorin käynnistämistä varten. Moottorin saavuttaessa nimellinopeuden, ohjataan sähkösyöttö taajuusmuuttajan ohi suoraan moottorille. Taajuusmuuttaja leikkaa huomattavasti käynnistymisessä syntyvää virtapiikkiä. [5, 16.]

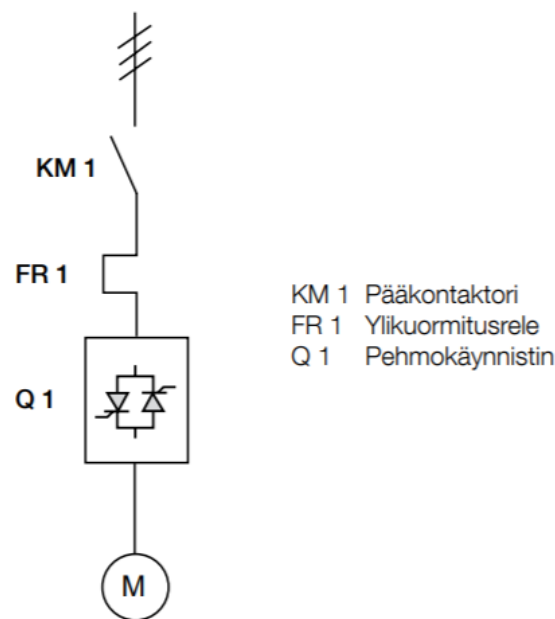


Kuva 7. Taajuusmuuttajalla varustettu moottorilähtö [5, 17].

3.3.3 Pehmokäynnistys

Yksi yleisimmistä käynnistystavoista on pehmokäynnistys. Pehmokäynnistys eroaa taajuusmuuttajasta toimintaperiaatteeltaan. Pehmokäynnistin ei muuta moottorille syötettävän sähkön taajuutta, vaan sen toiminta perustuu jännitteen rampittamiseen. Ideana on nostaa moottorille menevän sähkön jännitettä pikkuhiljaa. Täten moottorin käynnistysvirta ei pääse kasvamaan liikaa, eikä suurja ja

tarpeettomia nytkähdyksiä synny moottorin vääntömomentissa. Pehmokäynnistimellä voidaan hallita moottorin käynnistysvirtaa ja vääntömomenttia todella kustannustehokkaasti. Pehmokäynnistimen kustannukset asettuvat suorasähkökäynnistykseen ja taajuusmuuttajan väliin. Pehmokäynnistys on suosittu käynnistystapa kohteissa, jossa moottorin käynnistyminen tulee olla hallittua. [5, 18.]

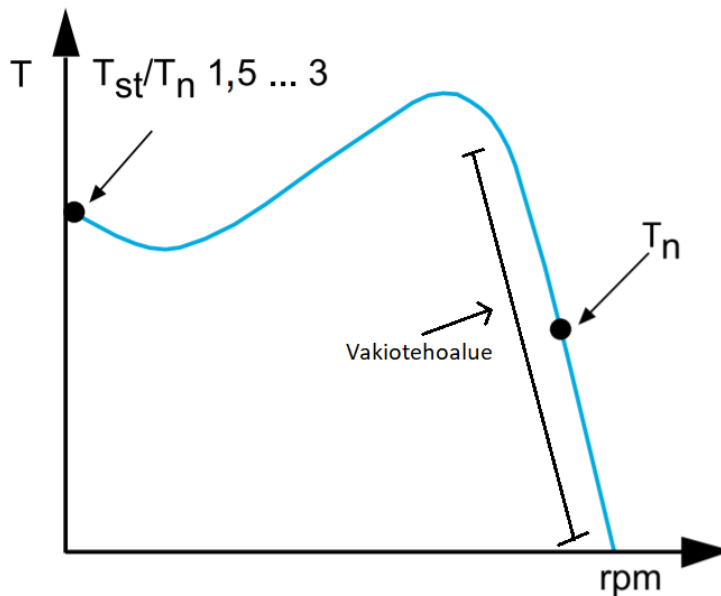


Kuva 8. Pehmokäynnistys [5, 19].

3.4 Vääntömomentti ja virta

Sähkömoottori tuottaa roottoriin pyörivän vääntömomentin, jonka suuruutta mitataan newtonmetreinä (tunnus T). Moottorin vääntömomenttia kuvataan vääntömomenttikäyrällä (kuva 9). Vääntömomenttikäyrästä huomataan moottorin vääntömomentin laskevan tietyn kierrosnopeuden jälkeen. Tätä aluetta, jolla vääntömomentti laskee, kutsutaan heikennysalueeksi. Heikennysaluetta voidaan kutsua myös vakioehtoalueeksi. Vakioehtoalueella moottorin hyötysuhde on parhaimmillaan, sekä sähkömoottorin toiminta on stabiilia. Moottoria kuormitettaessa moottorin vääntömomentti lisääntyy ja päinvastoin kuorman keventyessä vääntömomentti pienenee. Sähkömoottorin toiminta onkin suunniteltu tälle va-

kiotehoalueelle. Vääntömomenttikäyrä on aina esitetty sähkömoottorin nimellisjännitteellä. Momentin muutos jännitteen muuttuessa on verrannollin jännitteen muutoksen neliöön (kaava 4). [3, 148-150.]



Kuva 9. Vääntömomenttikäyrä [5, 9].

Momentin suhde jännitteeseen saadaan kaavasta:

$$\frac{T_1}{T_2} = \left(\frac{U_1}{U_2}\right)^2 \quad (4)$$

Sähkömoottorin tyyppikilvestä löytyvä nimellismomentti (T_n) on moottorin vääntömomentti nimelliskuormalla ja -nopeudella. Vääntömomenttia voidaan kasvattaa yli nimellismomentin. Tätä ominaisuutta tarvitaan esimerkiksi moottorin käynnistyessä ja ylikuormitustilanteessa. Moottorin vääntömomentti riippuu siihen kytketystä kuormituksesta ja moottorin pyörimänopeudesta. Kun sähkömoottorin sähköistä momenttia vastustava mekaaninen vääntömomentti, eli kuorma, kasvaa yli nimellismomentin, alkaa roottorin pyörimisnopeus laskemaan. Tästä seuraa staattorin ja roottorin välisen kentän nopeuseron kasvu, joka edelleen aiheuttaa roottorivirran suurenemisen. Roottorivirran kasvaessa myös moottorin vääntömomentti kasvaa ja roottori jää pyörimään uudella nopeudella. Uudessa nopeudessa moottorin ja kuorman vääntömomentit ovat yhtä suuria. Tästä voidaankin

todeta moottorin käytönaikaisen vääntömomentin riippuvan vastamomentista. Ja näin ollen vastamomentti vaikuttaa myös pyörimisnopeuteen. [8]

Moottorin käynnistettäessä puhutaan käynnistysmomentista (T_0). Käynnistysmomentit vaihtelevat moottorin kokoluokan mukaan. Pienissä sähkömoottoreissa (<30 kW) käynnistysmomentti on yleensä 1,5-2,5 -kertainen nimellismomenttiin verrattuna. Keskikokoisilla (30-250 kW) moottoreilla käynnistysmomentti on noin 2-3 -kertainen nimellismomenttiin verrattuna. Suurilla moottoreilla käynnistysmomentti on taas pienempi kuin nimellismomentti. Tämän vuoksi erittäin suuria moottoreita ei voida käynnistää suoraan nimelliskuormalla. [5, 9.]

Sähkömoottorin käynnistymishetkellä moottorin vääntömomentin tulee olla suurempi, kuin kuorman aiheuttama jarruttava voima. Moottorin vääntömomentin ja jarruttavan voiman erotukseksi jäävä voima on kiihdyttävä voima. Mitä suurempi tämä voima on, sitä nopeammin moottori käynnistyy. Päinvastoin, jos jarruttava voima (kuorma) kasvaa tai moottorin vääntömomentti pienenee, moottorin käynnistyminen hidastuu. Kun sähkömoottorin kehittämän vääntömomentin ja vastustavan kuorman vääntömomentin erotus on nolla, loppuu moottorin pyörimisnopeuden kiihtyminen ja moottori alkaa pyörimään vakionopeudellaan. [2, 490.]

Huippumomentti on sähkömoottorin maksimi suorituskyky (T_{maks}). Huippumomentti on huomattavasti nimellismomenttia suurempi, yleensä moninkertainen. Sähkömoottoria voidaan hetkellisesti kuormittaa huippumomenttia vastaavalla kuormalla. Moottorin kuormituksen ylittäessä huippumomentin moottori pysähtyy. Tällaisessa tilanteessa tapahtuu niin sanottu moottorin kippaaminen. Moottorin kuormittaminen yli nimellismomentin aiheuttaa sähkömoottorin liikalämpenemistä, jonka vuoksi sitä ei voida tehdä pitkäaikaisesti. [3, 149.]

Lisäksi moottorin vääntömomenttia vastustaa hitausmomentti. Hitausmomentti syntyy moottorin sisäisistä massoista. Näitä massoja ovat esimerkiksi vauhti-pyörä ja laakerit. Moottorin sisäisten massojen pyörimisvauhdin kiihdyttämiseen tarvitaan energiaa. Tämä liike-energia on kiihdyttämisen aikana otettava sähköverkosta. Moottorin pysähtyessä nämä samat massat tuottavan päinvastaisen

energian, joka ilmenee esimerkiksi lämpönä moottoria sammuttaessa. Hitausmomenttia ei tarvitse ottaa huomioon, mikäli hitausmomentti on erittäin pieni ja näin ollen moottorin läpi siirtyvä energia on matala. [2, 496-497.]

Hitausmomenttiin sähkömoottorin osista eniten vaikuttaa vauhtipyörän koko. Suurilla vauhtipyörillä varustettujen moottoreiden hitausmomentti on suuri ja se hidastaa moottorin käynnistymistä. Hitausmomentti vaikuttaakin moottorin käynnistymisaikaan, tämän vuoksi suurien sähkömoottoreiden käynnistymisajat ovat pidempiä verrattuna pieniin moottoreihin. [5, 11.]

Sähkömoottori ottaa sähköverkosta virtaa. Tämä moottorin virta jakautuu kahteen eri komponenttiin, jotka ovat pätö- ja loisvirta. Loisvirta sisältää magnetoimiseen kuluvaan virran ja pätövirta sisältää momentin tuottaman virtakomponentin. [6,11.]

Kokonais- eli näennäisvirta saadaan kaavasta:

$$I_S = \sqrt{I_P^2 - I_Q^2} \quad (5)$$

jossa:

I_S =Näennäisvirta

I_P =pätövirta

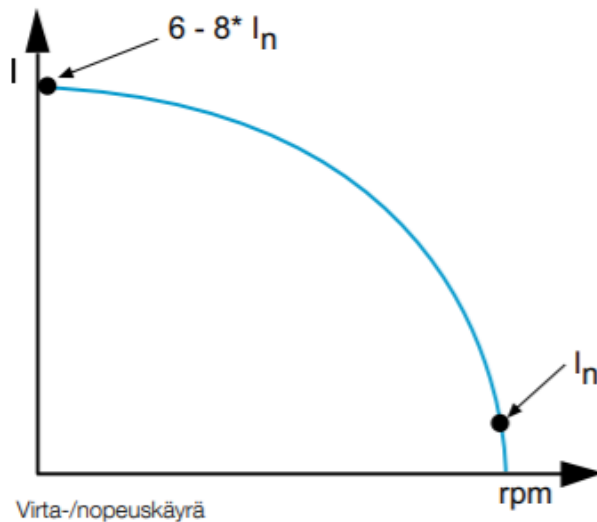
I_Q =loisvirta

Sähkömoottorin virrankulutus vaihtelee moottorin kuormituksen, pyörimänopeuden ja teholuokan mukaan. Moottorin kuormitus vaikuttaa virtaan merkittävästi. Kevyemmin kuormitettu moottori käyttää virtaa vähemmän ja raskaasti kuormitettu päinvastoin enemmän. [5, 8-10.]

