

ERISTYSLINJAN RUUVIPURISTIMIEN SÄHKÖKÄYTTÖ- JEN MODERNISOINTI

Salmela Jari

Opinnäytetyö

Sähkö- ja automaatiotekniikka
Insinööri

2023

Sähkö- ja automaatiotekniikka
Insinööri (AMK)

Tekijä	Jari Salmela	Vuosi	2023
Ohjaaja(t)	Ins. (YAMK) Kari Kenttä		
Toimeksiantaja	Prysmian Group Finland Oy Ins. Matti Arvola		
Työn nimi	Eristyslinjan ruuvipuristimien sähkökäyttöjen modernisointi		
Sivumäärä	52 + 2		

Työn lähtökohtana oli Prysmian Group Finland Oy:n Pikkalan tehtaan eristyslinjan käyttövarmuuden parantaminen sekä eristyslinjan ekstruusioprosessin ruuvipuristimien sähkökäyttöjen huoltotarpeen optimointi ja energiatehokkuuden parantaminen. Työn tavoitteena oli mitoittaa korvaavat sähkökäytöt ja laatia kustannusarviot investoinneista takaisinmaksuaikoinen. Vaihtoehtoina korvaaviksi moottoreiksi oli oikosulku- tai tahtireluktanssimoottori.

Työssä tutkittiin ekstruusioprosessin toimintaa ja sen asettamia vaatimuksia sähkökäyttöille. Työssä selvitettiin tasavirta-, oikosulku ja tahtireluktanssimoottorikäyttöjen vahvuuksia ja heikkouksia sekä vertailtiin niitä keskenään. Työssä selvitettiin myös vaihtosähkömoottoreiden säätömenetelmiä ja käyttösovelluksia. Moottorien mitoituksen periaatteita tutkittiin kiertokenttäkoneiden osalta.

Investointien kustannusarvioita varten mitattiin nykyisten sähkökäyttöjen ottamat sähköiset tehot sekä selvitettiin niiden nimellisarvot. Näiden perusteella selvitettiin sähkökäyttöjen hyötysuhteet. Investointien takaisinmaksuaikojen arviointia varten selvitettiin korvaavien sähkökäyttöjen hyötysuhteet nykyisten sähkökäyttöjen vastaavissa kuormitustilanteissa ABB:n Ecodesign -palvelusta. Kustannusarviota varten laadittiin ja lähetettiin tarjouspyyntö sähkökäyttöistä.

Työn keskeiset tavoitteet saavutettiin ja sähkökäyttöjen mitoitus sekä investoinnin kustannusarviot saatiin laadittua. Modernisoitavien sähkökäyttöjen energiatehokkuuden parantamiseksi keksittiin kehitysideoita.

Avainsanat sähkömoottorit, sähkökäytöt, taajuusmuuttajat, ekstruusioprosessi.

Electrical engineering
Bachelor of engineering

Author	Jari Salmela	Year	2023
Supervisor(s)	Kari Kenttä, M.Eng.		
Commissioned by	Prysmian Group Finland Oy		
Title	Matti Arvola, B.Eng. Modernization of the Electrical Drives of the Insulation Lines Extruders		
Number of pages	52 + 2		

The basis of the thesis was to improve the dependability of the insulation line of Prysmian Group Finland Oy's Pikkala plant, as well as to optimize the need for maintenance of the electrical drives of the extruder of the insulation lines extrusion process and to improve energy efficiency. The goal of the thesis was to size electrical drives and make cost estimates for investments with payback periods. Alternatives for replacement motors were induction or synchronous reluctance motors.

The thesis investigated the operation of the extrusion process and the requirements it sets for electrical drives. In the work, the strengths and weaknesses of DC, induction and synchronous reluctance motor drives were investigated and compared to each other. In the work, the control methods and operating applications of AC motors were also investigated. The principles of engine sizing were studied for rotating field machines.

For the cost estimates of the investments, the electrical powers taken by the current electrical drives were measured and their nominal values were determined. Based on these, the efficiency ratios of electric drives were determined. In order to evaluate the payback times of the investments, the efficiencies of the replacement electric drives in similar load situations of the current electric drives were studied from ABB's Ecodesign service. For the cost estimate, a request for quotation for electrical drives was prepared and sent.

The main goals of the thesis were achieved and the dimensioning of the electrical drives and cost estimates of the investment were prepared. Development ideas were invented to improve the energy efficiency of modernized electric drives.

Keywords electric motors, electric drives, variable-frequency drive, extrusion process.

SISÄLLYS

1	JOHDANTO	7
2	PRYSMIAN GROUP FINLAND OY	8
3	EKSTRUUSIOPROSESSI	9
3.1	Prosessin kuvaus.....	9
3.2	Ruuvipuristin	11
4	SÄHKÖKONEET	13
4.1	Sähkömoottoreiden tehohäviöt	14
4.2	Sähkömoottoreiden käyttötavat	15
4.3	Tasavirtamoottorin rakenne	15
4.4	Oikosulkumoottori	18
4.5	Tahtireluktanssimoottori.....	20
4.5.1	Toimintaperiaate.....	21
4.5.2	SynRM verrattuna oikosulkumoottoriin.....	23
4.6	Kentänheikennys	25
4.7	Hyötysuhdeluokitukset.....	25
5	SÄÄDETYT SÄHKÖKÄYTÖT	26
5.1	Tasavirtakäyttö	27
5.2	Taajuusmuuttajakäyttö.....	28
5.2.1	Taajuussäätö.....	28
5.2.2	Vuovektorisäätö.....	29
5.2.3	Suora vääntömomentin säätö	30
5.3	Käyttösovellukset.....	30
6	SÄHKÖKÄYTÖN MITOITUS	32
6.1	Kuormitustyyppit	34
6.1.1	Vakioteho	35
6.1.2	Neliöllinen momentti.....	35
6.1.3	Vakiomomentti.....	36
6.2	Taajuusmuuttajan mitoitus	37
6.3	Taajuusmuuttajan kytkentä ja oikosulkusuojaus	38
7	TYÖN TOTEUTUS	40

7.1	Nykyiset moottorikäytöt.....	40
7.2	Korvaavien moottoreiden mitoitus.....	43
7.2.1	EXT1	43
7.2.2	EXT2	44
7.2.3	EXT3	45
7.3	Investointien kustannusarviot ja takaisinmaksuajat	45
7.3.1	EXT1	46
7.3.2	EXT2	48
7.3.3	EXT3	50
8	POHDINTA.....	52
	LÄHTEET.....	54

KÄYTETYT MERKIT JA LYHENTEET

EXT1	ruuvipuristin 1
EXT2	ruuvipuristin 2
EXT3	ruuvipuristin 3
IM	oikosulkumoottori (induction motor)
SynRM	tahtireluktanssimoottori (synchronous reluctance motor)

1 JOHDANTO

Työssä tutkitaan Prysmian Group Finland Oy:n Pikkalan tehtaan eristyslinjan käyttövarmuuden parantamista modernisoimalla sen ekstruusioprosessin ruuvipuristimien sähkökäytöt. Työn tavoitteena on tutkia myös modernisaatiolla saatavaa energiatehokkuuden parantumista ja huoltotarpeen optimoitumista. Ekstruusioprosessissa kaapeliin puristetaan kolmella ruuvipuristimella eristävä vaippa vulkanoidusta polyeteenistä, johon on lisätty peroksidia. Työn alussa käsitellään ekstruusioprosessista yleisellä tasolla.

Teoriaosuudessa selvitetään työssä esiintyvien moottoreiden toimintaperiaatteet ja niiden väliset eroavaisuudet sekä heikkoudet ja vahvuudet. Tämän lisäksi teoriaosuudessa tarkastellaan säädettyjen sähkökäyttöjen säätömenetelmiä sekä niiden mitoituksen peruseriaatteita.

Työn toteutus -osiossa korvaavat moottorikäytöt mitoitetaan vanhojen moottoreiden nimellisarvojen perusteella. Tämän jälkeen lasketaan nykyisten tasavirtamoottorikäyttöjen hyötysuhteet mittaustulosten perusteella. Korvaavien moottorikäyttöjen hyötysuhteet nykyisten käyttöjen kuormitusta vastaavissa tilanteissa saatiin ABB:n EcoDesign-palvelusta. Investointien kustannusarvio laaditaan mitoitusten perusteella lähetetyn tarjouspyynnön pohjalta. Takaisinmaksuaika lasketaan tasavirtakäyttöjen hyötysuhteiden, tarjouspyynnön sekä Pikkalan tehtaan sähkötöiden johtajan arvioimien tasavirtamoottoreiden hiilihuoltokustannuksien ja uusittavien moottoreiden asennuskustannuksien avulla.

2 PRYSMIAN GROUP FINLAND OY

Prysmian Group -konserni on maailman johtava energia- ja telekaapeleiden sekä kaapelijärjestelmien toimittaja. Konsernilla on yli 100 tehdasta yli 50 eri maassa ja se työllistää noin 30 000 henkilöä. Prysmian Group on listattu Milanon pörssiin. Prysmian Groupilla on Suomessa kaksi tehdasta: Oulun Ruskossa ja Pikkalassa. Prysmian Groupin Pikkalan tehdas on merikaapeleihin erikoistunut osaamiskeskus. Merikaapeleiden ohella tehtaassa valmistetaan erikoiskaapeleita, pien-, keski- ja suurjännitekaapeleita. (Prysmian Group Finland Oy 2017b.)

Prysmian Group Finlandin Oy:n historia juontaa juurensa vuoteen 1912, kun Suomen Punomotehdas perustettiin. Vuonna 1917 perustettiin Suomen Kaapelitehdas Oy. Pikkalan tehtaan ensimmäinen tehdashalli valmistui vuonna 1961 Suomen Kaapelitehtaan toimesta. Suomen Kumitehdas Oy, Suomen Kaapelitehdas Oy ja Nokia Osakeyhtiö fuusioituivat Nokia Kaapeliksi vuonna 1967, jonka toimesta kaapelituotanto Oulun Ruskon tehtailla alkoi vuonna 1972. Vuonna 1995 Nokia Kaapelista tulee NK Cables. Vuonna 2000 Pirelli Cables and Systems osti voimakkaapeliliiketoiminnot NK Cablesilta. Vuonna 2003 NK cablesista tuli Draka NK Cables ja vuonna 2005 Pirelli Cables and Systemsista tuli Prysmian Cables and Systems. Prysmian Group syntyi vuonna 2011 Prysmianin ja Drakan fuusioituttua. Suomessa yhtiöt fuusioituivat vuonna 2012, jolloin syntyi Suomen suurimman kaapelivalikoiman omaava Prysmian Group Finland Oy. (Prysmian Group Finland Oy 2017b.)

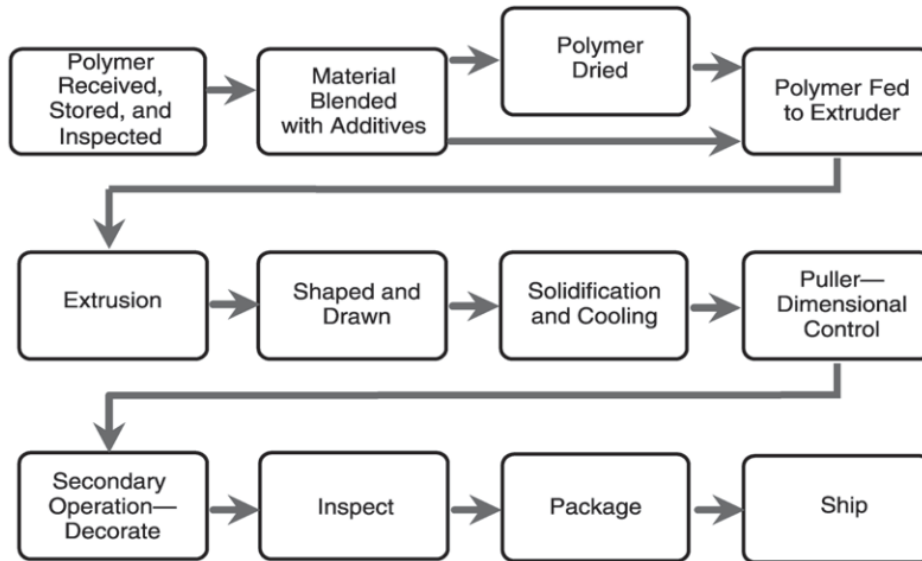
3 EKSTRUUSIOPROSESSI

3.1 Prosessin kuvaus

Polymeerimateriaalien ekstruusioprosessi eli suulakepuristaminen on ruuvipuristinkäyttöinen menetelmä, jolla muoviraaka-aine plastisoidaan eli saatetaan muovattavaan tilaan sulattamalla ja muotoillaan halutun muotoiseksi tuotteeksi jatkuvana prosessina suulakkeen läpi. Ruuvipuristin eli ekstruuderit sulattaa, kuljettaa ja homogeneroi muovirakeet. Ekstruusiolla valmistettavia tuotteita ovat esimerkiksi putket, kaapelit, tangot ja foliot. (Hietalahti 2013, 95.)

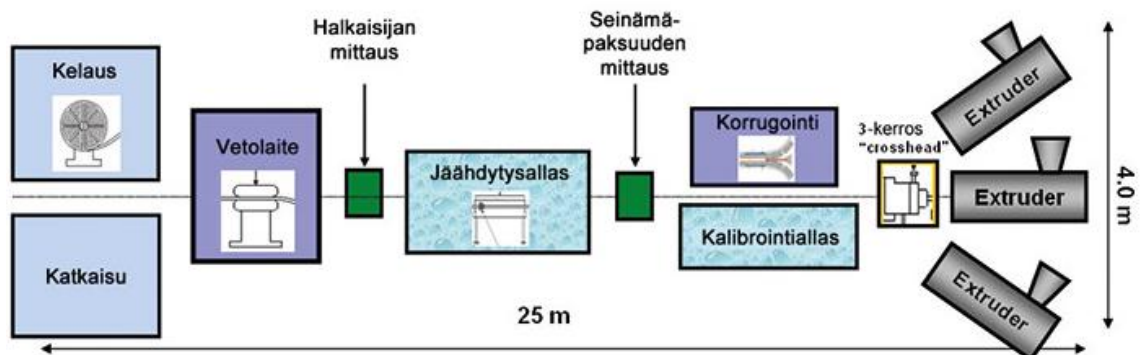
Ekstruusioprosessi on usean laitteen muodostama integroitu prosessi lopputuotteiden valmistamiseksi teollisiin- tai kuluttajasovelluksiin ja siinä ruuvipuristin käsittelee yhden osan koko linjaa. Joissakin prosesseissa tuotantolinjat ovat erittäin pitkiä ja niissä on lukuisia toimintoja. Prosessin toiminta voi vaatia operaattoreita kommunikoimaan ja työskentelemään yhdessä hyväksyttävän lopputuotteen aikaan saamiseksi. (Giles, Wagner & Mount 2005, 1.)

Tyypillisen ekstruusioprosessin prosessikaavio esitetään kuviossa 1. Ensimmäisenä polymeerimateriaali vastaanotetaan, tarkastetaan ja varastoidaan. Ennen ekstruusiota, polymeeri voidaan sekoittaa lisäaineiden kanssa halutun tuotteen ominaisuusprofiilin saavuttamiseksi. Näitä lisäaineita ovat esimerkiksi stabilointiaineet lämmön- tai UV-kestävyyden ja oksidatiivisen stabiilisuuden parantamista varten sekä väriaineet, palonestoaineet, täyteaineet, voiteluaineet ja vahvistukset. Jotkut polymeerihartsijärjestelmät on kuivattava ennen ekstruusiota, tällä esitetään kosteuden aiheuttama polymeerin hajoaminen. Kun polymeeri tai sekoitus on kunnolla kuivattu ja ainesosat sekoitettu, syötetään se ruuvipuristimeen, jossa se sulatetaan, sekoitetaan ja toimitetaan suuttimeen ekstrudaatin muotoilemiseksi. Lopuksi tuote jäähdytetään ja jähmetetään haluttuun muotoon sekä vedetään pois ruuvipuristimesta vakionopeudella sopivan poikkileikkauksen aikaan saamiseksi. Toissijaiset toiminnot, kuten polttokäsittely, painatus, leikkaus ja hehkutus voidaan tehdä linjassa vetolaitteen jälkeen. Lopuksi tuote tarkastetaan, pakataan ja lähetetään. (Giles ym. 2005, 1.)



Kuvio 1. Tyypillisen ekstruusioprosessin prosessikaavio (Giles ym. 2005, 1)

Kuviossa 2 esitetään tyypillinen ekstruusiolinja, jossa ensimmäisenä tulee ruuvipuristin ja suutin, joka muovaa profiilin. Tyypillisesti profiili hienosäädetään kalibrointialtaassa tai korrugointiyksikössä. Sitten profiili jäädytetään jäähdytysaltaassa, jotta se voidaan katkoa määrämittäisiin osiin tai kelata rullalle. Joissain prosesseissa täytyy käyttää useampaa ruuvipuristinta eli niin kutsuttu monikerrossuutinta, kun tehdään monikerrosprofiilia useammasta raaka-aineesta. (Bruder, U. 2016.)



Kuvio 2. Tyypillinen ekstruusiolinja (Bruder. 2016)

On tärkeää, että prosessin jokainen vaihe toimii suunnitellulla tavalla, koska jokainen prosessin vaihe tuo lisäarvoa. Tuote saavuttaa maksimiarvonsa linjan lopussa ja virheellinen asetus prosessin alussa voi aiheuttaa sen, ettei tuotetta voida hyväksyä linjan lopussa. Esimerkiksi jos ruuvipuristimen lämpötilaprofiili on

asetettu väärin, tuotteen ainesosia ei ole mitattu oikein, ruuvipuristimen syöttökurkun jäähdytys ei toimi kunnolla, virheellinen sulamislämpötila suulakepuristimen päässä, jäähdytysaltaan lämpötilaa ei ole asetettu oikein, vetolaite linjan lopussa kulkee väärällä nopeudella tai muulla tavalla virheellisen käyttötilan vuoksi tuote ei välttämättä täytä sille määriteltyjä vaatimuksia. (Giles ym. 2005, 1.)

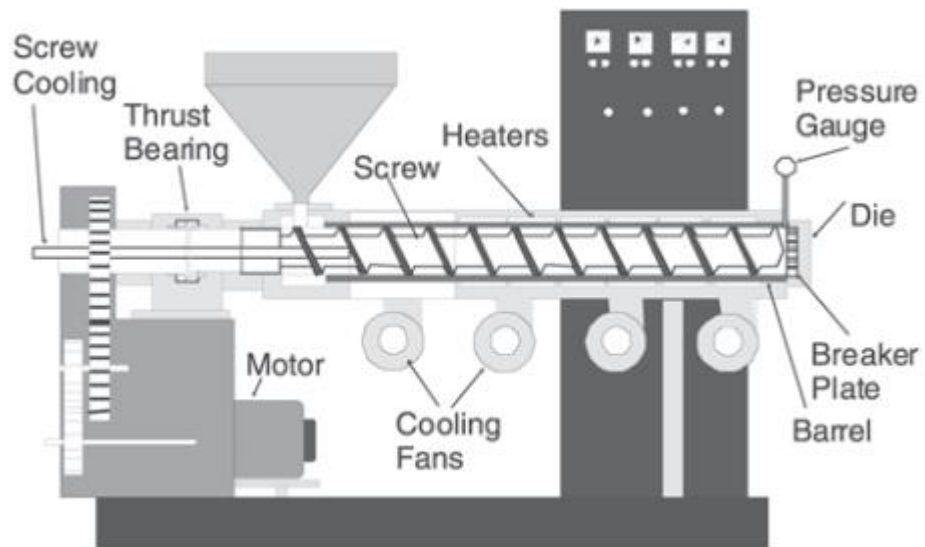
3.2 Ruuvipuristin

Ruuvipuristinta pyöritetään tyypillisesti säädettävällä sähkökäytöllä. Sen kuormitustyyppi vakiomomenttikäyttö eli sen momentti on vakio nopeuden funktiona. Tuotannon laatuun ja määrään pystytään vaikuttamaan ruuvipuristimen nopeutta säätämällä. (Hietalahti 2013, 95.)

Ruuvipuristimella on viisi erillistä tavoitetta ekstruusioprosessissa. Tavoitteiden täytyessä saadaan lopputuotteesta määriteltyjen vaatimusten mukainen. Nämä tavoitteet ovat oikea polymeerin sulamislämpötila, tasainen/vakio sulamislämpötila, oikea sulatuspaine suuttimessa, tasainen/vakio sulatuspaine suuttimessa ja homogeeninen, hyvin sekoitettu tuote. (Giles ym. 2005, 13.)

Kuviossa 3 esitetään ruuvipuristimen pääkomponentit, joita ovat voimansiirtojärjestelmä, joka tarkoittaa sähkökäytön, vaihteiston, vauhtipyörän ja painelaakerin muodostamaa kokoonpanoa. Toisena pääkomponenttina on syöttöjärjestelmä, ohjausjärjestelmä, pään ja suuttimen muodostama kokoonpano. Kolmantena pääkomponenttina on ruuvin, sylinterin ja lämmitysjärjestelmän muodostama kokoonpano. (Giles ym. 2005, 13.)

Syöttöjärjestelmä koostuu syöttösuppilosta, syöttökurku- ja ruuvinsyöttöosasta. Ruuvin, sylinterin ja lämmitysjärjestelmän muodostamassa kokoonpanossa kiinteä polymeerihartsi kuljetetaan eteenpäin, sulatetaan, sekoitetaan ja pumpataan suulakkeeseen. Ekstrudaatti kuljetetaan ja muotoillaan sovittimessa ja suulakkeessa. Ohjausjärjestelmä ohjaa ruuvipuristimen sähköisiä sisääntuloja ja valvoo laitteiston takaisinkytkentäilmukoita ohjaten koko prosessia muuttamalla automaattisesti syöttölaitteen asetuksia, vetolaitteen nopeuksia, ruuvin nopeuksia jne. tuotteelle vaaditun laadun aikaansaamiseksi. (Giles ym. 2005, 13.)



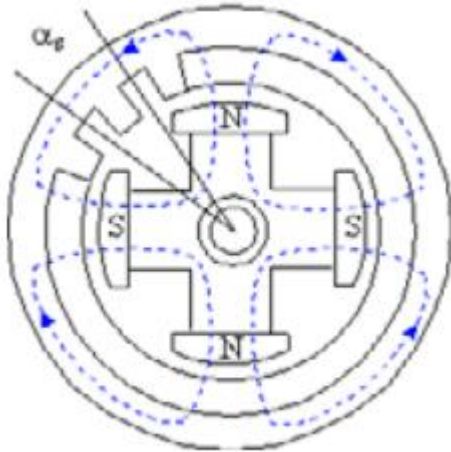
Kuvio 3. Ruuvipuristimen rakenne (Giles ym. 2005, 13)

4 SÄHKÖKONEET

Sähkökoneet muuttavat sähköenergian mekaaniseksi energiaksi toimiessaan moottorina ja ulkopuolisen voiman aiheuttaman mekaanisen energian sähköenergiaksi toimiessaan generaattorina. Useimmat koneet pystyvät toimimaan sekä moottorina että generaattorina.

Yleisimmät konetyypit ovat epätahti-, tahti- ja tasavirtakoneet. Konetyypit eroavat rakenteeltaan ja ominaisuuksiltaan toisistaan, mutta yleensä normaalirakenteisista koneista löytyy samat perusosat, kuten pyörivä roottori, johon koneen akseli on kiinnitetty ja on yleensä sisempi osa, staattori, laakerikilvet ja laakerit. Laakerikilvet ovat kiinni staattorissa ja laakerit, joiden varassa roottori on staattoriaukossa, on kiinnitetty laakerikilpiin. Yleensä staattorissa ja roottorissa on käämitykset riippuen konetyypistä. Jotta roottori voi pyöriä vapaasti, on staattorin ja roottorin välissä ilmapäli, joka pyritään tekemään mahdollisimman pieneksi, koska ilman magneettinen johtokyky on rautaa huonompi. (Korpinen 1998.)

Sähkökoneiden toiminta perustuu yleensä, joitain erikoistapauksia lukuun ottamatta, kuten tahtireluktanssikone, magneettikentän ja siihen altistuvan virrallisen johtimen välisiin voimavaikutuksiin. Käämitys, jossa varsinainen sähköteho kulkee, kutsutaan työvirta- tai staattorikäämitykseksi ja koneen toiminnalle välttämättömän magneettikentän luovaa käämitystä magnetointi- tai roottorikäämitykseksi. Käämitykset muodostava moottorin ilmapäliin parillisen napaluvun omaavan magneettikentän. Napaparin, joita voi olla useita, muodostavan pohjois- eli N-napa ja etelä- eli S-napa. Kuviossa 4 esitetään magneettivuon kulureitti. Magneettivuo kulkee staattorista roottoriin ja takaisin staattoriin. (Korpinen 1998.)



Kuvio 4. Sähkökoneen magneettivuon kulkureitti (Korpinen)

4.1 Sähkömoottoreiden tehohäviöt

Sähkömoottorit tuottavat tehohäviöitä johtuen käämityksissä syntyvistä virtalämpöhäviöistä ja rautarakenteessa syntyvistä hystereesi- ja pyörrevirtahäviöistä. Häviöt aiheuttavat moottorin lämpenemistä, minkä suhteen tasapainotilanne on saavutettavissa silloin, kun häviötehon tuotto on samansuuruinen kuin tehon siirtyminen ympäristöön. Häviöiden siirtyminen on suurempi, mitä suurempi lämpötilaero on moottorin ja ympäristön välillä. Häviöiden siirtymistä voidaan edesauttaa käyttämällä erilaisia jäähdytysrakenteita, kuten riparakennetta sekä tuulettusta parantamalla. Myös moottorin sisäisellä rakenteella on oleellinen merkitys, kuinka hyvin häviöteho siirtyy ympäristöön moottorin sisältä. (Hietalahti 2013, 29.)

Hietalahden mukaan moottorien lämpenemiskäyttäytymisestä voidaan olettaa moottorin virran olevan verrannollinen kuormituksen vaatimaan tehoon, moottorin häviöiden olevan verrannollisia virran neliöön ja sisäisen lämpenemän olevan verrannollinen häviöihin. Moottoreiden hyötysuhde ei kuitenkaan pysy vakiona, joten tämä pätee vain tietyssä osassa moottorin toiminta-alueella. Moottorin tyyppi ja käyttötapa määrittelevät todellisen kuormituksen ja häviöiden riippuvuuden. Hyötysuhteen kannalta moottoria on järkevintä käyttää mahdollisimman lähellä sen nimellisarvoja. (Hietalahti 2013, 29.)

4.2 Sähkömoottoreiden käyttötavat

Koska eri käytöt vaativat moottorilta erilaisia ominaisuuksia, on moottoreille määritelty normaalikäyttötavat. Normaalikäyttötavoilla helpotetaan moottoreiden sarjatuotantoa mahdollistaen moottoreiden valmistamisen mahdollisimman laajalle käyttöalueelle soveltuviksi. (Hietalahti 2013, 20.)

Sähkömoottoreiden käyttötavat ovat:

- S1 jatkuva käyttö
- S2 lyhytaikainen käyttö
- S3 ajoittainen käyttö, käynnistys ei vaikuta lämpenemiseen
- S4 ajoittainen käyttö, käynnistys vaikuttaa lämpenemiseen
- S5 ajoittainen käyttö, käynnisty ja jarrutus vaikuttavat lämpenemiseen
- S6 jatkuva käyttö, ajoittaiset kuormitusjaksot
- S7 keskeytymätön käyttö käynnistyksineen ja jarrutuksineen
- S8 keskeytymätön käyttö ja napavaihto
- S9 käyttö vaihtelevalla kuormalla ja nopeudella. (Hietalahti 2013, 20.)