Moottorin tyyppikilvessä esitetään nimellisvirta (I_n). Nimellisvirta on arvo, jonka moottori ottaa sähköverkosta nimelliskuormituksessa, sekä nimellisuopeudessa. Käynnistymisen hetkellä sähkömoottori ottaa huomattavasti enemmän virtaa ni-

mellisvirtaan verrattuna. Tätä kutsutaan käynnistysvirraksi (I_{start}). Suurin merkitys käynnistysvirran suuruuteen on moottorin käynnistystavalla. Käynnistysvirran leikkaaminen onnistuukin helpoiten käynnistystavan vaihtamisella. [5, 8-19.]

Suurin käynnistysvirta on suorassa sähkökäynnistyksessä, jossa se on tavallisesti 6-8 -kertainen nimellisvirtaan verrattuna (kuva 10) [5, 13]. Oikosulkumoottorin käynnistystilanteen alkuhetki suoralla sähkökäynnistyksellä vastaa toiminnaltaan kolmivaiheista oikosulkua. Tämän vuoksi käynnistysvirtaan vaikuttaakin ainoastaan moottorin liittimiin kytketyn jännitteen suuruus, sekä moottorin sisäinen impedanssi. Hyvin yleisesti luullaan, että moottoriin kytketyn kuorman suuruus vaikuttaa käynnistysvirtaan, mutta tämä ei pidä paikkaansa suorassa sähkökäynnistyksessä. Moottoriin kytketty kuorma, sekä moottorin hitausmomentti vaikuttavat siihen, kuinka nopeasti moottorin ottama virta alkaa lähestyä nimellisvirtaa käynnistyshetken jälkeen. Tämä voi aiheuttaa käynnistämisen pitkittymisen ja suojalaitteiden liikalämpenemisen, mikä voi edelleen aiheuttaa esimerkiksi sulakkeen palamisen. [7, 335.]



Kuva 10. kuvaaja sähkömoottorin käynnistysvirrasta suorassa sähkökäynnistyksessä [5, 13].

Käynnistysvirran huippuarvo sijoittuu heti ensimmäisien jaksojen ajalle, jolloin moottori magnetoituu. Tämä tapahtuma on hyvin samanlainen kuin muuntajan magnetoituminen. Virran huippuarvo käykin hetkellisesti noin $2\sqrt{2}$ -kertaisena normaaliin käynnistysvirtaan verrattuna. Virran huippuarvoa ei yleensä tarvitse ottaa huomioon laskelmissa poikkeustapauksia lukuun ottamatta. Tämän vuoksi moottorivalmistajien ilmoittama käynnistysvirran tarkkuus riittää normaaleiden sähkömoottorikäyttöjen mitoittamiseen. [7, 322.]

Pehmokäynnistyksessä moottorin käynnistymisaika on pidempi kuin suorassa sähkökäynnistyksessä. Tämän vuoksi moottorin ottama käynnistysvirta on huomattavasti pienempi verrattuna suorasähkökäynnistykseen. Pehmokäynnistyksessä käynnistysvirta on yleensä 2-4 -kertainen nimellisvirtaan verrattuna. [5, 18-19.]

Taajuusmuuttajalla moottorin ottamaa käynnistymisvirtaa voidaan hallita todella tehokkaasti. Käynnistymisvirta ei poikkea nimellisvirrasta juuri ollenkaan. Materiaalinkäsittelykoneissa on havaittu maksimissaan 1,5 -kertainen virta nimellisvirtaan verrattuna. [5, 16.]

3.3 Materiaalinkäsittelykoneen syöttökaapeli

Materiaalinkäsittelykoneissa käytettävä syöttökaapeli on tyypiltään Buflex-M. Tämä kaapeli on ominaisuuksiltaan taipuisa ja soveltuu käytettäväksi kelalla. Kaapeleiden tekniset tiedot ovat saatavissa kaapelivalmistajalta [9].

REELING CABLES

PUR MINING 0,6/1kV



Product description

High quality reeling cable e.g. for mining machinery. Used in similar applications as Buflex-M.

No. cores x cross section mm	Cable Diameter App. mm	Cable weight App. kg/km	Current Rating [A]	Maximum Tensile Load (N)
4G16	20 ±1.5	860	95	1280
3x25 + 3G6 + 2x1.5	25 ±1.5	1250	121	1500
3x35 + 3G6 + 2x1.5	27,3 ±1.5	1550	150	2100
3x50 + 3G10 + 2x1.5	31,5 ±2.0	2200	182	3000
3x70 + 3G16 + 2x1.5	36,5 ±2.0	3000	234	4200
3x95 + 3G16 + 2x1.5	40,5 ±2.5	3750	283	5700
3x120 + 3G25 + 2x1.5	44,5 ±2.5	4800	329	7200
3x150 + 3G25 + 2x1.5	51,5 ±2.5	5750	375	9000
3x185 + 3G35 + 2x1.5	56,5 ±2.5	7300	428	11100
3x240 + 3G350 + 2x1.5	61,5 ±2.5	8950	511	14400

Taulukko 1. Buflex-M kaapelin ominaisuudet.

Materiaalinkäsittelykoneen syöttökaapelia mitoittaessa tulee huomioida, moottorin nimellisvirta, jännitteenalenema, vikasuojaus, sekä kaapelin kesto mekaanisista rasituksesta vastaan. Kaapelin poikkipinta valitaan materiaalinkäsittelykoneen aiheuttaman kuormitusvirran mukaan. Materiaalinkäsittelykoneen sähkömoottorin nimellisvirtaa voidaan käyttää kuormitusvirtana. Kuormitettavuudella mitataan kaapelin virran kesto. Kuormitettavuus kertoo sen virta-arvon, jolla kaapelia voidaan kuormittaa yhtäjaksoisesti. Mitä suurempi kaapelin johtimien poikkipinta-ala on, sitä suurempaa kuormitusta kaapeli kestää. [10, 1-4.]

Materiaalinkäsittelykoneissa syöttökaapelin johtimen poikkipinta-alan lisäksi syöttökaapelin kuormitettavuuteen vaikuttaa asennustapa. Muitakin kuormitetta-

vuuteen vaikuttavia tekijöitä on, mutta niitä ei tarvitse huomioida tässä yhteydessä. Kaapelissa kulkeva virta aiheuttaa aina tehohäviöitä, jotka ilmenevät lämpönä. Lämpö siirtyy kaapelin johtimista eristeeseen ja siitä edelleen ilmaan. Tämän vuoksi kaksi ohuempaa kaapelia kestävätkä kuormitusta enemmän kuin yksi paksumpi kaapeli. Kahdessa ohuemmassa kaapelissa on enemmän pinta-alaa, jonka kautta jäähtyminen on mahdollista. [11, 41-67.]

Materiaalinkäsittelykoneissa käytetään mono- ja monotuplaspiraalikaapeleita. Monotuplaspiraalissaakaapelissa on kaksi kaapelia vierekkäin. Monotuplaspiraalikaapeli jäähtyy paremmin ja näin ollen sen kuormitettavuus on suurempi kuin monospiraalikaapeliin.

Asennustavan aiheuttama muutos kuormitettavuuteen huomioidaan korjauskerroimella. Korjauskerroin riippuu asennustavasta. Materiaalinkäsittelykoneiden kaapelointia määrittää SFS-EN 60204-1:2018 standardi. Asennustavan mukainen korjauskerroin löytyy tästä standardista. Asennustapa on nimeltään kaapeli kelalla. Korjauskertoimet asennustavalle löytyvät standardista SFS-EN 60204-1:2018 taulukko 7. [12, 73.]

Korjauskertoimen aiheuttama vaikutus kuormitettavuuteen saadaan kaavalla:

$$I_z = I_{zp} * k \quad (6)$$

jossa:

I_z =Kaapelin todellinen kuormitettavuus

I_{zp} =Kaapelin peruskuormitettavuus

k=korjauskerroin

Kaapelin kuormitettavuuden lisäksi tulee tehdä oikosulkusuojauksen tarkastelu. Standardissa SFS-EN 60204-1:2018 määritelty poiskytkentäaika on 5 sekuntia, mutta materiaalinkäsittelykoneissa on sovittu käytettäväksi 1 sekunnin poiskytkentäaika. Oikosulkusuojaukseen materiaalinkäsittelykoneissa käytetään joko kahvasulakkeita tai kompaktikatkaisijaa. Käytettävän suojalaitteen toimintakäyrältä voidaan lukea tarvittava oikosulkuvirran tehollisarvo, jolloin suojalaite

katkaisee virtapiirin yhdessä sekunnissa. Suojalaitteen tulee katkaista virtapiiri pienimmällä minimioikosulkuvirralla. Tämä tarkoittaa oikosulkua vaihe- ja pe-joh-timen välillä. Oikosulkuvirran laskemisessa noudatetaan standardia IEC 60909. Minimioikosulkuvirta saadaan laskettua kaavalla 7. [13, 84-95.]

Oikosulkusuojauksen tarkastelussa tulee myös tarkastaa suojalaitteen katkaisukyky. Tätä varten tulee laskea suurin mahdollinen oikosulkuvirran tehollisarvo (prospektiivinen oikosulkuvirta). Prospektiivisin oikosulkuvirran laskemisessa kyt-kimien ja suojalaitteiden impedanssin vaikutusta ei oteta huomioon. Suurimman oikosulkuvirran aiheuttaa kolmivaiheinen oikosulku. Suurin oikosulkuvirta saa-daan laskettua kaavalla 8. [13, 142.]

Minimioikosulkuvirta saadaan kaavasta:

$$I_{k1min} = \frac{C_{min} * U}{\sqrt{3} * Z} \quad (7)$$

Suurin oikosulkuvirta saadaan kaavasta:

$$I_{k3max} = \frac{C_{max} * U}{\sqrt{3} * Z} \quad (8)$$

Joissa:

I_{k3max} =kolmivaiheinen oikosulkuvirta

I_{k1min} =Yksivaiheinen oikosulkuvirta

C_{max} =IEC 60909 mukainen varmuus kerroin 1,05

C_{min} = IEC 60909 mukainen varmuus kerroin 0,95

U =Pääjännite

Z =Virtapiirin impedanssi

Virtapiirin kokonaisimpedanssissa tulee huomioida kaapelin impedanssi ja syöt-tävän verkon impedanssi. Syöttävän pisteen impedanssi saadaan laskettua oiko-sulkuvirran avulla kaavalla 9. [13, 95.]

Syöttävän verkon impedanssi saadaan kaavalla:

$$Z_{kv} = \frac{U}{\sqrt{3} * I_{kv}} \quad (9)$$

jossa:

Z_{kv} =syöttävän verkon impedanssi

I_{kv} =syöttävän verkon oikosulkuvirta

U =Pääjännite

Kaapeli tulee olla mitoitettu niin, että suojalaite laukeaa ennen kuin kaapelin lämpötila kerkeää nousemaan liian korkealla. Kaapelivalmistaja ilmoittaa kaapeleiden arvot +80 °C lämpötilassa. Suositeltu maksimilämpötila oikosulussa kaapelivalmistajan mukaan on 200 °C [9].

Maksimiaika, jonka kaapeli kestää oikosulkua ennen kuin se saavuttaa sallitun maksimilämpötilan:

$$t = \left(\frac{k \cdot S}{I}\right)^2 \quad (10)$$

jossa:

t =suurin sallittu aika

S =kaapelin poikkipinta neliömillimetreinä

I =oikosulkuvirta

k =kuparijohtimelle tarkoitettu kerroin eristemateriaalin mukaan

K -arvot löytyvät kaapelivalmistajan teknisistä tiedoista [9].

3.4 Jännitteenalenema

Jännitteenalenemaa syntyy aina kun kaapelissa kulkee virtaa. Jännitteenaleneman suuruus on riippuvainen kaapelin impedanssista. Jännitteenalenema on kuormitustilanteessa kaapelin alku- ja loppupään jännitteiden erotus. Jännitteenalenema esitetään yleensä prosentteina suhteellisena jännitteenalenemana, jossa jännitteenalenemaa verrataan nimellisjännitteeseen. [2, 503-504.]