S1-käyttötapa on yleisin käyttötapa ja samalla myös yksinkertaisin mitoituksen kannalta. Tällä käyttötavalla konetta saadaan kuormittaa nimelliskuormallaan jatkuvasti sekä sitä käynnistetään harvoin eikä se vaikuta koneen lämpenemiseen. Tässä työssä käsiteltävien ruuvipuristimien moottoreiden käyttötapa on myös S1.

4.3 Tasavirtamoottorin rakenne

Tasavirtamoottori on rakenteeltaan ja toiminnaltaan huomattavasti vaihtovirtamoottoreita monimutkaisempi. Monimutkaisesta rakenteesta ja kuluvista osista, kuten kommutaattori ja liukuharjat, johtuen se tarvitsee säännöllistä huoltoa ja on

vaihtovirtamoottoreita epäluotettavampi. Tasavirtamoottorit jaetaan magnetointikäännyksen perusteella sivu-, sarja- ja kompondimoottoreihin sekä erillismagnetoituihin moottoreihin. Työssä käsiteltävät moottorit ovat erillismagnetoituja tasavirtamoottoreita.

Tasavirtamoottorin rautaosat muodostavat magneettikentälle magneettipiirin. Koneen kehä ja napojen rautaosat tehdään täysraudasta, koska koneen magneettivuon muodostamat kentät ovat tasamagneettikenttiä. Ankkurin rautaosat tehdään sähkölevystä, sillä se joutuu pyörimään tasamagneettikentässä. Kuviossa 5 esitetään tasavirtamoottorin aktiiviset komponentit, jotka ovat ainakin osittain sähköisesti välttämättömiä kaikille tasavirtamoottoreilla. (Korpinen 1998.)

Kuviossa 5 esitettävät numeroidut komponentit ovat: 1. kehä, 2. päänavan rautasydän, 3. napakenkä, 4. käänönnavan sydän, 5. ankkurin rautasydän, 6. ankkurikäännyksitys, 7. sivuvirtakäännyksitys, 8. sarjavirtakäännyksitys, 9. käänönnapakäännyksitys, 10. kompensointikäännyksitys ja 11. kommutaattori harjoineen. (Korpinen 1998.)

Sivuvirta- ja sarjakäännyksysten tehtävänä on koneen toiminnalle välttämättömän magneettivuon eli pääkentän luominen koneeseen ja niitä kutsutaan tämän vuoksi magnetointikäännyksiksi. Ankkurikäännyksysten pyöriessä magnetointikäännyksysten luomassa magneettikentässä, siihen indusoituu kaavan 1 mukaisesti vaihtosähkömotorinen jännite. Koska indusoitunut jännite on vaihtojännitettä, on se tasasuunnattava generaattoreissa ja moottoreissa syöttävä tasajännite vaihtosuunnattava. Tästä toimenpiteestä vastaa mekaaninen vaihtosuuntaaja eli kommutaattori yhdessä liukuharjojen kanssa ja sitä kutsutaan kommutoinniksi. (Korpinen 1998.)

$$E = \frac{p}{a} s \frac{n}{60} \phi \quad (1)$$

missä

E	sähkömotorinen jännite
n	pyörimisnopeus
s	ankkurisauvojen lukumäärä
ϕ	on yhden navan magneettivuon

a on ankkurikäämin rinnakkaishaaraparien lukumäärä

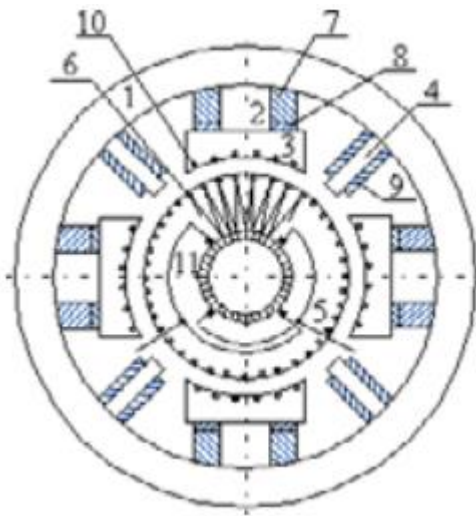
p on napaparien lukumäärä

(Korpinen 1998.)

Kääntönapakäämityksen tehtävän on saada kommutointi tapahtumaan kipinättömästi, liukuharjojen ja kommutaattorin huollon tarpeen vähentämiseksi. Kääntönapakäämitys pienentää myös ankkurivirran aiheuttamaa magneettikenttää eli se kytketään aina ankkurikäämityksen kanssa sarjaan. (Korpinen 1998.)

Kompensointikäämitys kompensoi eli kumoaa ainakin osittain ankkurikentän. Se sijoitetaan magneetti napojen uriin ja kytketään ankkurikäämityksen kanssa sarjaan. (Korpinen 1998.)

Tasavirtamoottoreista saadaan ominaisuuksiltaan erityyppisiä, riippuen mitä edellä mainittuja magnetointikäämityksiä koneessa on sekä miten niitä käytetään. (Aura & Tonteri 2009, 135.)



Kuvio 5. Tasavirtamoottorin aktiiviset rakenneosat (Korpinen 1998)

Kuormitettaessa tasavirtamoottoria sen roottorikäämityksessä kulkee roottorivirta I_a , joka synnyttää päänapojen pääkentälle φ poikittaisen ankkurikentän φ_a , jonka suuruus riippuu ankkurivirrasta I_a . Tätä kutsutaan ankkurireaktioksi. Erillismagneetoidussa ja sivuvirtamoottorissa tämä kenttien välinen voimavaikutus antaa moottorille vääntömomentin Kaavan 2 mukaisesti.

$$T = cI_a\phi \quad (2)$$

missä

c on konekohtainen vakio

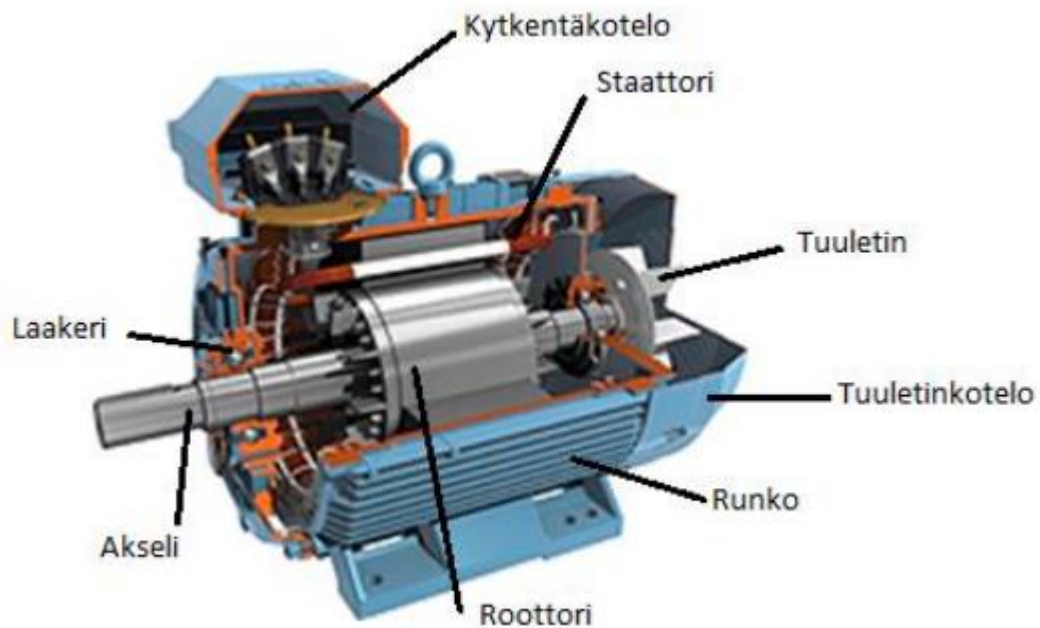
I_a on ankkurivirta

ϕ on magneettivuo

(Korpinen 1998.)

4.4 Oikosulkumoottori

Täysin umpinainen oikosulkumoottori on yleisin teollisuudessa käytetty sähkömoottorityyppi yksikertaisen rakenteensa, edullisuutensa ja kestävyytensä ansiosta. Kuviossa 6 esitetään oikosulkumoottorin rakenne. Sen pääkomponentit ovat rautalevystä tehty staattori ja sen urissa oleva käämitys sekä roottori, joka on staattorin sisällä oleva pyörivä osa, jonka urissa on käämitys.



Kuvio 6. Oikosulkumoottorin rakenne (Kortelainen. 2009)

Oikosulkumoottorissa sen sähköteho viedään roottorin käämityksille sähkömagneettisen induktion avulla ilman galvaanista yhteyttä. Roottorikäänitys rakennetaan yleensä eristämättömistä alumiinisauvoista, jotka yhdistetään roottorin päissä olevilla alumiinirenkailla häkkikäänitykseksi. Pyörivän staattorikentän vuoviivat leikkaavat roottorin käämityksen sauvoja, indusoiden niihin lähdejännitteen. Oikosuljettuihin roottorisauvoihin syntyy roottorivirta. Tästä syntyy voimavaikutus roottorivirran ja staattorikentän välille, mikä saa roottorin pyörimään, jos syntynyt vääntömomentti on pyörimistä vastustavaa kuormitusmomenttia suurempi. Roottorin pyörimisnopeuden kasvaessa leikkausnopeus staattorikentän ja roottorisauvojen välillä pienenee. Tällöin moottorin sähköinen vääntömomentti pienenee, koska lähdejännite ja virta pienenevät. Pyörimisnopeus kasvaa sellaiseen arvoon, jossa kuormitusmomentti ja moottorin sähköinen vääntömomentti ovat yhtä suuret. Oikosulkumoottorin roottori pyörii aina epätahdissa staattorikenttään nähden, jonka takia sitä kutsutaan myös epätähtikoneeksi. (Hietalahti 2013, 35.)

Magneettikentän kiertonopeuden eli tahtinopeus ja roottorin pyörimisnopeuden määrittää staattorin käämirakenne. Kehälle voidaan luoda yksi tai useampi napapari, joka riippuu käämityksen rakenteesta ja kytkennästä. Tahtinopeus saadaan laskettua napapariluvun ja verkon taajuuden suhteella seuraavasti:

$$n_s = \frac{60 \times f}{p} \quad (3)$$

missä

n_s	on	staattorikentän pyörimisnopeus
f	on	verkon taajuus
p	on	napapariluku

(Hietalahti 2013, 35.)

Koska oikosulkumoottori pyörii epätahdissa tahtinopeuteen nähden, sen todellinen pyörimisnopeus ilmastaan yleensä n_s jättämän avulla. Suhteellinen jättämä

tarkoittaa kuinka monta prosenttia roottorin nopeus tahtinopeutta pienempi. Suhteellinen jättämä voidaan laskea seuraavasti.

$$s = \frac{n_s - n_r}{n_s} \quad (4)$$

missä

s on suhteellinen jättämä

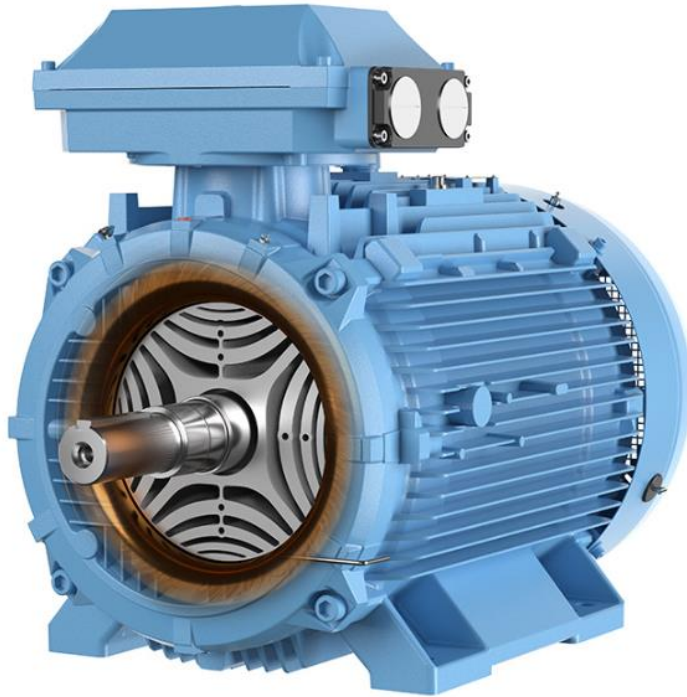
n_s on tahtinopeus

n_r on roottorin nopeus

(Korpinen 1998.)

4.5 Tahtireluktanssimoottori

Tahtireluktanssimoottori eli SynRM (Kuvio 7) on kolmivaiheinen vaihtosähkömoottori, joka on rakenteeltaan pääosin samanlainen kuin oikosulkumoottori. Sen roottori poikkeaa merkittävästi oikosulkumoottorin roottorista magneettisen epäsymmetriansa johdosta, johon myös sen vääntömomentin tuottaminen perustuu. SynRM roottori ei ole sähköisesti aktiivinen osa ja on lähes häviötön, koska se toteutetaan ilman kestopagneetteja tai käämityksiä. SynRM:n nimellisvirta on vastaavaa oikosulkumoottoria suurempi, mutta virta aiheuttaa virtalämpöhäviöitä ainoastaan staattorikäämityksessä, tästä syystä sen häviöt ovat vastaavaa oikosulkumoottoria pienemmät. Tämä tarkoittaa parempaa kuormitettavuutta erityisesti pienemmillä nopeuksilla, kuin vastaavalla oikosulkumoottorilla. SynRM ei sovellu suoraan käyttöön, vaan sitä käytetään vektorisäädetyllä taajuusmuuttajalla. (Hietalahti 2013, 60).



Kuvio 7. ABB:n SynRM -sähkömoottori (ABB 2021)

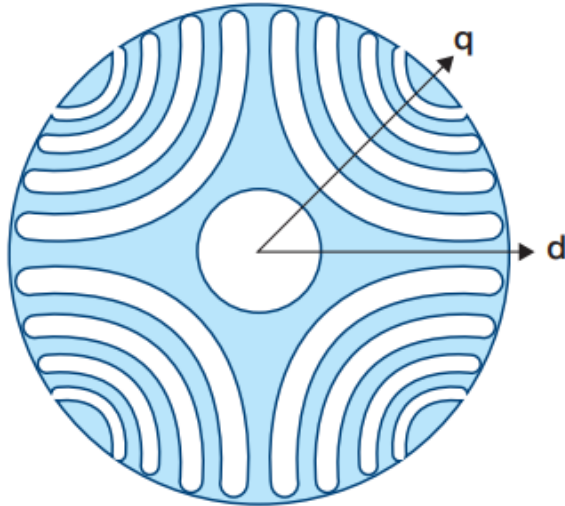
4.5.1 Toimintaperiaate

Permeanssin eli magneettisen johtavuuden käänteinen suure on reluktanssi, joka voidaan ilmaista käytännönläheisemmin magneettisena resistanssina. Reluktanssi on kääntäen verrannollinen induktanssiin, eli mitä suurempi reluktanssin arvo on, sitä matalampi on induktanssi ja päin vastoin. Kuviossa 8 esitetään nelinapaisen SynRM:n magneettiset akselit. Akselilla q on pienempi induktanssi kuin akselilla d . (ABB 2013.)

Näiden akselien välisen suhteen eli d/q -suhteen suuruus määrittelee pitkälti SynRM:n ominaisuudet, kuten vääntömomentin ja tehokertoimen. Mitä suurempi suhde on, sen paremmat ominaisuudet moottorilla on.

Staattorin kytkeydyttyä jännitteiseksi, syntyy roottorin ja staattorin ilmaväliin pyörivä magneettikenttä. Roottori pyrkii kohdistamaan sen magneettisesti johtavam-

man akselinsa eli d-akselin samansuuntaiseksi syntyneen kentän kanssa, pyrkivänsä minimoimaan magneettisen piirin reluktanssin. Vääntömomentti syntyy siis ilmavälissä, kun kentän ja d-akselin suunta, eivät ole linjakkain. (ABB 2013.)

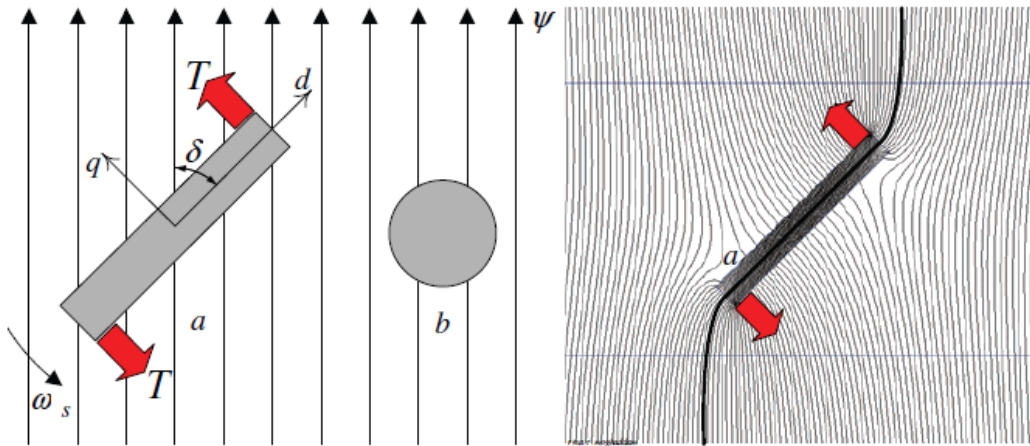


Kuvio 8. Nelinapaisen SynRM:n roottorin magneettiset akselit d ja q (ABB 2013)

SynRM hyödyntää siis vääntömomentin tuotannossa reluktanssikonseptia ja pyörivää sinimuotoista magnetomotorista voimaa. Kuvion 9 vasemmalla puolella esitetään reluktanssivääntömomentin tuotannon peruseräite. Kappale a on magneettisesti epäsymmetristä eli anisotrooppista magneettista materiaalia, jolla on geometriastaan johtuen erisuuruiset reluktanssit d-akselilla ja q-akselilla. Kappaleella b, joka symmetristä eli isotrooppista magneettista materiaalia on sama reluktanssi kaikkiin suuntiin. Kohdistuessaan kappaleeseen a magneettikenttä ψ tuottaa vääntömomentin, jos d-akselin ja kentän välillä on kulmaero. Kappaleeseen b vääntömomenttia ei synny. Kuvion 9 oikealla puolella nähdään, että jos kappaleen a d-akseli ei ole linjassa magneettikentän kanssa, aiheuttaa se kentän vääristymän. Tämän kentän vääristymän pääsuunta on linjassa kappaleen a q-akselin kanssa. (Moghaddam 2007, 3.)

SynRM:ssä magneettikenttä ψ tuotetaan oikosulkumoottorin tapaan sinimuotoisesti jaetulla käämityksellä uritetussa staattorissa ja se yhdistää staattorin ja roottorin pienen ilmaraon kautta oikosulkumoottorin tapaan. Kenttä pyörii synkronisella nopeudella ja sen voidaan olettaa olevan sinimuotoinen. Tässä tilanteessa tulee aina olemaan vääntömomentti, joka vähentää koko järjestelmän potentiaa-

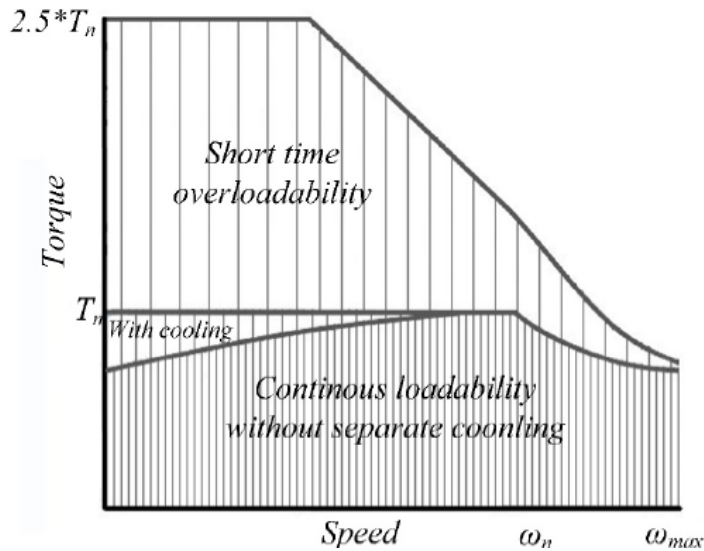
lienergiaa vähentämällä kentän vääristymää q-akselista. Pidettäessä kuormituskulma vakiona sähkömagneettinen energia muuttuu jatkuvasti mekaaniseksi energiaksi. Staattorin virta on vastuussa sekä magnetoinnin, että vääntömomentin tuottamisesta, joka pyrkii vähentämään kentän vääristymää, tämä voidaan tehdä ohjaamalla moottorin virran kulmaa. (Moghaddam 2007.)



Kuvio 9. Anisotrooppinen kappale a ja isotrooppinen kappale b magneettikentässä (Moghaddam 2007)

4.5.2 SynRM verrattuna oikosulkumoottoriin

Kuviossa 10 esitetään SynRM:n kuormitettavuuskäyrä, jossa vääntömomentti esitetään nopeuden funktiona. Käyrästä nähdään, että SynRM:lla on erittäin hyvä kuormitettavuus myös pienillä nopeuksilla ja erillisellä tuuletuksella sitä voidaan kuormittaa täydellä kuormalla jopa nolllanopeudella. Lisäksi sitä voidaan kuormittaa lyhyen aikaa 2,5 kertaa yli nimellisen momentin.

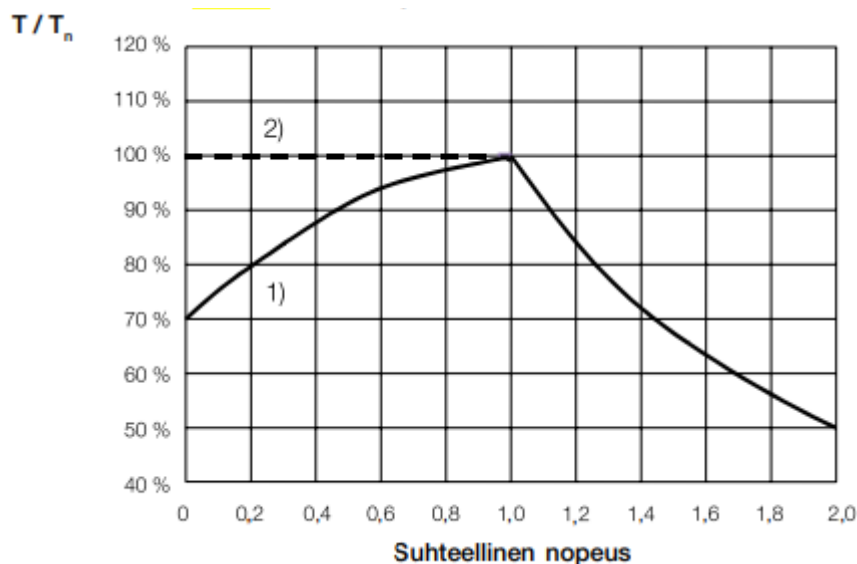


Kuvio 10. SynRM:n kuormitettavuus (Heidari ym. 2021)

Hyvän kuormitettavuuden lisäksi SynRM:n hyväksi puoliaksi voidaan mainita korkea hyötysuhde erityisesti osakuormituksella sekä hyvä luotettavuus, joka tarkoittaa esimerkiksi laakereiden ja käämitysten korkeampaa käyttöikää, jonka mahdollistaa jo aiemmin mainittu roottorihäviöiden ja niiden aiheuttaman lämpenevän puute. Lisäksi hyviä puolia ovat korkea ylikuormitettavuus, laaja nopeusalue ja kyky toimii erittäin suurilla nopeuksilla sekä korkea dynaaminen vaste moottorin pienen inertian ja pienen runkokoon suhteesta tehoon johdosta. SynRM:lla on myös oikosulkumoottoria suurempi tehotiheys ja suurempi vääntömomentti yhtä ampeeria kohti. Huonoina puolina voidaan mainita matala tehokerroin ja korkea vääntömomentin aaltoilu sekä se, että sitä ei voida kytkeä suoraan verkkoon vaan se tarvitsee aina taajuusmuuttajan. SynRM:lla on myös suhteellisesti oikosulkumoottoria suurempi nimellisvirta, joka tarkoittaa taajuusmuuttajan suurempaa nimellisvirtaa. Vaikka nimellisvirta on suurempi, häviöt eivät kuitenkaan ole suuremmat, koska virta aiheuttaa häviöitä vain staattorin käämityksessä. (Heidari ym. 2021.)

4.6 Kentänheikennys

Taajuusmuuttajalla syötetyn vaihtovirtamoottorin nopeusalueita, kun sen nopeus on alle nimellisen, kutsutaan vakiovuo- ja vakiomomenttialueeksi. Nopeuden ylittäessä nimellisen nopeuden, tätä nopeusalueita kutsutaan kentänheikennys- tai vakioitehoalueeksi. Tällä nopeusalueella teho voidaan pitää vakiona. Tällöin täytyy magneettikenttää heikentää, jotta jännitetaso ei kasva nimellistasoa korkeammaksi. Kentänheikennysalueella moottorin vääntömomentin tuotto pienene nopeuden kasvaessa, kuten Kuviosta 11 nähdään. (Hietalahti 2013, 35.)



Kuvio 11. Oikosulkumoottorin vääntömomentti nopeuden funktiona (ABB 2001c)

4.7 Hyötysuhdeluokitukset

Moottoreiden hyötysuhde kertoo sen kyvystä muuttaa sen ottama sähköteho mekaaniseksi tehoksi. Mitä suurempi hyötysuhdeluokka moottorilla on, sitä korkeampi sen hankintahinta on, koska korkeamman hyötysuhteen saamiseksi joudutaan moottorin valmistuksessa käyttämään enemmän materiaaleja. Yleensä korkeamman hyötysuhteen omaavan moottorin hankinta on kumminkin kannattavaa säästyneiden energiakustannusten johdosta. Hyötysuhdeluokkia on viisi, joista IE1 on pienin ja IE5 on suurin. (Hietalahti 2013, 28.)

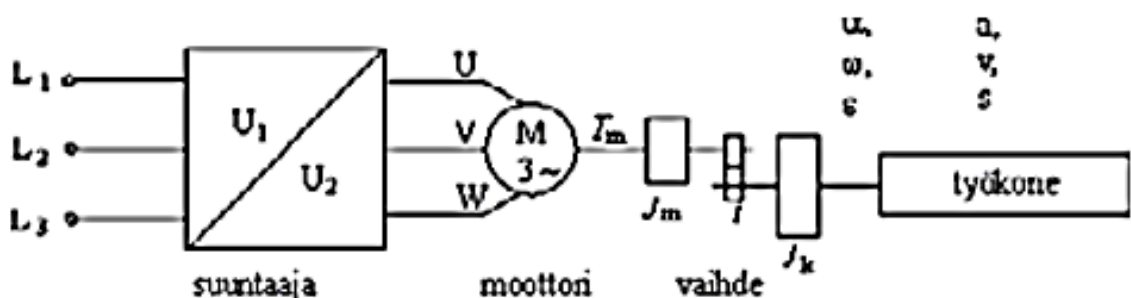
5 SÄÄDETYT SÄHKÖKÄYTÖT

Säädetyin sähkökäytön tehtävänä on säätää energian siirtymistä sähköverkosta prosessiin. Energia siirtyy prosessiin moottorin akselin kautta. Energian siirtoa säädetään moottorin momenttia tai nopeutta säätämällä. (ABB 2001a.)