Jännitteenaleneman tarkastelu voi aiheuttaa tarpeen suurentaa kaapeloinnin poikkipinta-alaa. Standardin SFS-EN 60204-1:ssä on esitetty suurimmaksi jännitteenalenemaksi syötön ja kuormituksen välillä 5 % suhteellista jännitteenalenemaa. Tämä jännitteenalenema koskee normaalitilannetta, jossa syöttökaapeli on kuormitettuna moottorin nimellisvirralla.

3-vaiheinen jännitteenalenema kaapelissa saadaan kaavasta:

$$\Delta U = I * S * \sqrt{3} * (r_c * \cos\varphi + x_c * \sin\varphi) \quad (11)$$

jossa:

ΔU =Jännitteen alenema

I =virta

S =johdon pituus (km)

r_c =johtimen ominaisresistanssi (Ω/km)

x_c =johtimen reaktanssi (Ω/km)

φ =Jännitteen ja virran välinen vaihekulma ($^\circ$)

Johtimen resistanssi ja reaktanssi saadaan kaapelivalmistajan ilmoittamista teknisistä tiedoista [9].

Suhteellinen jännitteenalenema saadaan kaavasta:

$$\Delta u = \frac{\Delta U}{U_n} * 100 \quad (12)$$

jossa:

Δu =suhteellinen jännitteenalenema (%)

Δu =jännitteenalenema (V)

U_n = nimellisjännite (V)

Käytönaikaisen jännitteenaleneman lisäksi tulee tarkastella käynnistysaikaisista jännitteenalenemaa. Erityisesti suorassa sähkökäynnistyksessä moottorin ottama virta on todella suuri, jolloin jännitteenalenema nousee hetkellisesti to-

della korkeaksi. Korkean virran vuoksi jännitteenalenemaa syntyy myös moottoria syöttävän pisteen pääkiskostossa. Syöttävän pisteen kiskoston jännitteenalenema saadaan laskettua muuntajan teknisten tietojen avulla. Teknisiä tietoja ei kuitenkaan ole aina käytettävissä, joten laskemiseen voidaan käyttää syöttävän pisteen oikosulkuvirran arvosta johdettavaa impedanssia. Impedanssin selvittämiseen voidaan käyttää kaavaa 9. Syöttöpisteen jännite ei saa tippua merkittävästi. Merkittävä jännitteen hetkellinen notkahdus voi aiheuttaa muissa samasta verkostosta syötetyissä laitteissa toimintahäiriöitä. Yleisesti hyväksyttävänä rajana voidaan pitää 10 %:a. [2, 503-506.]

Sähkömoottorin liittimissä tapahtuva jännitteenalenema on syöttävän pisteen aiheuttaman jännitteenaleneman ja moottorin syöttökaapelin aiheuttaman jännitteenaleneman summa. Käynnistysaikainen suhteellinen jännitteenalenema moottorin liittimissä olisi suotavaa pitää 15 %:ssa. Huomioitavaa on jännitteenaleneman vaikutus moottorin vääntömomenttiin. Jännitteen tippuessa liikaa moottorin tuottama vääntömomentti tippuu ja moottori ei jaksakaan käynnistyä. Sähkömoottorin momenteja on tarkasteltu luvussa 3.4. [2, 503-506.]

4 Rajoittavat tekijät materiaalinkäsittelykoneessa

Materiaalinkäsittelykoneissa on poikkeavia tekijöitä verrattuna normaaliin sähkömoottorilähtöön. Seuraavaksi käydään läpi niitä materiaalinkäsittelykoneen tekijöitä, jotka vaikuttavat erityisesti koneen suunnittelussa tehtäviin valintoihin.

4.1 Kaapelikela

Materiaalinkäsittelykoneen kylkeen asennetun kaapelikelan koko on rajallinen. Suurin sallittu halkaisija riippuu koneen koosta. Kelan minimihalkaisija määräytyy käytettävän kaapelin mukaan. Minimihalkaisijan tulee olla vähintään 10-kertainen kaapelin halkaisijaan verrattuna. Yleensä kuitenkin käytetään minimihalkaisijana 2 metriä, jotta kaapelikelan vääntömomentti olisi tasaisempi. Kelan minimihalkai-

sijaa tulee pienentää siinä vaiheessa, mikäli kaapeli ei mahdu kelalle ilman sisäkehän pienentämistä. Kaapelikelan halkaisijan laskemiseen sovelletaan ympyrän kehän pituuden kaavaa.

Ympyrän kehän pituus saadaan kaavasta:

$$P = 2\pi R \quad (13)$$

jossa:

P=kehän pituus

R=ympyrän säde

Kaapelin pituutta mitoittaessa on lisäksi huomioitava, että kelalle tulee jäädä vähintään yksi täysi kierros kaapelia koneen saavuttaessa maksimijomatkan. Tällä toimenpiteellä estetään rasituksen kohdistuminen kaapelin juureen. Kaapelin pituudessa tulee myös huomioida koneen sisäisiin johdotuksiin käytettävä kaapelin määrä.

Yhden kaapelin kuormitettavuuden ollessa riittämätön siirrytään käyttämään tuplamonospiraalikaapelia. Käytettäessä tuplamonospiraalia, tulee kummallekin kaapelille oma kaapelikela, minkä johdosta kuormitettavuuden korjauskertoi-
meen ei tule muutosta. Tuplamonospiraalia käytettäessä kaapelikelat asennetaan samalla akselille.

4.2 Käynnistystapa

Käynnistystavassa pyritään suosimaan pienemmissä koneissa pehmokäynnistystä sen edullisen hinnan ja kompaktin koon vuoksi. Taajuusmuuttajan lisääminen vaatii suuremman tilan sähkökeskuksesta ja tästä aiheutuu ongelmia osassa konemalleista.

4.3 Syöttävä sähköverkko

Materiaalinkäsittelykoneita toimitetaan ympäri maailmaa. Maiden välisien sähköverkkojen laaduissa on isoja eroja. Aina ei ole saatavilla tarkkoja teknisiä tietoja sähköä syöttävästä muuntajasta ja pääjakelun rakenteesta. Syöttävää sähköpistettä tulee tarkastella niin moottorin liittimien, kuin syöttävän pisteen pääkiskostolla tapahtuvan jännitteenaleneman kannalta. Syöttävän pisteen tehovaatimus ei saa nousta kohtuuttomaksi verrattuna moottorin kokoon. Mikäli saadut tulokset nousevat kohtuuttomaksi, tulisi suunnitteluratkaisuja tarkastella ja tehdä tarpeen vaatiessa muutoksia.

5 Syöttöpisteen vaadittavan oikosulkuvirran laskeminen

Seuraavaksi toteutetaan mitoitus esimerkin kautta. Esimerkkikoneessa on 250 kW:n tehoinen moottori. Koneen ajomatka on 60 metriä ja käyttöjännite 400 V. Kaapelikelan maksimihalkaisijaksi asetetaan 4 m. Moottori käynnistetään pehmoikäynnistyksellä. Syöttävän sähköverkon jännite on 410 V. Syöttävän verkon oikosulkuvirtaa tai tehoa ei tunneta.

5.1 Syöttökaapelin ja kaapelikelan mitoittaminen

Ensimmäisenä valitaan kaapelin poikkipinta-ala niin, että sen kuormitettavuus on suurempi kuin moottorin nimellisvirta. Moottorin nimellisvirta saadaan moottorivalmistajan tuotekortista (kuva 11).

Power factor $\cos\varphi$	Current		Torque	
	I_N A	I_s/I_N	T_N Nm	T_I/T_N T_b/T_N
CENELEC-design				
0.89	428	6.7	800	1.5 2.8

Kuva 11. ABB 250 kW oikosulkumoottorin tekniset tiedot. [14, 14]

Kuvasta 11 voidaan lukea 250 kW moottorin nimellisvirraksi 428 A. Moottorin käynnistymisvirta pehmokäynnistyksessä on 4 (I_s/I_n) -kertainen moottorin nimellisvirtaan verrattuna.

Moottorin käynnistymisvirran yhtälö:

$$I_s = I_n * I_s/I_n$$

jossa:

I_n =moottorin nimellisvirta

I_s/I_n =Moottorin käynnistymisvirran suhde nimellisvirtaan

lähtötiedot:

$$I_n = 428A$$

$$I_s/I_n = 4$$

moottorin käynnistymisvirta:

$$I_s = 428A * 4 = 1712A$$

Kaapelin kuormitettavuuden tulee olla suurempi kuin moottorin nimellisvirta. Kaapelin kuormitettavuuteen on huomioita korjauskerroin standardin SFS-EN 60204-1:2018 taulukko 7 mukaisesti. Kaapelien kuormitettavuudet on esitetty taulukossa 1 tämän opinnäytetyön sivulla 26. Kaapeliksi valitaan 3x240+3G50 kaapeli, jonka kuormitettavuus on 511 A. Seuraavaksi huomioidaan korjauskertoimen aiheuttama muutos kaapelin kuormitettavuuteen (kaava 6).

lähtötiedot:

$$I_{zp} = 511A$$

$$k = 0.85$$

Kaapelin todellinen kuormitettavuus:

$$I_z = 511A * 0,85 = 434 A$$

Seuraavaksi tulee laskea kaapelin kokonaispituus. Kaapelin kokonaispituutta las-
kiessa tulee ajomatkan pituuteen lisätä koneen sisäisiä johdotuksia varten 5 met-
riä, sekä kaapelikelalle jäävät kaksi ensimmäistä kierrosta (kaava 13). Kaapelin
halkaisija 61,5 mm saadaan taulukosta 1.

lähtötiedot:

$R = 1m$. Lisäksi täytyy vielä lisätä $0,5 \times$ kaapelin halkaisija, jotta saadaan kaapelin
pituus keskeltä kaapelia. $1m + 0,031m = 1,031m$

Kaapelikelalle jäävän ensimmäisen kierroksen kaapelin pituus:

$$P = 2 * \pi * 1,031m = n. 6,48m$$

Kaapelikelalle jäävän toisen kierroksen kaapelin pituus:

$$P = 2 * \pi * 1,093m = n. 6,86m$$

Kelalle jäävän kaapelin pituus koneen saavuttaessa täyden ajomatka:

$$6,86m + 6,48m = 13,3m$$

Kaapelin kokonaispituus saadaan lisäämällä laskettuun arvoon koneen ajo-
matka, sekä sisäisiin johdotuksiin kuluva kaapelin pituus.

Kaapelin kokonaispituuden kaava:

$$l_{kok} = l_{kela} + l_{sis} + l_{ajo}$$

jossa:

l_{kok} =kaapelin kokonaispituus

l_{kela} = kaapelikelalle jäävän ensimmäisen kierroksen kaapelin pituus

l_{sis} =sisäisiin johdotuksiin kuluva kaapelin pituus

l_{ajo} =ajomatkan pituus

Lähtötiedot:

$$l_{kela} = 13,3m$$

$$l_{sis} = 5m$$

$$l_{ajo} = 60\text{m}$$

Kaapelin kokonaispituus

$$l_{kok} = 13,3\text{m} + 5\text{m} + 60\text{m} = 78,3\text{m}$$

Kaapelikelan ulkohalkaisijan laskemiseksi tulee selvittää, kuinka monta kierrosta kaapelia tulee kelalle. Kierrosten määrä kerrotaan kaapelin halkaisijalla, jolloin saadaan kaapelikelan kokonaishalkaisija.

Kaapelikelan kokonaishalkaisijaa laskettaessa on muistettava lisätä kierrosmäärään myös ensimmäinen kierros, joka ei purkaudu kelalta käyttötilanteessa. Kierrosten määrä saadaan yksinkertaisesti jakamalla ajomatkan pituus sisimmän kierroksen kaapelipituudella. Laskutapa ei ole tarkka sillä seuraavalla kierrokselle kaapelia menee enemmän kelan halkaisijan kasvamisen vuoksi. Tämä ei kuitenkaan haittaa, koska virhe tapahtuu positiiviseen suuntaan. Todellisuudessa kaapelikelalle tulee pienempi kierrosmäärä kuin lasketusta arvosta saadaan.