Säädettäviin käyttöihin lasketaan servo- ja tasavirta- ja taajuusmuuttajakäytöt. Tässä luvussa käsitellään taajuusmuuttajakäyttöä ja tasavirtakäyttöä.

Tasavirtamoottorit ovat olleet alun perin käytössä säädetyissä sähkökäytöissä, niiden helpon nopeuden ja momentin säätöominaisuuksiensa takia ilman monimutkaista säätöelektroniikkaa. Tehoelektroniikan kehittyttyä on kuitenkin vaihtovirtamoottorit nousseet suosittumaksi edullisuutensa, yksinkertaisen rakenteensa ja vähäisemmän huollon tarpeen takia yltäen kumminkin yhtä tai lähes yhtä nopeaan momenttivasteeseen ja tarkkaan nopeuden säätöön tasavirtamoottorin kanssa. (ABB 2001a.)

Säädetty moottorikäyttö koostuu tyypillisesti Kuviossa 12 kuvatulla tavalla sähkömoottorista, kolmivaiheisesta sähkönsyötöstä, tehoelektroniikalla toteutetusta suuntaajalaitteesta, mahdollisesti moottorin ja työkonen välisestä vaihteesta kuormituksen vaatimuksista riippuen sekä työkonesta ja siihen liittyvästä prosessista. Kuviossa 12 esitetään myös tyypillisimmät suureet, joiden avulla voidaan sähkökäyttöä säätää. Näitä suureita ovat koneen kehittämä momentti T_m , lineaarisen liikkeen nopeus v ja pyörimisnopeus ω , kiihtyvyydet a tai α , paikka s sekä akselin asentokulma ϵ . Säädön toteutukseen vaikuttavat myös oleellisesti moottorin ja prosessin hitausmassa J_m ja J_k . (Korpinen 1998.)



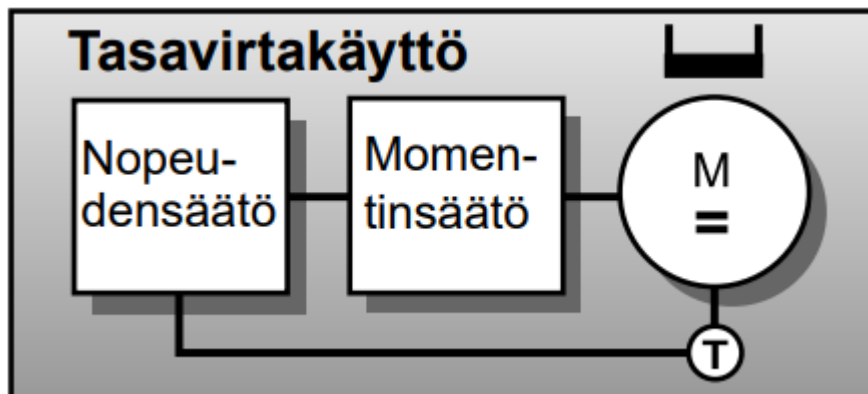
Kuvio 12. Sähkökäytön periaatteellinen rakenne. (Korpinen 1998.)

5.1 Tasavirtakäyttö

Tasavirtamoottorit ovat olleet ennen oikosulkumoottorikäyttöjen säätöominaisuuksien kehittymistä yleisin käyttömoottori sähkökäytöissä. Suosio johtuu niiden helposta säädettävyydestä sekä hyvästä ja tarkasta vääntömomentti- ja nopeusvasteesta. Nopeussäädön staattinen tarkkuus, riippuen käytettävästä pulssianturista on n. 0,01 % nimellinopeudesta ja dynaaminen tarkkuus n. 0,3 %. (Hietalahti 2012, 14.)

Tasavirtamoottorin nopeuden säätö toteutetaan yleensä ankkurijännitteen säädöllä sekä magnetointivirran pitämisenä vakiona, koska moottorin pyörimisnopeus on suoraan verrannollinen ankkuripiirin jännitteeseen. Jännitteen säätö tapahtuu tyristorisiltaa käyttämällä. Nopeuden oloarvo saadaan pulssianturilta takaisinkytkentätietona. Nopeuden ohjearvo saadaan esimerkiksi ohjearvoketjusta tai prosessista mitatuista suureista. Tasavirtamoottorin momentti on suoraan verrannollinen ankkuripiirin virtaan ja sitä säätämällä sekä pitämällä magnetointivirta vakiona, voidaan momenttia helposti säätää. Kuviossa 13 nähdään Tasavirtakäytön säätöpiirin periaatteellinen rakenne. (Hietalahti 2012, 14.)

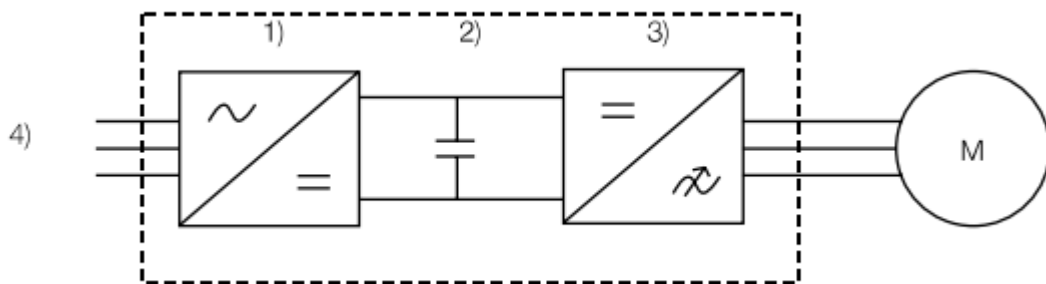
Tasavirtamoottorin huonona puolena on niiden säännöllinen huollon tarve, koska hiiliharjat ja kommutaattorit kuluvat käytössä. Huonoina puolina voidaan mainita myös nopeuden takaisinkytkennän ja ulkoisen jäähdytyksen tarve sekä korkeat hankintakustannukset, johtuen sen monimutkaisesta mekaanisesta rakenteesta. (Hietalahti 2012, 14.)



Kuvio 13. Tasavirtakäytön säätöpiirin rakenne (ABB 2001a)

5.2 Taajuusmuuttajakäyttö

Taajuusmuuttajakäyttö koostuu tyypillisesti syöttömuuntajasta tai sähkönsyötöstä, taajuusmuuttajasta, vaihtovirtamoottorista sekä kuormasta. Kuviossa 14 esitetään taajuusmuuttajan periaatteellinen rakenne. Taajuusmuuttaja koostuu 1) tasasuuntaajasta, 2) tasajännitevälipiiristä, 3) vaihtosuuntaajasta ja 4) sähkönsyötöstä. (ABB 2001b.)

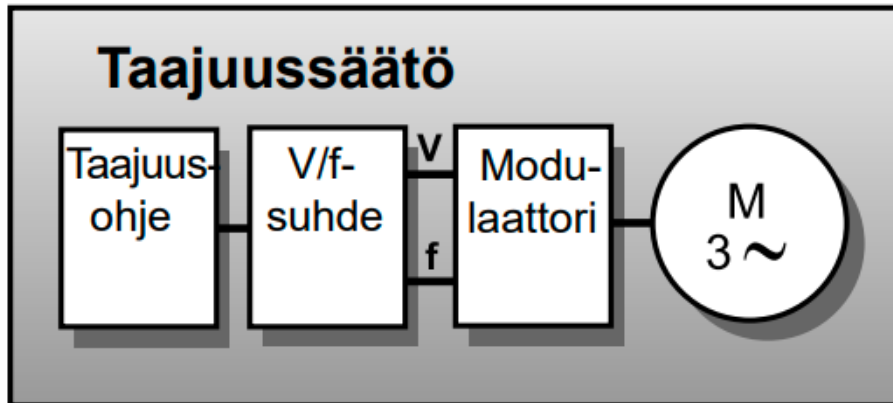


Kuvio 14. Taajuusmuuttajan periaatteellinen rakenne (ABB 2001c)

5.2.1 Taajuussäätö

Taajuus- eli skalaarisäätö perustuu moottorin staattorille syötettävän jännitteen ja taajuuden muuttamiseen. Taajuussäädössä hyödynnetään pulssileveysmodulaatiota (Pulse Width Modulation, PWM), jossa PWM-modulaattorille syötetään taajuus- ja jänniteohje ja se syöttää simuloidun vaihtovirran siniaallon moottorin käämille. Kuviossa 15 esitetään taajuussäädön säätöpiirin periaatteellinen rakenne. (ABB 2001a.)

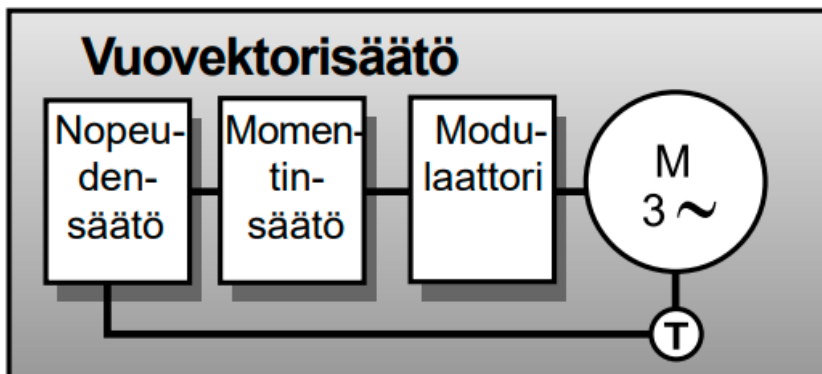
Taajuussäätö on takaisinkytkemätön eli siinä ei hyödynnetä moottorin akselilta mitattua nopeutta eikä asentotietoa. Koska moottorin tilaa ei säädössä huomioida, se ei sovellu sovelluksiin, jotka vaativat tarkkaa säätöä eikä sillä pystytä säätämään momenttia vaan kuormitus määrää sen suuruuden. Lisäksi modulaattorin käyttäminen lisää viivettä säädön vasteaikaan. Taajuussäätö on yksinkertaisuutensa takia edullinen tapa ohjata sovelluksia, jotka eivät vaadi tarkkaa säätöä, kuten pumppuja ja puhaltimia. (ABB 2001a.)



Kuvio 15. PWM-moduloidun taajuussäätöä käyttävän vaihtovirtakäytön säätöpiiri. (ABB 2001a)

5.2.2 Vuovektorisäätö

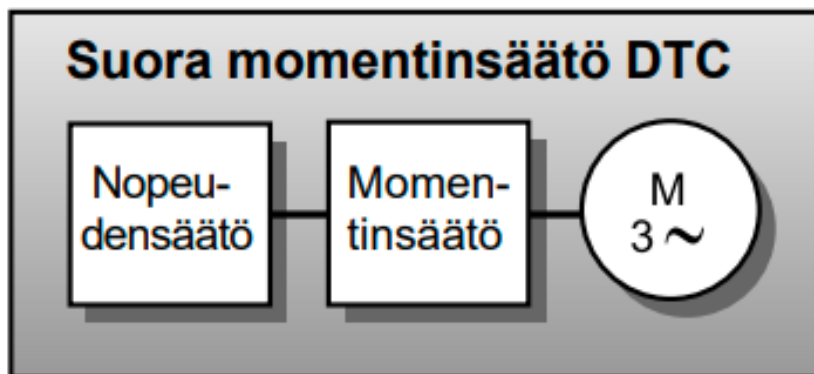
Vuovektorisäätö perustuu moottorin dynaamisen tilan tuntemiseen. Vuovektorisäädössä käytetään PWM-modulaattoria, jonka avulla kentän suunta muodostetaan sähköisesti eikä mekaanisesti kuten tasavirtamoottoreissa. Vuovektorisäätö voidaan mieltää tasavirtamoottorin käyttöolosuhteita simuloivaksi säätötavaksi. Vuovektorisäädetyssä käytössä säätösuureina toimivat jännite, virta ja taajuus, jotka elektroninen säädin luo säätäen momenttia epäsuorasti. Vuovektorisäädöllä saavutetaan lähes tasavirtakäyttöä vastaava suorituskyky. Kuviossa 16 esitetään vuovektorisäädön säätöpiirin periaatteellinen rakenne. (ABB 2001a.)



Kuvio 16. PWM-moduloidun vuovektorisäätöä käyttävän vaihtovirtakäytön säätöpiiri (ABB 2001a)

5.2.3 Suora vääntömomentin säätö

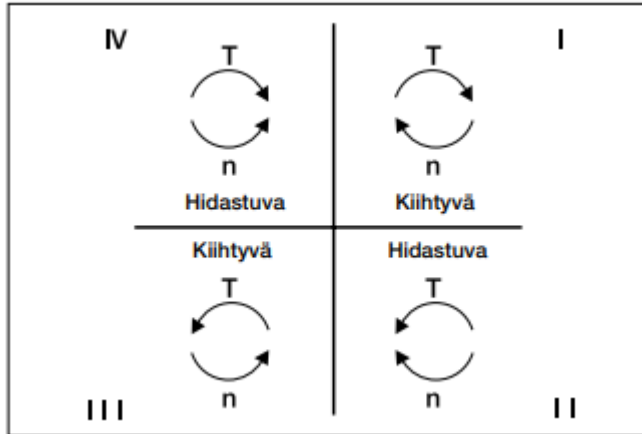
Suorassa vääntömomentin säädössä eli DTC:ssä (Direct Torque Control) moottorin magneettivuota ja vääntömomenttia säädetään suoraan ilman takaisinkytkentää, joten takometriä tai asentoanturia ei tarvita. Vääntömomentti lasketaan ilman modulaatiota ja sen momentinvaste on jopa kymmenen kertaa nopeampi kuin muilla vaihtovirta- tai tasavirtakäyttöillä. DTC-käyttöjen dynaaminen nopeus-tarkkuus on verrattavissa takaisinkytkettyihin tasavirtakäyttöihin. Kuviossa 17 esitetään DTC-käytön säätöpiirin periaatteellinen rakenne, josta nähdään sen olevan samankaltainen kuin tasavirtakäyttö. Molemmat käytöt säätelevät suureita, jotka vaikuttavat suoraan moottorin vääntömomenttiin, tasavirtakäyttö säätelee ankkuri- ja magnetointivirtaa ja DTC-käyttö säätelee moottorin momenttia ja magneettivuota. (ABB 2001a.)



Kuvio 17. DTC-säätöä käyttävän vaihtovirtakäytön säätöpiiri. (ABB 2001a)

5.3 Käyttösovellukset

Säädetyt käytön käyttösovellukset on luokiteltu kolmeen pääluokkaan, jotka on jaoteltu momentin ja nopeuden suunnan perusteella. Nämä luokat ovat yhden, kahden ja neljän kvadrantin käytöt. Kuviossa 18 esitetään käyttösovelluksien periaatteellinen toiminta. Momentin ja nopeuden ollessa samansuuntaisia käyttö toimii moottorina. Momentin ja nopeuden ollessa erisuuntaisia käyttö toimii generaattorina. Kuviossa 18 nähdään, että käytön ollessa I- ja III-kvadrantissa se toimii moottorina sekä sen ollessa II ja IV-kvadrantissa se toimii generaattorina.



Kuvio 18. Käyttösovellukset nopeuden ja momentin mukaan (ABB 2001b)

Momentin ja nopeuden suuntien pysyessä muuttumattomina, sanotaan käytön toimivan yhdessä kvadrantissa. Tehon kulkusuunta tässä sovelluksessa on taajuusmuuttajasta prosessiin päin. Tämä on yleisin käyttösovellus ja siinä sähkökäyttö toimii pelkästään ajomoottorina, eikä siinä ole suunnanvaihto- tai jarrutusominaisuuksia. Esimerkiksi pumppu- ja puhallinkäytöissä käytetään yleensä tätä käyttösovellusta. (Hietalahti 2013, 146.)

Kahden kvadrantin sovelluksessa momentin suunta muuttuu, mutta pyörimissuunta ei muutu. Tässä sovelluksessa teho voi kulkea taajuusmuuttajasta prosessiin päin tai prosessista taajuusmuuttajaan päin. Tällaisia käyttöjä ovat sellaiset, joissa laite pitää pysäyttää nopeasti eli jarruttaa joko osana prosessia tai siinä on hätäpysäytysominaisuus. (Hietalahti 2013, 146.)

Neljän kvadrantin sovellusta käytetään käytöissä, jotka vaativat suunnanvaihtominaisuuden tai kyvyn toimia pitkäaikaisesti generaattorina. Neljän kvadrantin sovelluksessa momentin ja nopeuden suunta voi vaihdella vapaasti. Tällaisia sovelluksia ovat esimerkiksi hissit, vinssit ja nosturit sekä prosessit, jotka vaativat jatkuvia nopeuden ja momentin muutoksia, kuten leikkaaminen ja taivuttaminen. (ABB 2001b)

Haluttaessa syöttää jarruttava teho verkkoon päin, tulee käyttää taajuusmuuttajaa, jossa tasasuuntaajassa käytetään vastarinnan kytkettyä tyristorisiltaa tai IGBT-suuntaajaa diodisillan sijasta. Nämä mahdollistavat tehon syöttämisen taajuusmuuttajan välipiiristä verkkoon päin. (Hietalahti 2013, 75.)

6 SÄHKÖKÄYTÖN MITOITUS

Sähkökäytön mitoituksen ensisijainen tehtävä on, että se kykenee täyttämään prosessin tarpeet eli tuottamaan työkoneen vaatiman momentin halutulla nopeudella tai nopeusalueella. Moottorin tulee kyetä antamaan kuormituksen vaatima teho, kuitenkin liikaa lämpenemättä. (Hietalahti 2013, 94.)

Usein työkoneen nopeusalue sovitetaan moottorin nopeusalueeseen vaihteen välityksellä. Yleensä on edullisinta valita vaihteen välityssuhde siten, että moottorin napapariluku on kaksi, eli 1500 kierroksen moottori, koska napaluvun kasvattaminen ei yleensä ole taloudellisesti kannattavaa nopeusalueen sovittamisessa. Moottorin momenttivaatimukset saadaan kuormituksen momentti-pyörimisnopeusanalyysin tuloksena. Työkoneen tuottama vastamomentti ja järjestelmän liiketilän muuttamiseen tarvittava momentti määrittää moottorilta tarvittavan vääntömomentin. (Hietalahti 2012, 20.)

Selvittämällä kuormituksen momenttiaikakäyrä, saadaan selville moottorin termisen kuormitettavuus, joka tarkoittaa moottorin lämpenemää korkeintaan eristeille sallittuun lämpötilaan. Sähkömoottorin mitoitus ja valinta tapahtuu tavallisimmin termisen kuormitettavuuden perusteella, riippuen sähkökäytön momenttivaatimuksista. Hyväksikäytettäessä moottorin hetkellistä kuormitettavuutta, voidaan moottorin valinta joutua tekemään muilla perusteilla. (Hietalahti 2012, 20.)

Tärkeimmät suureet sähkökäytön mitoituksessa ovat vaadittu vääntömomentti tai teho pyörimisnopeuden funktiona sekä vaadittu pyörimisnopeusalue. Nämä suureet ovat verrannollisia toisiinsa Kaavan 5 mukaisesti. Kaavasta voidaan päätellä, että jos momentista tai tehosta tunnetaan vain toinen, voidaan tuntematon suure laskea tunnetulla nopeudella yhtälöä soveltamalla. (Hietalahti 2013, 112.)

$$T = \frac{P_e \times 9550}{n} \quad (5)$$

missä

T on vääntömomentti [Nm]

P_e on moottorin mekaaninen teho [kW]

n on moottorin pyörimisnopeus [rpm]

(Hietalahti 2013, 94.)

Sähköinen ottoteho voidaan laskea moottorin mekaanisen tehon ja hyötysuhteen avulla Kaavalla 6 tai moottorin jännitteen U_s , virran I_s ja tehokertoimen $\cos\varphi$ avulla Kaavalla 7.

$$P_s = \frac{P_e}{\eta} \quad (6)$$

missä

P_s on moottorin sähköinen ottoteho [kW]

η on moottorin hyötysuhde

P_e on moottorin mekaaninen teho

(Korpinen 1998.)

$$P_s = \sqrt{3}U_s I_s \cos\varphi \quad (7)$$

missä

U_s on moottorin nimellisjännite

I_s on moottorin nimellisvirta

$\cos\varphi$ on tehokerroin

(Korpinen 1998.)

Moottorin mitoitukseen ei ole mitään suoraa kaavaa, vaan se tehdään työkoneneen asettamien vaatimusten ja kokemusperäisten tietojen pohjalta esimerkiksi työkoneneen valmistajan toimesta. Vakiokäyttöön eli S1-käyttöön mitoittaminen tapahtuu, valitsemalla halutun nopeuden moottori, joka pystyy tuottamaan suuremman momentin tai tehon, mitä kuormitus vaatii, Kaavan 8 ja 9 mukaisesti. (Hietalahti 2013, 112.)

$$P_n \geq P_k \quad (8)$$

missä

P_n on moottorin nimellisteho [kW]

P_k on kuorman vaatima teho [kW]

(Hietalahti 2013, 112.)

$$T_n \geq T_k \quad (9)$$

missä

T_n on moottorin nimellismomentti [Nm]

T_k on kuorman vaatima momentti [Nm]

(Hietalahti 2013, 112.)

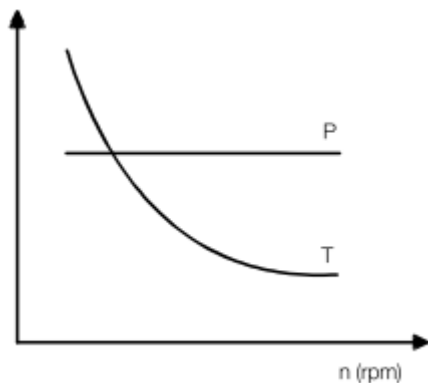
Huippu- eli kippimomentti on suurin momentti millä moottoria voidaan kuormittaa. Jos momentti ylitetään edes hetkellisesti, moottori pysähtyy. Moottorin maksimimomentti on yleensä noin 2 kertaa nimellismomentin. Mikäli moottori ei pysty saavuttamaan työkoneen vaatimaa pyörimisnopeutta tai pyörimisnopeusaluetta on käytettävä välitystä eli vaihteistoa. Laskettaessa moottorin akselista otettavaa momenttia tai tehoa on otettava välityksen hyötysuhde huomioon. (Hietalahti 2013,44.)

6.1 Kuormitustyypit

Eri teollisuudenaloilla esiintyy tiettyjä kuormitustyyppiejä runsaasti. Kuormitusprofiilin (kierrosalue, momentti ja teho) tunteminen on tärkeää valittaessa sovellukseen sopivaa moottoria ja taajuusmuuttajaa. (ABB 2001c, 21.)

6.1.1 Vakioteho

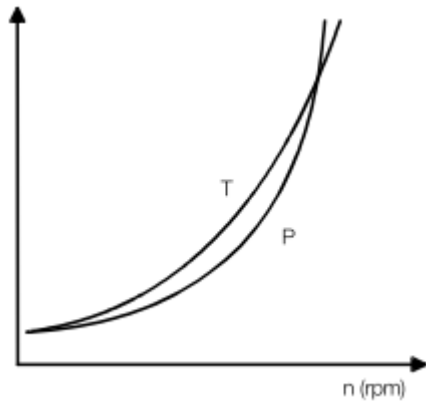
Vakioteho-kuormitustyyppi on tyypillinen sellaisessa sovelluksessa, jossa materiaalia rullataan ja läpimitta muuttuu rullauksen aikana. Teho pysyy vakiona ja momentti on kääntäen verrannollinen kierroslukuun. Kuviossa 19 esitetään tämän kuormitustyyppin tyypillinen momentti- ja tehokuvaaja. (ABB 2001c, 21.)



Kuvio 19. Vakiotehosovelluksen tyypillinen momentti- ja tehokuvaaja (ABB 2001c, 21.)

6.1.2 Neliöllinen momentti

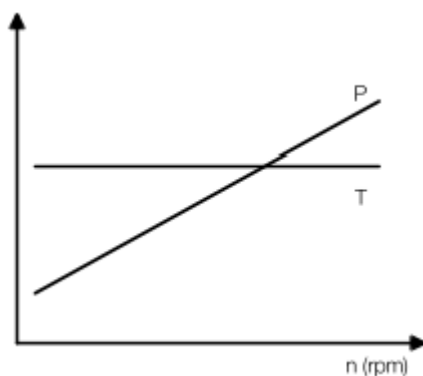
Neliöllinen momentti on kuormitustyypeistä yleisin. Keskipakopumput ja puhaltimet ovat sen tyypillisiä sovelluksia. Momentin ollessa neliöllisesti riippuvainen on teho verrannollinen nopeuden kuutioon. Kuviossa 20 esitetään tämän kuormitustyyppin tyypillinen momentti- ja tehokuvaaja. (ABB 2001c, 20.)



Kuvio 20. Neliöllisen momentin sovelluksen tyypillinen momentti- ja tehokuvaaja. (ABB 2001c, 20.)

6.1.3 Vakiomomentti

Vakiomomentti-kuormitustyyppiä käytetään yleensä käsitellessä kiinteitä määriä. Tyypillisiä vakiomomenttisovelluksia ovat esimerkiksi tässä opinnäytetyössä käsiteltävät ekstruuderit sekä erilaiset syöttölaitteet ja kuljettimet. Momentti on vakio riippumatta nopeudesta ja teho suoraan verrannollinen nopeuteen. Kuviossa 19 esitetään tämän kuormitustyyppin tyypillinen momentti- ja tehokuvaaja. (ABB 2001c, 20.)

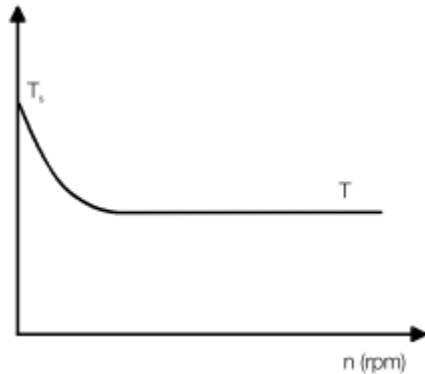


Kuvio 21. Vakiomomenttisovelluksen tyypillinen momentti- ja tehokuvaaja (ABB 2001c.)

Jotkin kuormitustyytit, kuten jotkin ruuipuristinkäytöt voivat vaatia merkittävän käynnistys- tai irtiottomomentin eli korotetun momentin nollanopeudesta. Tämä

on otettava sähkökäyttöä mitoitettaessa huomioon. Kuviossa 22 esitetään tällaisen kuormitustyypin momenttikuvaaja. (Hietalahti 2013, 95).

Tässä työssä käsiteltävät ruuvipuristimet eivät tarvitse käynnistysmomenttia, koska niiden käynnistys tapahtuu sylinterin ollessa tyhjänä ja polymeerimassa syötetään vasta laitteen pyöriessä.



Kuvio 22. Tyypillinen momenttikuvaaja kuormitukselle, jossa on merkittävä irtiottomomenttivaatimus (ABB 2001c)

6.2 Taajuusmuuttajan mitoitus

Taajuusmuuttaja tulee yleisesti mitoittaa nimellisvirraltaan suuremmaksi, kuin syötettävä moottori. Yleensä se mitoitetaan suurimman esiintyvän virran perusteella. Tämä johtuu taajuusmuuttajan moottoria pienemmästä ylikuormitettavuudesta ja lyhyemmistä termisistä aikavakioista. Nimellisvirraltaan liian pieni taajuusmuuttaja voi vahingoittua jaksollisen kuormitushuipun aikana, sillä tehoelektronikan komponentit eivät kestä kuormitusvirran kasvusta aiheutuvaa lämpenemää. Näistä syistä tulee mitoituksen perustua kuormitusvirran ajalliseen vaihteluun sekä niiden termisten aikavakioiden huomioon ottamiseen. Yleisesti moottorin syöttölaitteet mitoitetaan nimellisvirraltaan moottorin seuraavaa vakio-kokoa vastaaviksi. (Hietalahti 2013.)