Kierrosten määrän kaava:

$$n = \frac{l_{ajo}}{l_{kela1}} + 1$$

jossa:

n =kierroksien määrä

l_{ajo} = ajomatkan pituus

l_{kela1} =ensimmäisen kierroksen kaapelin pituus

Lähtötiedot:

$$l_{kela} = 6,48\text{m}$$

$$l_{ajo} = 60\text{m}$$

Kierroksien määrä:

$$n = \frac{60\text{m}}{6,48\text{m}} + 2 = 11,26 \dots n. 12 \text{ kierrosta}$$

Kaapelikelan kokonaishalkaisijan kaava:

$$d_{kok} = d_{kelä} + (n * d_k * 2)$$

jossa:

d_{kok} =kaapelikelan kokonaishalkaisija

$d_{kelä}$ =tyhjän kelan halkaisija

n =kokonais kierrosmäärä

d_k =kaapelin halkaisija

lähtötiedot:

$$d_{kelä} = 2m$$

$$n = 12$$

$$d_k = 0,0615m$$

Kaapelikelan kokonaishalkaisija:

$$d_{kok} = 2m + (11 * 0,0615m * 2) = 3,47m$$

Kaapelikelan halkaisija jää alle sallitun maksimihalkaisijan, joten mitoitus kaapelikelan osalta on hyväksyttävä.

5.2 Jännitteenalenemien selvittäminen

Ensimmäisenä tarkastellaan käytönaikaista jännitteenalenemaa syöttökaapelissa. Jännitteenalenemaa varten tarvitsemme kaapelin impedanssin. Tässä laskelmassa ei oteta huomioon kaapelikelan ja koneen välisten liukurenkaiden impedansseja.

Kaapelissa tapahtuvaa jännitteenaleneman laskemista varten tulee kaapelivalmistajan teknisistä tiedoista etsiä kaapelin johtimen reaktanssi x_c ja resistanssi r_c [9]. Jännitteenalenema lasketaan kaavalla 11.

Lähtötiedot:

$I=428A$, moottorin nimellisvirta

$S=0,0783$ (km)

$$r=0,101 \text{ (}\Omega/\text{km)}$$

$$x=0,072 \text{ (}\Omega/\text{km)}$$

$$\varphi= 27,1^\circ. \arccos(0,89)$$

kaapelissa syntyvä jännitteenalenema:

$$\Delta U_c = 428A * 0,0783km * \sqrt{3} * \left(\frac{0,101\Omega}{\text{km}} * \cos(27,1) + \frac{0,072\Omega}{\text{km}} * \sin(27,1) \right) = 6,96V$$

Suhteellisen jännitteenaleneman kaava (kaava 12):

Lähtötiedot:

$$\Delta u=6,96V$$

$$U_n= 410V$$

Suhteellinen jännitteenalenema kaapelissa moottorin käydessä:

$$\Delta u = \frac{6,96V}{410V} * 100 = 1,7\%$$

Käytönaikaiseksi jännitteenalenemaksi koneen ja syöttävän verkon välillä saadaan 1,7 %. Standardi SFS-EN 60204-1:2018 määritteli maksimijännitteenalenemaksi 5 %, joten tulos on riittävä.

Seuraavaksi tarkastellaan käynnistyksessä tapahtuvaa jännitteenalenemaa (kaava 11). Ensimmäisenä selvitetään, kuinka paljon jännitteenalenemaa syntyy syöttökaapelissa. Syöttävän sähköverkon tietoja ei tunneta. Ainut muuttuva tekijä on käynnistyksen aikainen virta.

Lähtötiedot:

$$I_s=1712A$$

$$S=0,0783 \text{ (km)}$$

$$r=0,101 \text{ (}\Omega/\text{km)}$$

$$x=0,072 \text{ (}\Omega/\text{km)}$$

$$\varphi= 27,1^\circ. \arccos(0,89)$$

Kaapelissa syntyvä jännitteenalenema käynnistymishetkellä:

$$\Delta U_{CS} = 1712A * 0,0783km * \sqrt{3} * \left(\frac{0,101\Omega}{km} * \cos(27,1) + \frac{0,072\Omega}{km} * \sin(27,1) \right) = 28,5V$$

Suhteellinen jännitteenalenema kaapelissa käynnistymishetkellä:

$$\Delta u_{CS} = \frac{28,5V}{410V} * 100 = 7,0\%$$

Moottorin liittimissä tapahtuva jännitteenalenema käynnistymishetkellä saadaan laskemalla kaapelissa ja syöttävässä sähköverkossa tapahtuvat jännitteenalenemat yhteen. Suurin sallittu jännitteenalenema moottorin liittimissä on suotavaa pitää 15 %:ssa verrattuna moottorin nimellisjännitteeseen. Seuraavaksi tulee määrittää kuinka paljon jännitteenalenemaa saa syntyä syöttävässä sähköverkossa.

Minimijännite moottorin liittimissä käynnistymishetkellä saadaan kertomalla moottorin nimellisjännite arvolla 0,85.

$$400V * 0,85 = 340V$$

Suurin sallittu kokonaisjännitteenalenema saadaan syöttävän verkon ja moottorin minimijännitteen erotuksesta.

$$410V - 340V = 70V$$

Syöttävässä verkossa tapahtuvan jännitteenalenema saadaan sallitun kokonaisjännitteenaleneman ja moottorin syöttökaapelissa tapahtuvan jännitteenaleneman erotuksesta.

$$70V - 28,5V = 41,5V$$

Jännitteenalenema muutettuna suhteelliseksi jännitteenalenemaksi:

$$\Delta u_{VS} = \frac{41,5V}{410V} * 100 = 10,1\%$$

Syöttävässä sähköverkossa saisi tapahtua 10,1 %:n jännitteenalenema. Syöttävässä verkossa tapahtuva jännitteenalenema olisi suotavaa pitää 10 %:ssa. Tässä tapauksessa 10,1 % kuitenkin sallitaan.

41,5 voltia eli 10,1 %:a suhteellista jännitteenalenemaa on suurin sallittu syöttöverkossa tapahtuva jännitteenalenema. Syöttävän verkon impedanssi, jolla kyseinen jännitteenalenema syntyy, saadaan kaavalla 9.

Lähtötiedot:

$$\Delta U_v = 41,5V$$

$$I_s = 1712A$$

Impedanssi syöttävässä sähköverkossa:

$$Z_{kv} = \frac{41,5V}{\sqrt{3} * 1712A} = 0,014 \Omega$$

Syöttävän verkon impedanssin avulla voidaan laskea vaadittu oikosulkuvirta syöttävässä sähköverkossa.

Oikosulkuvirran kaava:

$$I_{kv} = \frac{U}{\sqrt{3} * Z_{kv}}$$

jossa:

Z_{kv} = syöttävän verkon impedanssi

I_{kv} = syöttävän verkon oikosulkuvirta

U = Pääjännite

lähtötiedot:

$$Z_{kv} = 0,014 \Omega$$

$$U = 410V$$

vaadittu oikosulkuvirta:

$$I_{kv} = \frac{410V}{\sqrt{3} * 0,014\Omega} = 16\,908A$$

Saatu arvo on oikosulkuvirran minimiarvo. Mikäli syöttävän verkon oikosulkuvirta on pienempi, syntyy syöttävässä sähköverkossa ja moottorin liittimissä liikaa jännitteenalenemaa käynnistymishetkellä. Liiallisen jännitteenaleneman johdosta moottori ei mahdollisesti jaksa käynnistyä.

5.3 Oikosulkusuojauksen tarkastelu

Tarkastellaan vielä lopuksi oikosulkusuojauksen ehtojen toteutumista. Tätä varten tulee selvittää pienin ja suurin oikosulkuvirta. Suojalaitteen tulee katkaista virtapiiri 1 sekunnin kuluessa minimoikosulkuvirralla.

Pienin oikosulkuvirta syntyy yksivaiheisessa oikosulussa. Virtapiirin impedanssi sisältää yhden vaihejohtimen, pe-johtimen ja syöttävän verkon impedanssit. Tätä varten tulee laskea vaihe- ja pe-johtimen impedanssi kaapelivalmistajan ilmoittaman resistanssin ja reaktanssin avulla. Huomioitavaa on pe-johtimen rakenne kaapelissa. Pe-johdin koostuu kolmesta 50 mm^2 poikkipinnan omaavasta johtimesta. Oikosulku tapahtuu hieman ennen kaapelin päätä, joten oikosulussa syntyvä virta kulkee yhden pe-johtimen läpi.

Yksittäisen pe-johtimen impedanssi saadaan kaavalla:

$$Z_{pe} = \sqrt{r_{pe}^2 + x_{pe}^2} * l$$

jossa:

Z_{pe} =pe-johtimen impedanssi

r_{pe}^2 =pe-johtimen resistanssi

x_{pe}^2 =pe-johtimen reaktanssi

l =Kaapelin pituus

Lähtötiedot:

$r_{pe}^2 = 0,49 \text{ } \Omega/\text{km}$

$x_{pe}^2 = 0,078 \text{ } \Omega/\text{km}$

$$l = 0,0783 \text{ km}$$

Pe-johtimen impedanssi:

$$Z_{pe} = \sqrt{0,49\Omega/km^2 + 0,078\Omega/km^2} * 0,0783km = 0,0388\Omega$$

Pe-johtimen impedanssin selvittämisen jälkeen selvitetään vaihejohtimen impedanssi. Lopuksi kummankin johtimen impedanssit lasketaan yhteen. Johtimien lisäksi oikosulussa vaikuttaa syöttävän verkon impedanssi. Syöttävän verkon impedanssin lisäämisen jälkeen on ratkaistu yksivaiheisessa oikosulussa vaikuttavan virtapiirin kokonaisimpedanssi.

Vaihejohtimen impedanssin kaava:

$$Z_{l1} = \sqrt{r_{l1}^2 + x_{l1}^2} * l$$

jossa:

Z_{l1} =vaihejohtimen impedanssi

r_{l1}^2 =vaihejohtimen resistanssi

x_{l1}^2 =vaihejohtimen reaktanssi

l =Kaapelin pituus

Lähtötiedot:

$$r_{pen}^2 = 0,101 \Omega/km$$

$$x_{pen}^2 = 0,072 \Omega/km$$

$$l = 0,0783 \text{ km}$$

vaihejohtimen impedanssi:

$$Z_{l1} = \sqrt{0,101\Omega/km^2 + 0,072\Omega/km^2} * 0,0783km = 0,0097\Omega$$

Seuraavaksi lasketaan yhteen vaihejohtimen ja pe-johtimen impedanssit:

$$Z_{clik} = Z_{l1} + Z_{pe} = 0,0097\Omega + 0,0388\Omega = 0,0485\Omega$$

Kaapelissa syntyvään impedanssiin lisätään vielä syöttävän verkon impedanssi. Syöttävän verkon impedanssi on laskettu tämän opinnäytetyön luvussa 5.2.

$$Z_{k1} = Z_{clk} + Z_{kv} = 0,0485\Omega + 0,014\Omega = 0,0625\Omega$$

Pienimmässä oikosulussa vaikuttavan impedanssin selvittämisen jälkeen voidaan laskea virtapiirissä vaikuttava 1-vaiheinen oikosulkuvirta (kaava 7).

Lähtötiedot:

C_{min} = IEC 60909 mukainen varmuus kerroin 0,95

$U=230V$

$Z=0,0625\Omega$

Pienin oikosulkuvirta:

$$I_{k1min} = \frac{0,95 * 230V}{\sqrt{3} * 0,0625\Omega} = 2018A$$

Tarkastellaan seuraavaksi kaapelin lämpenemistä oikosulussa. Tarkastelu tulee suorittaa pe-johdinten osalta koska se on poikkipinnaltaan huomattavasti ohuempi kuin vaihejohdin. Aika jonka pe johdin kestää (I_{k1min}) suuruista oikosulkua saadaan kaavalla 10.

Lähtötiedot:

$S=50mm^2$

$I=2018A$

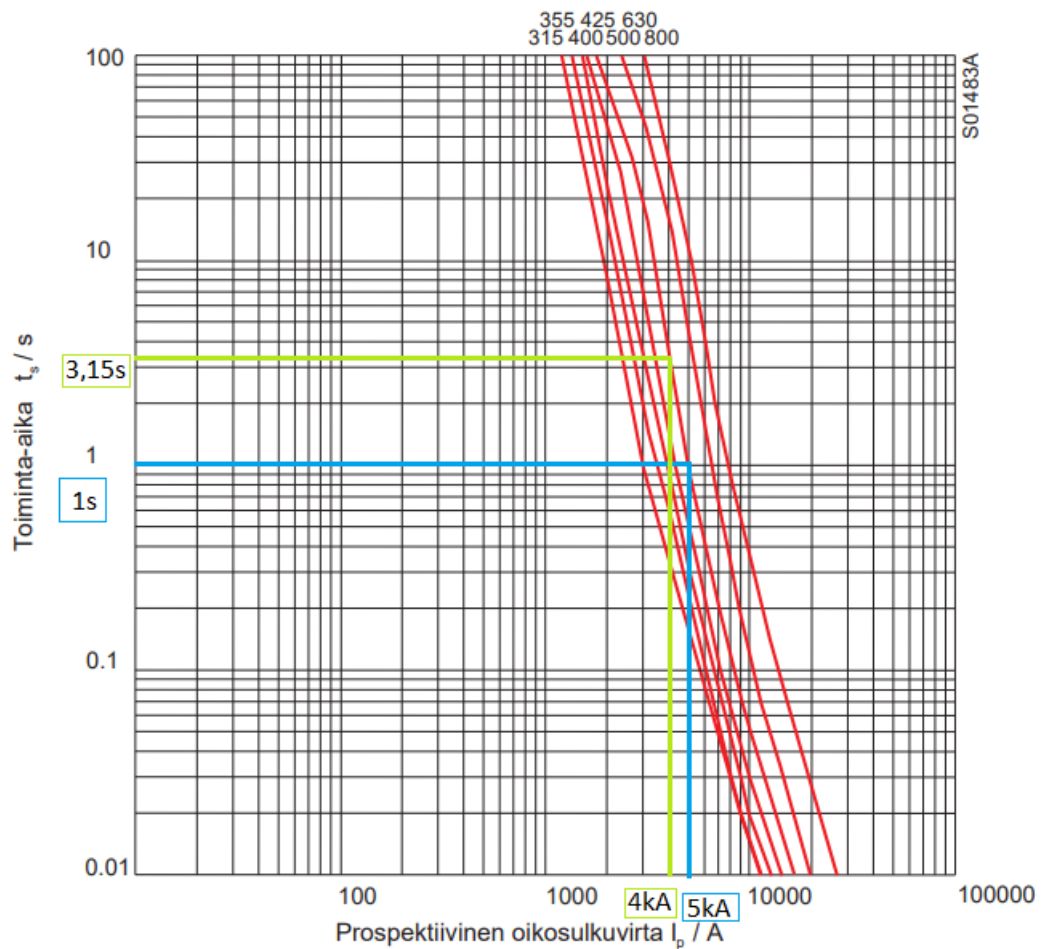
$k=128$

Suurin sallittu aika jota pe johdin kestää:

$$t = \left(\frac{128 * 50mm^2}{2018A}\right)^2 = 3.17s$$

Pe-johdin kestää 3.17 sekuntia oikosulkua enne kuin sen lämpötila nousee liian suureksi. Oikosulkusuojauksen tulee katkaista vikatilanne 1 sekunnin kuluessa minimioikosulkuvirran arvolla, jotta nopean poiskytkennän ehto katkaisuaajan osalta toteutuu. Tarkastellaan suojauksen toimintaa suojalaitteen ollessa 500 A

aM-kahvasulake. Poiskytkennän toiminta tarkastetaan toimintarajavirtataulukosta (kuva 12). 500 aM-kahvasulakkeen tulisi lauetta 2018 A virralla alle 3,15 sekunnissa, jotta poiskytkennän ehto kaapelin lämpötilan osalta toteutuu.



Kuva 12. ABB aM-kahvasulakkeiden toimintarajavirrat [15].

Kuvasta voidaan tulkita 500 A aM-sulakkeen toimintarajavirraksi 3,15 sekunnilla n. 4 kA ja 1 sekunnin ajalla n. 5 kA. Poiskytkennän ehdot eivät toteudu kaapelin lämpenemisen tai ajan osalta. Poiskytkentäajan tuli olla alle 1 sekunti. Tämän vuoksi kyseisessä tapauksessa tulisi suojalaitteena käyttää kompaktikatkaisijaa, jolla rajavirrat saadaan aseteltua tarkemmin.

Suojalaitteen tulee pystyä katkaisemaan verkon suurin mahdollinen oikosulkuvirta. Suurin oikosulkuvirta syntyy 3-vaiheisessa oikosulussa (kaava 8). Käytettävän suojalaitteen katkaisukyvyyn tulee olla saatua arvoa suurempi.

Lähtötiedot:

$$C_{max} = 1,05$$

$$U=410V$$

$Z= 0.0237\Omega$, yhden vaihejohtimen ja syöttävän verkon yhteenlaskettu impedanssi.

Suurin oikosulkuvirta:

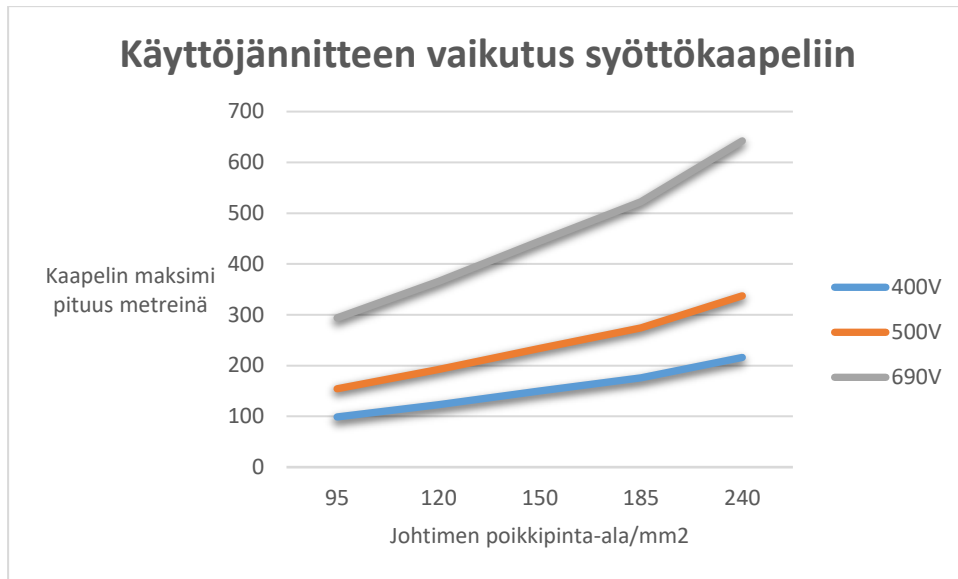
$$I_{k3max} = \frac{1.05 * 410V}{\sqrt{3} * 0,0237\Omega} = 10487A$$

6 Suunnittelun vaikutukset kokonaisuuteen

6.1 Käyttöjännite

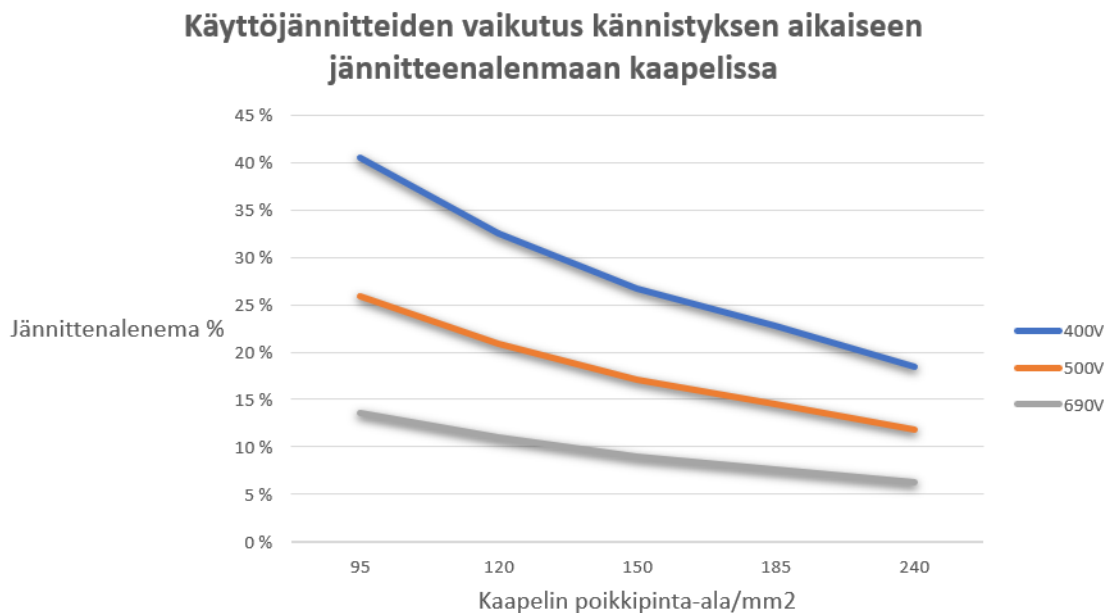
Käyttöjännitteellä on suuri vaikutus koneen suunnitteluun. Mitä suurempi jännite, sitä helpommalla suunnittelussa päästään. Harvoin on kuitenkin mahdollista vaikuttaa käytettävään jännitteeseen. Tapauksissa, joissa materiaalinkäsittelykoneen ajomatka on erittäin pitkä, voi olla tarpeen asentaa välimuuntaja ennen koneen syöttökaapelia. Tällä toimenpiteellä saadaan pudotettua jännitteenalenemia huomattavasti pienemmiksi. Lisäksi varsinkin suuritehoisilla moottoreilla varustettujen koneiden kanssa on lähes välttämätöntä käyttää 690V:n verkkoa tai keskijännitesyöttöä.

Suurempi jännite mahdollistaa tehokkaamman energiansiirron. Suurempi jännite pudottaa kaapelissa kulkevan virran määrää huomattavasti ja näin ollen on mahdollista käyttää ohuemman poikkipinnan omaavia kaapeleita. Ohuemman kaapelin käytöllä saadaan säästettyä kaapelin ja -kelan kustannuksissa. Mitä pienemmäksi materiaalinkäsittelykoneen käyttämä virta saadaan, sitä pienemmäksi muuttuvat myös jännitteenalenemat. Jännitteen nosto onkin paras ratkaisu tilanteissa, joissa kaapelikelan koko kasvaa liian suureksi ja käytön aikainen jännitteenalenema on liian suuri. Käyttöjännite vaikuttaa myös käynnistyshetken jännitteenalenemaan merkittävästi. Käyttöjännitteen vaikutukset ovat hyvin luettavissa kuvioissa 1 ja 2.



Kuvio 1. Käyttöjännitteen vaikutukset syöttökaapeliin.

Kuvioon on laskettu maksimikaapelipituudet eri poikkipinnan omaavilla kaapeleilla, kun käytönaikainen jännitteenalenema kaapelissa on 5 %. Kuormana on käytetty 250 kW tehoista sähkömoottoria.