6.3 Taajuusmuuttajan kytkentä ja oikosulkusuojaus

Taajuusmuuttajan etukojeiden valinnassa tulee ottaa huomioon pelkästään oikosulkusuoja. Oikosulkusuojauksen tulee täyttää tehoelektronikan vaatimukset eli niiden on oltava riittävän nopeita suojatakseen taajuusmuuttajan verkkopuolen tehopuolijohteet. Ainoastaan puolijohdesulakkeet ovat riittävän nopeita täyttääkseen nämä vaatimukset. Puolijohdesulakkeet voidaan korvata esimerkiksi kompaktikatkaisijoilla tai moottorinsuojakytkimillä, mutta tällöin saavutetaan ainoastaan tyyppin 1 koordinointi eli laite ei aiheuta vaaraa ihmisille tai muille laitteille, mutta laite on korjattava ennen, kuin sitä voidaan käyttää. Tehotason kasvaessa toimitetaan taajuusmuuttajat niitä varten rakennetuissa sähkökaapeissa, joissa suojaus ja pääkytkin on sisällytetty osaksi taajuusmuuttajan rakennetta. (Hietalahti 2013, 176.)

Oikosulkusuojaukseen mitoitettaessa on otettava seuraavat yleiset vaatimukset huomioon.

- Suojauksen on toimittava riittävän nopeasti virran arvolla, joka on 0,8 kertaa virtapiirissä esiintyvän pienimmän mahdollisen oikosulkuvirran arvosta.
- Osajohtimien on kestävä termisesti piirin suurin oikosulkuvirta
- Ylikuormitussuojien on toimittava arvolla, joka vastaa osajohtimien yhteenlaskettua suurinta sallittua kuormitusvirtaa.
- Virran jakautuminen tasaisesti osajohtimien välillä on, varmistettava mittauksin tai laskelmin. Virta saa poiketa enimmillään 10 % vaiheen osajohtimien virtojen keskiarvosta. (Hietalahti 2013, 178.)

7 TYÖN TOTEUTUS

7.1 Nykyiset moottorikäytöt

Kaikki puristimien nykyiset moottorit ovat erillismagnetoituja tasavirtamoottoreita. Kuviossa 23 esitetään eristyslinjan ekstruusioprosessin ensimmäisen ruuvipuristimen eli EXT1:n moottorin arvokilpi. Moottori on vanha Oy Strömberg Ab:n 45 kW S1-käyttöluokan tasavirtamoottori. Sen nimellisjännite on 440 V, nimellisvirta on 112 A ja nimellinopeus on 1500 rpm. Magnetointijännite on 200-110 V ja magnetointivirta on 2,2-1,3 A.



Kuvio 23. Ext1:n tasavirtamoottorin arvokilpi

Moottorin hyötysuhde saadaan laskettua sen mekaanisen tehon, joka on arvokilvestä löytyvä 45 kW ja sähköisen ottotehon avulla. Moottorin ottamaa sähköistä tehoa ei löydy arvokilvestä vaan se täytyy laskea Kaavan 3 ja arvokilvestä löytyvien nimellisjännitteen- ja virran sekä magnetointijännitteen- ja virran avulla.

$$P_{otto} = \frac{440 \text{ V} \times 112 \text{ A} + 200 \text{ A} \times 2,2 \text{ A}}{1000} = 49,7 \text{ kW}$$

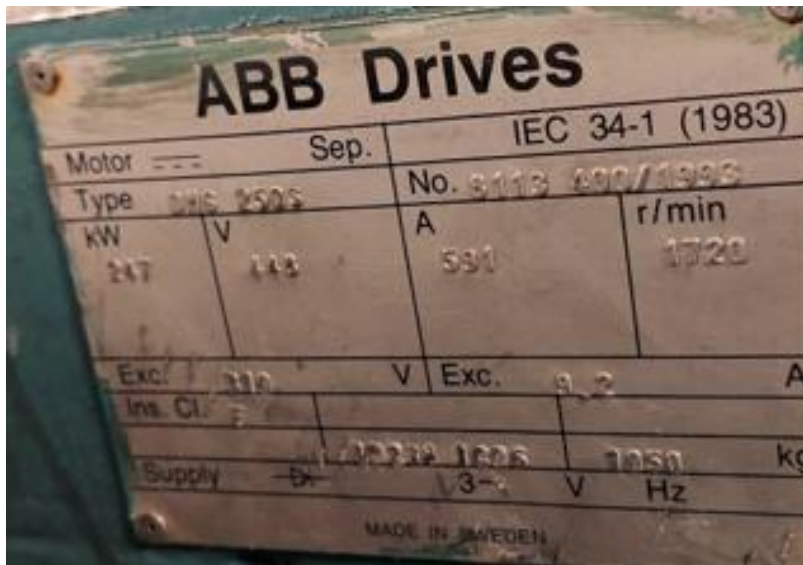
Hyötysuhde saadaan laskettua Kaavaa 2 soveltamalla seuraavasti.

$$\eta = \frac{45 \text{ kW}}{49,7 \text{ kW}} \times 100 \% = 91 \%$$

Nimellismomentti saadaan laskettua Kaavaa 1 soveltamalla seuraavasti.

$$T_n = \frac{45 \text{ kW} \times 9550}{1500} = 286,5 \text{ Nm}$$

Kuviossa 24 nähdään ruuvipuristin 2:n eli EXT2:n moottorin arvokilpi. Moottori on ABB:n 247 kW tasavirtamoottori. Sen nimellisjännite on 443 V, nimellisvirta on 591 A ja nimellisyörimisnopeus on 1720 rpm. Magnetointijännite on 310 V ja magnetointivirta on 9,2 A.



Kuvio 24. EXT2:n tasavirtamoottorin arvokilpi.

Moottorin ottama sähköinen teho saadaan laskettua Kaavan 3 avulla seuraavasti.

$$P_{otto} = \frac{443 \text{ V} \times 591 \text{ A} + 310 \text{ V} \times 9,2 \text{ A}}{1000} = 267,6 \text{ kW}$$

Hyötysuhde saadaan laskettua Kaavaa 2 soveltamalla seuraavasti.

$$\eta = \frac{247 \text{ kW}}{267,6 \text{ kW}} \times 100 \% = 92 \%$$

Nimellismomentti saadaan laskettua Kaavaa 1 soveltamalla seuraavasti.

$$T_n = \frac{247 \text{ kW} \times 9550}{1720 \text{ rpm}} = 1371 \text{ Nm}$$

Kuviossa 25 nähdään ruuvipuristin 3:n eli EXT3:n moottorin arvokilpi. Moottori on ABB:n 68 kW tasavirtamoottori. Sen nimellisjännite on 460 V, nimellisvirta on 165,5 A ja nimellisyörimisnopeus on 1290 rpm. Magnetointijännite on 310 V ja magnetointivirta on 4,01 A.



Kuvio 25. EXT3:n tasavirtamoottorin arvokilpi.

Moottorin ottama sähköinen teho saadaan laskettua Kaavan 3 avulla seuraavasti.

$$P_{otto} = \frac{460 \text{ V} \times 165,5 \text{ A} + 310 \text{ V} \times 4,01 \text{ A}}{1000} = 77,4 \text{ kW}$$

Hyötysuhde saadaan laskettua Kaavaa 2 soveltamalla seuraavasti.

$$\eta = \frac{68 \text{ kW}}{77,4 \text{ kW}} \times 100 \% = 88 \%$$

Nimellismomentti saadaan laskettua Kaavaa 1 soveltamalla seuraavasti.

$$T_n = \frac{68 \text{ kW} \times 9550}{1290 \text{ rpm}} = 503 \text{ Nm}$$

7.2 Korvaavien moottoreiden mitoitus

Korvaavat moottorit valittiin ABB:lta, koska ABB on ainoa moottorivalmistaja, joka tarjoaa IE5-luokan SynRM-käyttöjä. Sähkökäytöt mitoitettiin vähintään nykyisten DC-moottorikäyttöjen nimellisarvojen perusteella. Korvaaviksi taajuusmuuttajiksi valittiin ABB:n ACS880 -sarjan taajuusmuuttajat, jotka soveltuvat SynRM:lle. Niiden säätötapana toimii DTC-säätö.

7.2.1 EXT1

Nykyisen DC-moottorin nimellisvääntömomentti on 286,5 Nm ja nimellisyörimisnopeus on 1500 rpm. Korvaavan moottorin teho voidaan laskea Kaavan 5 avulla seuraavasti.

$$P_e = \frac{286,5 \text{ Nm} \times 1500 \text{ rpm}}{9550} = 45 \text{ kW}$$

ABB:lta löytyy DC-moottorin nimellisarvoja vastaava SynRM-malli M3BL250SMB 4, jonka nimellisteho on 55 kW, nimellisyörimisnopeus 1500 rpm ja nimellisvääntömomentti 350 Nm. Taajuusmuuttajaksi ABB:n Drivesize -sovellus suosittelee ABB:n ACS880-sarjan mallia ACS880-01-105A-3. Oikosulkumoottoriksi voidaan

valita ABB:lta M3BP 250 SMA 4 -malli, jonka nimellisteho on 55 kW, nimellisyörimisnopeus on 1483 rpm ja nimellisvääntömomentti on 354 Nm. Taajuusmuuttajaksi Drivesize suosittelee samaa ACS880-01-105A-3-mallia.

7.2.2 EXT2

Nykyisen DC-moottorin nimellisvääntömomentti on 1372,5 Nm ja nimellisyörimisnopeus on 1720 rpm. Nimellisnopeudeltaan 1500 rpm olevan SynRM ja oikosulkumoottorin kuormitettavuus kentänheikennysalueella 1720 rpm nopeudella on 88 %. Moottoreiden vähimmäisvääntömomentti saadaan laskettua seuraavasti.

$$T_n = \frac{1372,5}{0,88} = 1560 \text{ Nm}$$

Minimiteho, jonka korvaavan 1500 rpm moottorin on ylitettävä, voidaan laskea Kaavan 5 avulla seuraavasti.

$$P_e = \frac{1372,5 \text{ Nm} \times 1500 \text{ rpm}}{9550} = 216 \text{ kW}$$

ABB:lta löytyy DC-moottorin nimellisarvoja vastaava SynRM-malli M3BL 315LKA 4, jonka nimellisteho on 250 kW, nimellisyörimisnopeus 1500 rpm ja nimellisvääntömomentti 1591 Nm. Taajuusmuuttajaksi Drivesize suosittelee ABB:n ACS880-sarjan mallia ACS880-07-0430A-3. Oikosulkumoottoriksi voidaan valita ABB:lta M3BP 355SMB 4-malli, jonka nimellisteho on 250 kW, nimellisyörimisnopeus on 1491 rpm ja nimellisvääntömomentti on 1601 Nm. Taajuusmuuttajaksi Drivesize suosittelee ACS880-01-430A-3-mallia.

7.2.3 EXT3

Nykyisen DC-moottorin nimellisvääntömomentti on 503,5 Nm ja nimellisyörimisnopeus on 1290 rpm. Nimellisnopeudeltaan 1000 rpm olevan SynRM ja oikosulkumoottorin kuormitettavuus kentänheikennysalueella 1290 rpm nopeudella on 77 %. Moottorin tarvittava nimellismomentti saadaan laskettua seuraavasti.

$$T_n = \frac{503,5}{0,77} = 654 \text{ Nm}$$

Teho, jonka korvaavan 1000 rpm moottorin on ylitettävä, voidaan laskea Kaavan 5 avulla seuraavasti.

$$P_e = \frac{654 \text{ Nm} \times 1000 \text{ rpm}}{9550} = 68,5 \text{ kW}$$

ABB:lta löytyy DC-moottorin nimellisarvoja vastaava SynRM-malli M3BL 315SMA 4, jonka nimellisteho on 75 kW, nimellisyörimisnopeus 1000 rpm ja nimellisvääntömomentti 717 Nm. Taajuusmuuttajaksi Drivesize suosittelee ABB:n ACS880-sarjan mallia ACS880-01-145A-3. Oikosulkumoottoriksi voidaan valita ABB:lta M3BP 315SMC 6-malli, jonka nimellisteho on 75 kW, nimellisyörimisnopeus on 994 rpm ja nimellisvääntömomentti on 721 Nm. Taajuusmuuttajaksi Drivesize suosittelee ACS880-01-145A-3-mallia.

7.3 Investointien kustannusarviot ja takaisinmaksuajat

Investointien kustannusarvioita varten lähetettiin tarjouspyyntö PJ Control Oy:lle. PJ Control Oy on aiemmin toimittanut Pikkalan tehtaalle ABB:n tuotteita. Sieltä lähetettiin tarjous sähkökäytöistä.

7.3.1 EXT1

Taulukossa 1 esitetään EXT1:n investoinnin kustannusarvio, josta nähdään tarjouksessa annetut hinnat EXT1:n uusille sähkökäyttöille. Asennuskustannuksina käytettiin Pikkalan tehtaan sähkötöiden johtajan kokemusperäistä kustannusarviota, joka on 4 500 € per sähkökäyttö. DC-moottorin vuosittaisina huoltokustannuksina käytettiin, myös sähkötöiden johtajan kokemusperäistä arviota, joka on 2 000 € vuodessa.