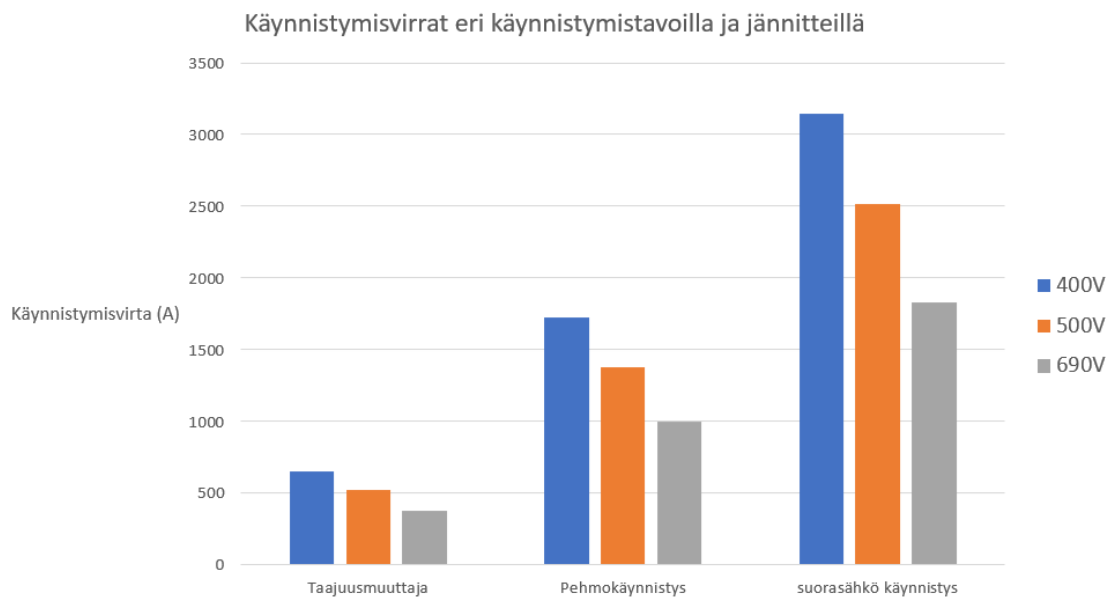


Kuvio 2. Käyttöjännitteiden vaikutus käynnistyksen aikaiseen jännitteenalennmaan kaapelissa.

Kuvioon 2 on laskettu käynnistysenaikaiset jännitteenalenemat eri poikkipinnan omaavilla kaapeleilla. Sähkömoottori on teholtaan 250 kW ja kaapelin pituus 200 m. Kuvioista on hyvin havaittavissa, kuinka paljon suurempi käyttöjännite helpottaa käynnistysajan aikaisen jännitteenaleneman hallitsemista.

6.2 Käynnistystapa

Käynnistystavalla voidaan helpoiten rajoittaa käynnistysenaikaista jännitteenalenemaa ja vaivattomasti leikata moottorin ottamaa virtaa käynnistystilanteessa. Käynnistystavan tarkastelu onkin tarpeen tilanteessa, jossa käytönaikainen jännitteenalenema on sallituissa rajoissa, mutta käynnistyksessä jännitteenalenema nousee liian suureksi. Eri käynnistystapojen vaikutukset virtaan on luettavissa kuvioista 3.

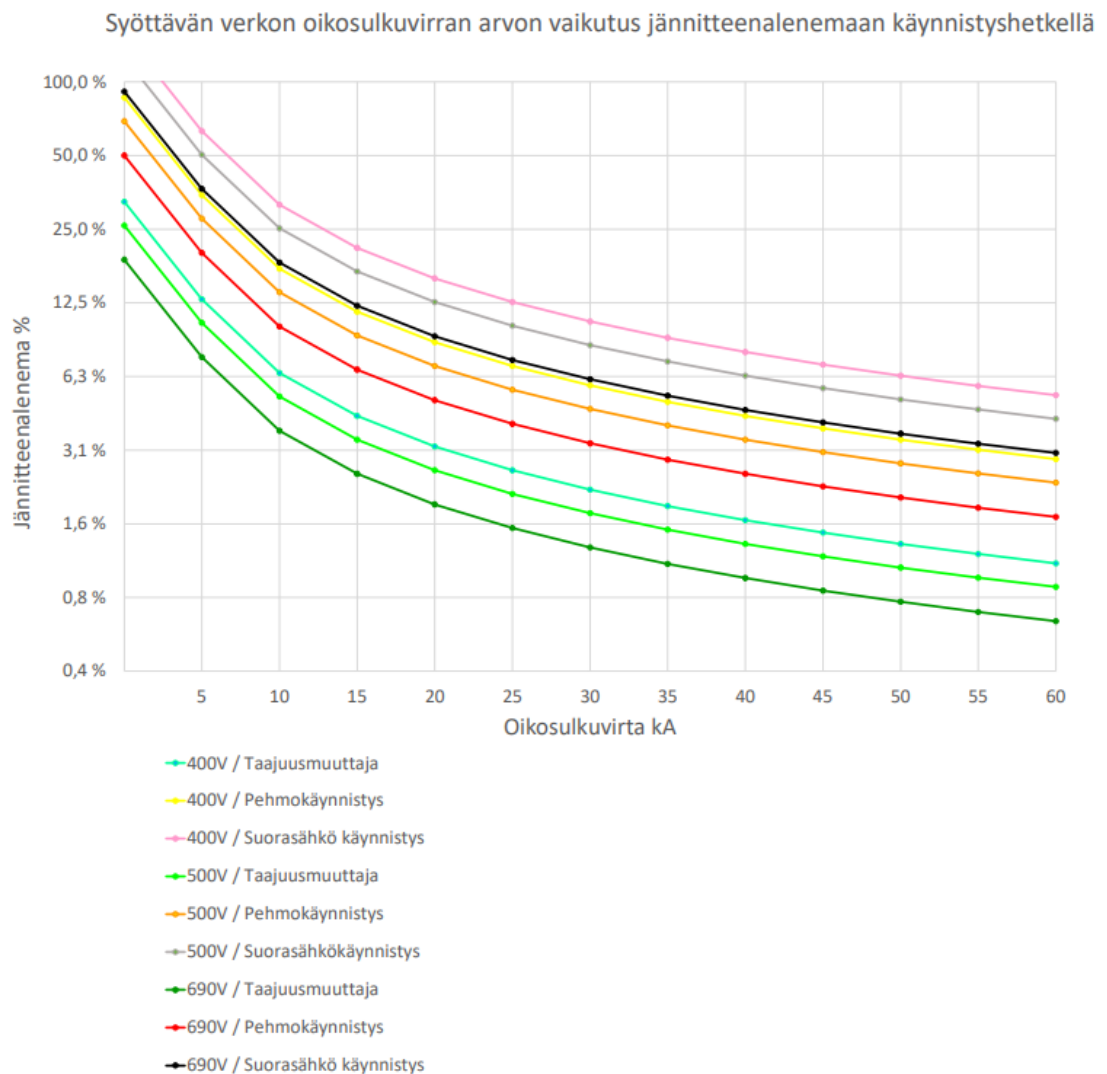


Kuvio 3. Käynnistysvirrat eri käynnistystavoilla ja jännitteillä.

Kuviossa 3 on esitetty käynnistymisvirrat eri käynnistystavoilla ja jännitteillä kun kuormana on 250 kW sähkömoottori.

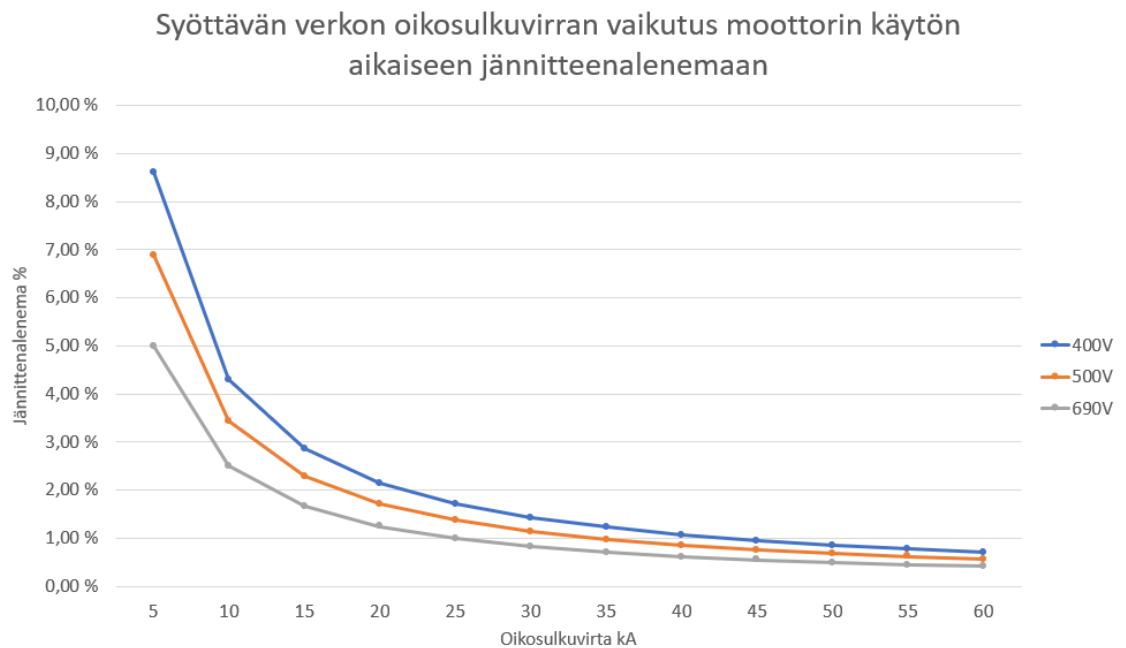
6.3 Syöttävä sähköverkko

Syöttävän sähköverkon vaikutuksia tutkiessa tulee keskittyä käynnistymisenaikaisen jännitteenaleneman muutoksiin. Käynnistysenaikainen jännitteenalenema määrittää suurimmaksi osaksi sähköverkolta vaadittavan oikosulkuvirran. Syöttävän verkon impedanssi on yleensä niin pieni, että käytönaikaiseen jännitteenalenemaan sillä on hyvin pieni vaikutus. Mikäli sähköverkolta vaadittava oikosulkuvirta nousee liian suureksi käynnistymisenaikaisen jännitteenaleneman vuoksi, on helpoin vaihtoehto vähentää jännitteenalenemaa muuttamalla käynnistämistapaa. Koneen vaikutuksia sähköverkkoon on esitelty kuvioissa 4 ja 5.



Kuvio 4. Syöttävän verkon oikosulkuvirran arvon vaikutus jännitteenalenemaan käynnistyshetkellä.

Kuviossa 4 on kuvattu syöttävän verkon oikosulkuvirran vaikutusta käynnistys- hetken jännitteenalennemaan. Kuormana toimii 250 kW:n tehoinen sähkömoottori. Kuviossa on esitetty eri käyttöjännitteiden ja käynnistystapojen vaikutukset.



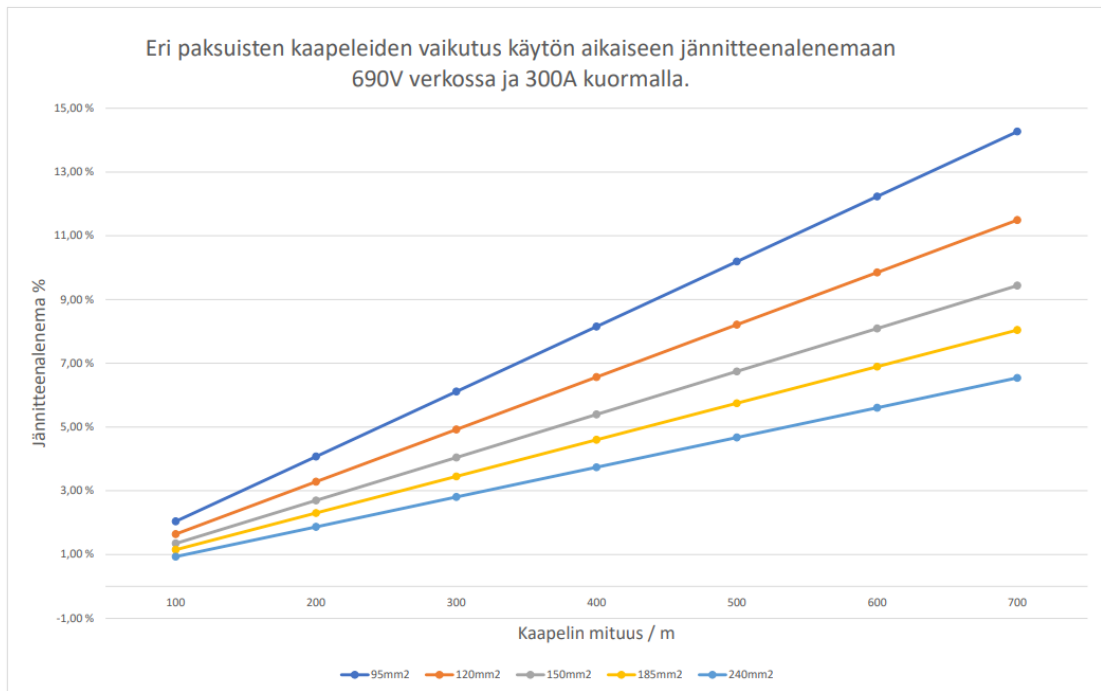
Kuvio 5. Syöttävän verkon oikosulkuvirran vaikutus moottorin käytönaikaiseen jännitteenalennemaan.

Kuvio 5 on esitetty oikosulkuvirran vaikutus käytönaikaiseen jännitteenalennemaan, kun käytössä on 250 kW:n tehoinen moottori. Kuvioista on hyvin havaittavissa, kuinka pieni oikosulkuvirran vaikutus on varsinkin 20 kA:n jälkeen. Oikosulkuvirran vaikutus tulisi siitä huolimatta tarkistaa aina käytönaikaista jännitteenalennemaa tarkasteltaessa.

6.4 Syöttökaapelin vaikutukset

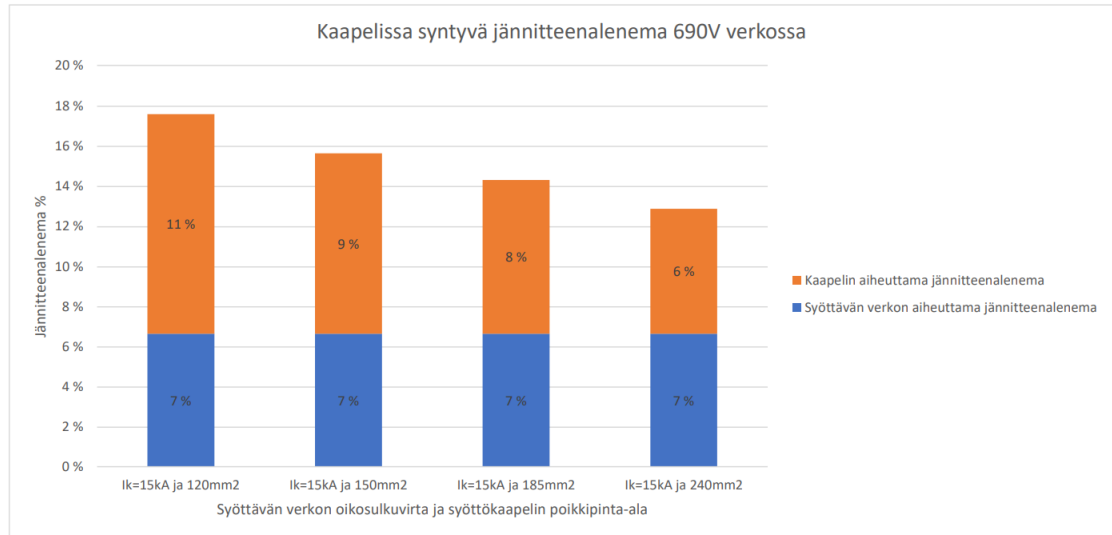
Syöttökaapelilla voidaan saada hieman lisää pelivaraa syöttävälle sähköverkolle. Syöttökaapelin vaikutukset käytönaikaiseen ja käynnistys- hetkellä tapahtuvaan jännitteenalennemaan ovat riippuvaiset kaapelin pituudesta ja poikkipinta- alasta. Yleensä ensimmäisenä kannattaa kokeilla mitoitusta ohuimmalla kaapelilla, jonka kuormitettavuus riittää käyttötarkoitukseen. Pitkän kaapelointimatkan johdosta voi kuitenkin olla tarpeellista kasvattaa poikkipinta- alaa. Lisäksi tulee tar-

kistaa oikosulkuvirran riittävyys pienimmällä oikosulkuvirralla ja kaapelin oikosulukesto lämpenemisen osalta. Kaapelin vaikutuksia jännitteenaleneisiin on tarkasteltu kuvioissa 6 ja 7. Kaapelin vaikutuksia pienimpään oikosulkuvirtaan on tarkasteltu kuvioissa 8, 9 ja 10.



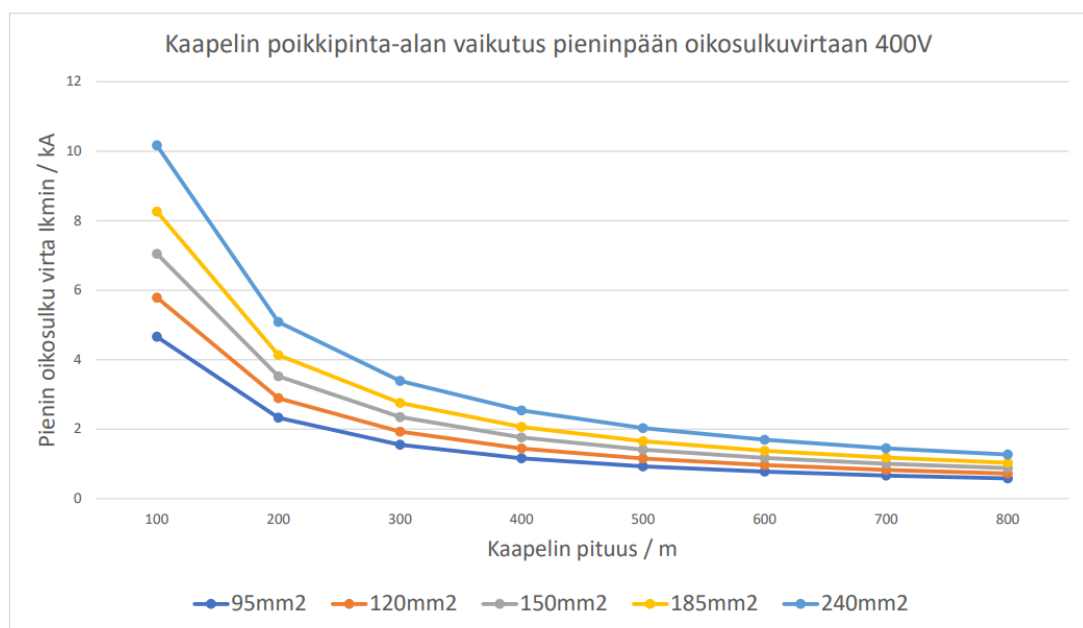
Kuvio 6. Eripaksuisten kaapeleiden vaikutus käytönaikaiseen jännitteenaleneeseen 690 V verkossa ja 300 A kuormalla.

Kuviosta 6 voidaan tulkita kaapelin poikkipinta-alan vaikutus jännitteenaleneeseen. Mitä pidempi kaapelointimatka on, sitä paksumpi kaapeli on valittava, ettei jännitteenaleneema nousisi liian korkeaksi.

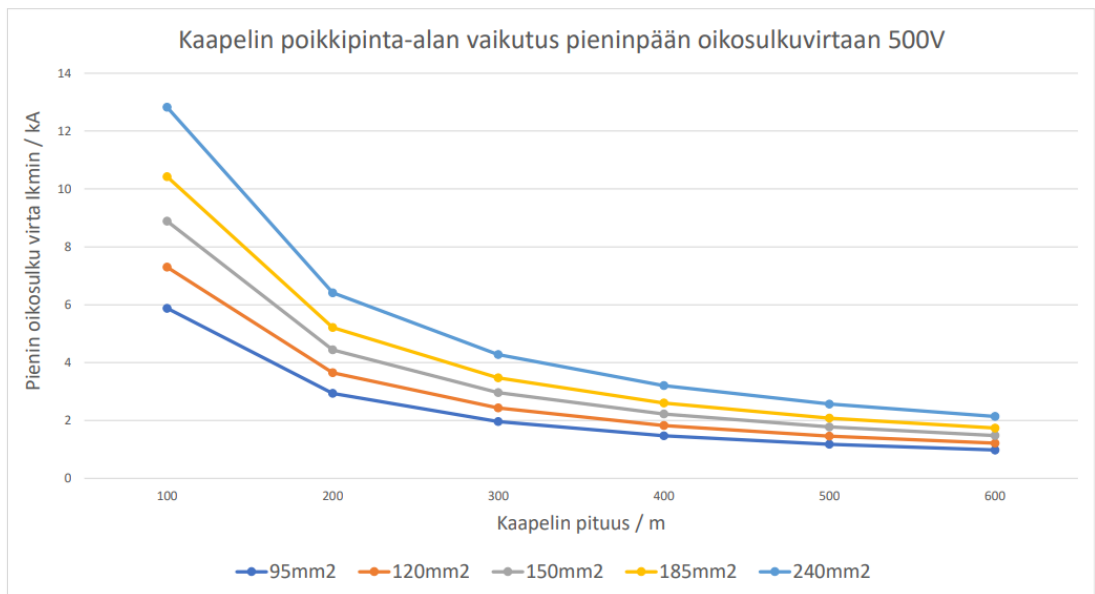


Kuvio 7. Kaapelissa syntyvä jännitteenalenema 690 V verkossa.

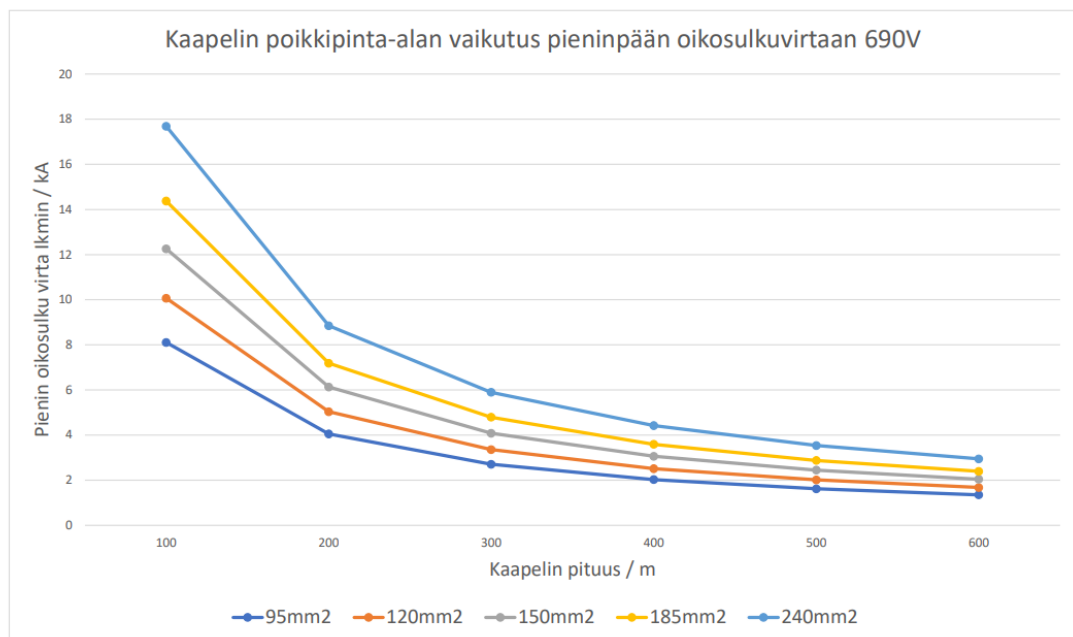
Kuviossa 7 on esitetty 690 V/250 kW sähkömoottorin käynnistysaikainen jännitteenalenema moottorin liittimissä pehmokäynnistyksessä. Moottori on kytketty verkkoon, jonka oikosulkuvirta syöttöpisteessä on 15 kA. Kaapelin pituus on 200 m. Kuviossa on esitetty kuinka paljon kaapelin poikkipinta-ala vaikuttaa käynnistyksessä tapahtuvaan jännitteenalenemaan. Mikäli moottorin liittimissä tapahtuva jännitteenalenema halutaan rajata 15 %:iin, voidaan kaaviosta tulkita, ettei se onnistu 120 mm² tai 150 mm² kaapelilla, vaikka sen kuormitettavuus riittäisikin. Kyseisessä tapauksessa jännitteenaleneman vuoksi tulisi valita 185 mm² kaapeli.



Kuvio 8. Kaapelin poikkipinta-alan vaikutus pienimpään oikosulkuvirtaan 400 V verkossa.



Kuvio 9. Kaapelin poikkipinta-alan vaikutus pienimpään oikosulkuvirtaan 500 V verkossa.



Kuvio 10. Kaapelin poikkipinta-alan vaikutus pienimpään oikosulkuvirtaan 690 V verkossa.

Ylläolevissa kuvioissa 8, 9 ja 10 on esitetty kaapelin poikkipinta-alan vaikutuksia pienimpään oikosulkuvirtaan. Kuvioiden muodoista näkee selkeästi vaikutuksien olevan samanlaisia eri käyttöjännitteillä. Huomioitavaa on virran suuruus eri käyttöjännitteillä. Esimerkiksi 200 metriä pitkän 95 mm^2 kaapelin oikosulkuvirta on 400 V verkossa n. 2,3 kA ja 690 V verkossa jo n. 4 kA. Oikosulkuvirta muodostuukin herkemmin ongelmaksi pienemmillä käyttöjännitteillä. Mikäli oikosulkuvirta on arvoltaan liian pieni, voi olla tarpeellista kasvattaa kaapelin poikkipinta-alaa oikosulkuvirran kasvattamiseksi.

6.5 Vaikutuksien ja ongelmien huomioiminen suunnittelua tehdessä

Suunnittelua tehdessä voi useassa vaiheessa tulla ongelmatilanne, jossa esimerkiksi jännitteenalenema nousee liian korkeaksi. Käsitellään seuraavaksi muutamia tilanteita ja miten ne voidaan ratkaista erilaisilla suunnitteluvalinnoilla.

Tilanne, jossa moottorin käytön aikainen jännitteenalenema kaapelissa nousee liian suureksi, voi tapahtua esimerkiksi pitkän ajomatkan takia. Kyseisessä tilanteessa on kaksi vaihtoehtoa. Ensimmäinen vaihtoehto on nostaa koneensyöttökaapelissa kulkevaa jännitettä korkeammaksi, tämä on kuitenkin kustannuksiltaan kallis vaihtoehto. Ainut tapa nostaa jännitettä olisi asentaa välimuuntaja, jolla koneeseen syötettävän sähkön jännitettä saataisiin nostettua. Toinen vaihtoehto on vaihtaa paksumpi syöttökaapeli. Yleensä jo seuraavaan kaapelin poikkipinta-alan siirtyminen riittää (kuvio 6). Mikäli jännitteenalenema on kuitenkin reilusti yli sallitun, jää käyttöjännitteen muutos ainoaksi vaihtoehdoksi.

Moottorin liittimissä syntyvän käynnistyshetken jännitteenaleneman ollessa liian suuri, on vaihtoehtoja useampi. Yksi vaihtoehdoista on nostaa syöttökaapelin poikkipinta-alaa suuremmaksi (kuvio 7). Kaapelimuutoksella saatava muutos on kohtuullisen pieni, mutta tämä voi riittää joissakin tapauksissa. Toinen vaihtoehto on muuttaa moottorin käynnistämistapaa. Käynnistymistavalla saadaan leikattua käynnistyshetken jännitteenalenemaa todella tehokkaasti (kuvio 3). Käynnistymistavan muutoksella on suuremmat vaikutukset kustannuksiin kuin syöttökaapelin koon muuttamisella. Lisäksi käynnistystavan muutos aiheuttaa muutoksia

koneen sisäisen sähköverkon rakenteeseen. Kolmantena vaihtoehtona on lisätä välimuuntaja ja nostaa syöttökaapelissa kulkevaa jännitettä.

Oikean tavan valinnassa tulee pohtia eri ratkaisujen vaikutuksia koneen kustannuksiin. Eri ratkaisujen kustannusvaikutukset ovat hyvin tapauskohtaisia, jonka vuoksi ratkaisut tulee tehdä konekohtaisesti.

Seuraavaksi tutkitaan tilannetta, jossa syöttävän sähköverkon jännite tippuu liikaa käynnistyshetkellä. Tähän ensisijaisena keinona on käynnistymistavan muuttaminen (kuvio 4). Tällä muutoksella saadaan yleensä aina jännitteenalenema leikattua tarpeeksi pieneksi.

Yksi vaihtoehto tilanteessa, jossa oikosulkuvirta on liian matala eikä poiskytkennän ehdot toteudu kahvasulakkeella, on vaihtaa etukojeen tyyppiä esimerkiksi kompaktikatkaisijaksi. Oikosulkuvirtaa saadaan lisäksi helposti lisättyä tarpeen vaatiessa kaapelin poikkipinta-alaa kasvattamalla (kuviot 8,9 ja 10).

Syöttävän verkon aiheuttaessa liikaa jännitteenalenemaa, tulee erityisesti tarkastella syöttävän verkon tehon riittävyys. Voi olla mahdollista, että suunniteltu kone on yksinkertaisesti liian iso kyseiseen sähköverkkoon. Vaihtoehdoiksi tällöin jää vaihtaa kone pienempään tai vaihtaa sähköverkon liityntäpistettä suuremman muuntajan syöttämään verkkoon.

7 Pohdinta

Työn tarkoituksena oli tutkia Mantsinen Group Ltd Oy:n valmistamien sähkökäyttöisten materiaalinkäsittelykoneiden vaikutuksia syöttävään sähköverkkoon. Työssä pyrittiin löytämään ratkaisu siihen, kuinka koneen syöttökaapeli ja käynnistystapa tulee suunnitella, jotta kone käynnistyy ongelmitta. Työ keskittyi erityisesti konetta syöttävän kaapelikelan vaikutusten tutkimiseen, sekä koneen käynnistymisen aiheuttamiin vaikutuksiin syöttävässä sähköverkossa. Mantsisen valmistamat materiaalinkäsittelykoneet ovat sähkötekniikan puolella erikoistapauksia. Erityisesti konetta syöttävä kaapelikela luo monia eri haasteita tavallisen

moottorilähdön mitoittamiseen verrattuna. Lisähaasteita tuo myös se, että koneita toimitetaan ympäri maailmaa, jolloin niiden käyttöolosuhteet vaihtelevat paljon. Työssäni sainkin paljon apua ohjaavalta suunnittelijalta, joka auttoi pääsemään sisään koneiden toimintaan ja neuvoi aina erilaisia ongelmia kohdatessa.

Opinnäytetyössä käytetty teoria pohjautui hyvin vahvasti teollisuuspuolen sähkömoottorikäyttöjä koskettaviin lähteisiin. Lisäksi työssä perehdyin standardeihin, jotka ohjaavat materiaalinkäsittelykoneiden säädöksiä. Erityisesti pääsin syventymään sähkömoottoreiden erilaisten käyttövariaatioiden ominaisuuksiin ja toimintaan. Työssäni kävin läpi kaikki suurimmat sähkömoottorin vaikutukset, jotka vaikuttivat erityisesti syöttökaapelin valintaan ja syöttävään sähköverkkoon.

Haasteita tuotti käsiteltävän aiheen laajuus. Kokonaisuuteen vaikuttavia tekijöitä oli todella paljon, minkä vuoksi jokaista aihealuetta ei tyhjentävästi tähän yhteen opinnäytetyöhön saanut sisällytettyä. Opinnäytetyössä onkin käsitelty juuri suurimmat tekijät ja niiden vaikutukset sillä tarkkuudella, mikä kyseisessä käyttötarkoituksessa on riittävä. Työstä saaduista tuloksista on hyvin havaittavissa, kuinka suurimmat sähkötekniset tekijät vaikuttavat suunnitteluprosessiin.

Työssä pääsin haastamaan itseäni reilusti ja myös uutta tietoa tuli opiskeltua runsaasti. Työn laajuus oli opettavassa mielessä todella hyvä asia. Pääsin syventämään osaamistani sähkömoottoreihin todella paljon. Työssä käsitellyistä asioista moni on myös rinnastettavissa esimerkiksi normaaleihin teollisuuden sähkömoottorikäyttöihin. Lisäksi työ opetti hahmottamaan, sekä käsittelemään sähkömoottorin ja sitä syöttävän verkon toimintaa kokonaisuutena laajemmin, mihin olin aiemmin tottunut. Näistä taidoista on varmasti hyötyä monissakin eri sähkömoottoreihin liittyvissä suunnittelutehtävissä.

Lähteet

1. Mantsinen Group Ltd Oy. <https://www.mantsinen.com/fi/> 20.1.2021.
2. Aura, L & Tonteri, A. 1996. Sähkökoneet ja tehoelektronikan perusteet. Porvoo:WSOY.
3. Ruppa, E & Lilja, T. 1996. Sähkötekniikkaa sivuaineopiskelijoille. Helsinki:Hakapaino Oy.
4. ABB Oy. 2004. DriveIT, Pienjännitteiset vakiomootorit. <https://library.e.abb.com/public/f99be400a43336a8c1257b130056f076/Drive%20IT%20pienjannitteise%20vakiomootorit%20FI%2010-2004.pdf>. 14.2.2021.
5. ABB Oy. 2011. Pehmökäynnistin opas. https://library.e.abb.com/public/d11f99611045fef8c125796e00473a8a/OPAS%20Pehmokaynnistys%20FI12_01.pdf. 14.2.2021.
6. ABB Oy. 2001. Tekninen opas numero 7. https://library.e.abb.com/public/b11dafa92973be93c1256d2800415027/Tekninen_opasnro7.pdf. 14.2.2021.
7. Aura, L & Tonteri, A. 1996. Teoreettinen sähkötekniikka. Porvoo:WSOY.
8. Korpinen, L. 2008. Sähkövoimatekniikkaopus. http://www.leenakorpinen.fi/archive/svt_opus/10sahkokoneet_1osa.pdf. 14.2.2021.
9. Cavotec. 2007. Flexible power and control cables. <https://pdf.directindustry.com/pdf/cavotec/cables/15903-170594.html#open>. 20.2.2021.
10. Sähköinfo Oy. 2017. Ohjeita kiinteistöjen enintään 1000V johtojen mitoituksesta ja suojauksesta.
11. Sähköinfo Oy. 2019. ST-30 käsikirja.
12. SFS-EN 60204-1:2018 standardi. Koneturvallisuus. Koneiden sähkölaitteisto. Osa 1: Yleiset vaatimukset.
13. Sähköinfo Oy. 2017. D1-Käsikirja. Helsinki:Painokurki Oy.
14. ABB Oy. 2021. Low voltage General performance motors, Global, EN 02-2021. <https://search.abb.com/library/Download.aspx?DocumentID=9AKK108196&LanguageCode=en&DocumentPartId=&Action=Launch>. 16.2.2021
15. ABB Oy. Pienjännitekojeet. https://library.e.abb.com/public/a7a3361674eef372c12572d500670426/OF2FI2004_01.pdf 20.2.2021