Sähkökäytön hyötysuhteen selvittämistä varten käytiin mittaamassa nykyisen sähkökäytön ottama sähköinen teho tyypillisessä kuormitustilanteessa, joka oli 7,2 kW eli 0,0072 MW ja tehokerroin, joka oli 0,27. Työkoneen pyörimisnopeus, joka oli 9,1 rpm ja moottorille menevä virta saatiin eristyslinjan valvomon SCADA-järjestelmästä. Moottorin pyörimisnopeus saatiin laskettua työkoneen pyörimisnopeuden sekä sen ja moottorin välissä olevan alennusvaihteen, jonka välityssuhde 28,8:1, avulla. Moottorin pyörimisnopeudeksi saatiin 262 rpm. Virta ilmoitettiin prosentteina nimellisarvosta ja se oli 54 %. Erillismagnetoidun tasavirtamoottorin tuottama vääntömomentti, on suoraan verrannollinen moottorin ankkurivirtaan, siten voidaan olettaa vääntömomentin arvon olevan myös 54 % nimellävääntömomentistä. Moottorin tuottama vääntömomentti on kuormitustilanteessa 153,5 Nm. Moottorin akseliteho saadaan laskettua Kaavaa 5 soveltaen seuraavasti.

$$P_e = \frac{153,5 \text{ Nm} \times 262 \text{ rpm}}{9550} = 4,2 \text{ kW}$$

Sähkökäytön hyötysuhde saatiin laskettua Kaavaa 6 soveltamalla seuraavasti.

$$\eta = \frac{4,2 \text{ kW}}{7,2 \text{ kW}} \times 100 \% = 58 \%$$

DC-käytön moottorille syöttämä virta oli 60 A ja jännite oli 88 V. Näiden tulosta saatiin laskettua laitteen syöttämä teho, joka oli 5,3 kW. Pelkän DC-käytön hyötysuhteeksi saatiin Kaavaa 6 soveltamalla 74 %, joka oli yllättävän heikko ja johtuu todennäköisesti matalasta tehosta ja pyörimisnopeudesta suhteessa nimellisarvoihin. Moottorin hyötysuhde oli 79 % ja se saatiin laskettua akselitehon ja

DC-käytön syöttämän tehon osamäärästä. Laskussa jätettiin moottoria syöttävän kaapelin tehohäviö huomioimatta.

Taulukko 1. EXT1:n investoinnin kustannusarvio

	Nykyinen DC-moottori	Uusi SynRM	Uusi IM
Moottorin koko (kW)	45	55	55
Moottorin ottama teho käyttötilanteessa (MW)	0,0072	0,0045	0,0050
Käyttötunnit / vuosi	7920	7920	7920
DC-moottorin huolto, kustannus/€ per vuosi	2000		
Asennuskustannukset (€)	0	4500	4500
Sähkön hinta (€/ MWh)	87	87	87
Investointikustannus moottori + taajuusmuuttaja (€)		11350	10925
Sähkön kulutus (MWh/a)	57	36	40
Energiakustannukset (€/a)	4961	3100	3450
Energiansäästö (MWh/a)		21	17
Energiansäästö (€/a)		1860	1500
Investoinnin takaisinmaksuaika		4,1	4,4

Sähkökäytön sähkön vuosikulutus on 57 MWh, joka saatiin laskettua moottorin sähköisen ottotehon ja vuotuisten käyttötuntien tulona. Vuotuiset energiakustannukset saatiin laskettua sähkön hinnan ja vuosikulutuksen tulosta. Sähkön hintana käytettiin tilastokeskuksen yritys ja yhteisö asiakas 20 000 - 69900 MWh - kuluttajatyypin vuosien 2021-2023 keskiarvoa, joka oli 87 €/MWh ja hinta sisältää sähköenergian hinnan sekä verkkopalvelumaksun. Vuotuiseksi energiakustannukseksi saatiin 4961 €.

ABB:n EcoDesign-palvelusta saatiin korvaavien sähkökäyttöjen hyötysuhde, nykyistä käyttöä vastaavassa kuormitusilanteessa. EcoDesign-palvelusta löytyy suurin osa ABB:n markkinoilla olevista sähkömoottoreista ja taajuusmuuttajista. Hyötysuhde voidaan katsoa pelkälle moottorille tai taajuusmuuttajalle sekä koko sähkökäytöstä käyttäjän syöttämällä pyörimisnopeuden ja vääntömomentin suhteellisilla arvoilla. Korvaavan SynRM:n hyötysuhteeksi saatiin 93,4 %, joten 4,2 kW:n akseliteholla, sähköiseksi ottotehoksi saadaan 4,5 kW. Vuosikulutukseksi saatiin 35,6 MWh ja energiakustannukseksi 3 100 €. Korvaavan IM-käytön hyötysuhteeksi saatiin 83,4 % ja 4,2 kW:n akseliteholla ottotehoksi saatiin 5,0 kW. Vuosikulutukseksi saatiin 39,6 MWh ja energiakustannukseksi 3 450 €.

Investoinnin takaisinmaksuaika saatiin laskettua investointi- ja asennuskustannusten summan sekä DC-moottorin huoltokustannusten ja energian säästön summan osamäärästä. SynRM:n takaisinmaksuaika on 4,1 vuotta ja IM:n 4,4 vuotta.

7.3.2 EXT2

Taulukossa 2 esitetään EXT2:n investoinnin kustannusarvio, josta nähdään tarjouksessa annetut hinnat EXT2:n uusille sähkökäyttöille. Asennuskustannuksina käytettiin Pikkalan tehtaan sähkötöiden johtajan kokemusperäistä kustannusarviota, joka on 4 500 € per sähkökäyttö. DC-moottorin vuosittaisina huoltokustannuksina käytettiin, myös sähkötöiden johtajan kokemusperäistä arviota, joka on suuremmille moottoreille 4 000 € vuodessa.

Sähkökäytön hyötysuhteen selvittämistä varten käytiin mittaamassa nykyisen sähkökäytön ottama sähköinen teho tyypillisessä kuormitustilanteessa, joka oli 58,5 kW eli 0,0585 MW ja tehokerroin, joka oli 0,44. Moottorin pyörimisnopeus saatiin laskettua työkoneen pyörimisnopeuden, joka oli 18,7 rpm sekä sen ja moottorin välissä olevan alennusvaihteen, jonka välityssuhde 38,11:1, avulla. Moottorin pyörimisnopeudeksi saatiin 713 rpm ja moottorille menevä virta oli 38 % nimellisestä, josta saatiin EXT1:n moottorin tapaan laskettua moottorin tuottama vääntömomentti kuormitustilanteessa, joka oli 522 Nm. Moottorin akseliteho saadaan laskettua Kaavaa 5 soveltaen seuraavasti.

$$P_e = \frac{522 \text{ Nm} \times 713 \text{ rpm}}{9550} = 39,0 \text{ kW}$$

Sähkökäytön hyötysuhde saatiin laskettua Kaavaa 6 soveltamalla seuraavasti.

$$\eta = \frac{39,0 \text{ kW}}{58,5 \text{ kW}} \times 100 \% = 67 \%$$

DC-käytön syöttämä virta oli 253 A ja jännite oli 199 V. Suureiden arvot saatiin laitteen paneelista. Näiden tulosta saatiin laskettua laitteen syöttämä teho, joka oli 50,3 kW. Pelkän DC-käytön hyötysuhteeksi saatiin Kaavaa 6 soveltamalla 86 %. Moottorin hyötysuhde oli 78 % ja se saatiin laskettua akselitehon ja DC-käytön syöttämän tehon osamäärästä. Laskussa jätettiin moottoria syöttävän kaapelin tehohäviö huomioimatta.

Taulukko 2. EXT2:n investoinnin kustannusarvio

	Nykyinen DC-moottori	Uusi SynRM	Uusi IM
Moottorin koko (kW)	247	250	250
Moottorin ottama teho käyttötilanteessa (MW)	0,0585	0,0403	0,0432
Käyttötunnit / vuosi	7920	7920	7920
DC-moottorin huolto, kustannus/€ per vuosi	4000		
Asennuskustannukset (€)		4500	4500
Sähkön hinta (€/ MWh)	87	87	87
Investointikustannus moottori + taajuusmuuttaja		50990	44840
Sähkön kulutus (MWh/a)	463	319	342
Sähkökustannukset (€/a)	40309	27768	29767
Energiansäästö (MWh/a)		144	121
Energiansäästö (€/a)		12541	10542
Investoinnin takaisinmaksuaika (a)		3,4	3,4

Sähkökäytön sähkön vuosikulutus on 463 MWh ja vuotuisesti sähkökustannukseksi saatiin 40 309 €. Korvaavan SynRM-käytön hyötysuhteeksi saatiin Eco-design-palvelusta 96,8 % nykyistä käyttöä vastaavassa kuormitustilanteessa. 39,0 kW:n akseliteholla, sähköiseksi ottotehoksi saadaan 40,3 kW. Vuosikulutukseksi saatiin 319 MWh ja energiakustannukseksi 27 768 €. Korvaavan IM-käytön hyötysuhteeksi saatiin 90,2 % ja 39,0 kW:n akseliteholla ottotehoksi saatiin 43,2 kW. Vuosikulutukseksi saatiin 342 MWh ja energiakustannukseksi saatiin 29 767 €. Investoinnin takaisinmaksuajaksi SynRM-käytölle saatiin 3,4 vuotta ja IM-käytölle 3,4 vuotta.

7.3.3 EXT3

Taulukossa 3 esitetään EXT3:n investoinnin kustannusarvio, josta nähdään tarjouksessa annetut hinnat EXT3:n uusille sähkökäyttöille. Asennuskustannuksina käytettiin 4 500 € per sähkökäyttö ja DC-moottorin vuosittaisina huoltokustannuksina käytettiin 2 000 € vuodessa.

Sähkökäytön hyötysuhteen selvittämistä varten käytiin mittaamassa nykyisen sähkökäytön ottama sähköinen teho tyypillisessä kuormitustilanteessa, joka oli 8,1 kW eli 0,0081 MW sekä tehokerroin, joka oli 0,31. Moottorin pyörimisnopeus saatiin laskettua työkoneen pyörimisnopeuden, joka oli 10,6 rpm sekä sen ja moottorin välissä olevan alennusvaihteen, jonka välityssuhde on 28,6:1, avulla. Moottorin pyörimisnopeudeksi saatiin 291 rpm. Moottorille menevä virta oli 32 % nimellisestä, josta saatiin EXT1:n moottorin tapaan laskettua moottorin tuottama vääntömomentti kuormitustilanteessa, joka oli 161 Nm. Moottorin akseliteho saadaan laskettua Kaavaa 5 soveltaen seuraavasti.

$$P_e = \frac{161 \text{ Nm} \times 291 \text{ rpm}}{9550} = 4,9 \text{ kW}$$

Sähkökäytön hyötysuhde saatiin laskettua Kaavaa 6 soveltamalla seuraavasti.

$$\eta = \frac{4,9 \text{ kW}}{8,1 \text{ kW}} \times 100 \% = 60 \%$$

DC-käytön syöttämä virta oli 60 A ja jännite oli 113 V. Suureiden arvot saatiin laitteen paneelista. Näiden tulosta saatiin laskettua laitteen syöttämä teho, joka oli 6,8 kW. Pelkän DC-käytön hyötysuhteeksi saatiin Kaavaa 6 soveltamalla 84 %. Moottorin hyötysuhde oli 72 % ja se saatiin laskettua akselitehon ja DC-käytön syöttämän tehon osamäärästä. Laskussa jätettiin moottori syöttävän kaapelin tehohäviö huomioimatta.

Sähkökäytön sähkön vuosikulutus on 64 MWh ja vuotuisesti sähkökustannukseksi saatiin 5 581 €. Korvaavan SynRM-käytön hyötysuhteeksi saatiin Eco-design-palvelusta 94,3 % nykyistä käyttöä vastaavassa kuormitustilanteessa. 4,9 kW:n akseliteholla, sähköiseksi ottotehoksi saadaan 5,2 kW. Vuosikulutukseksi saatiin 41 MWh ja energiakustannukseksi saatiin 3 583 €. Korvaavan IM-käytön hyötysuhteeksi saatiin 79,2 % ja 4,9 kW:n akseliteholla ottotehoksi saatiin 6,2 kW. Vuosikulutukseksi saatiin 49 MWh ja energiakustannukseksi 4 272 €. Investoinnin takaisinmaksuajaksi SynRM-käytölle saatiin 5,8 vuotta ja IM-käytölle 6,6 vuotta.

Taulukko 3. EXT3:n investoinnin kustannusarvio

	Nykyinen DC-moottori	Uusi SynRM	Uusi IM
Moottorin koko (kW)	68	75	75
Moottorin ottama teho käyttötilanteessa (MW)	0,008	0,0052	0,0062
Käyttötunnit / vuosi	7920	7920	7920
DC-moottorin huolto, kustannus/€ per vuosi	2000		
Asennuskustannukset (€)	0	4500	4500
Sähkön hinta (€/ MWh)	87	87	87
Investointikustannus moottori + taajuusmuuttaja		18670	17460
Sähkön kulutus (MWh/a)	64	41	49
Energiakustannukset (€/a)	5581	3583	4272
Energiansäästö (MWh/a)		23	15
Energiansäästö (€/a)		1998	1308
Investoinnin takaisinmaksuaika		5,8	6,6

8 POHDINTA

Työssä tutkittiin ekstruusioprosessin ruuvipuristimien DC-moottorikäyttöjen modernisoimista AC-moottorikäyttöihin. Ruuvipuristimien moottorikäyttöiltä vaaditaan pyörimisnopeuden pysymistä mahdollisimman stabiilina, tämän takia käytöinä ovat toimineet DC-moottorikäytöt niiden hyvän säädettävyyden takia. Nykyään AC-moottoreiden säätömenetelmät ovat kehittyneet siihen pisteeseen, että niiden säädettävyyys vastaa DC-käyttöjen säädettävyyttä. DTC-säätömenetelmällä päästään vaihtovirtamoottorikäytöllä tasavirtakäyttöä vastaavaan momenttivasteeseen ja nopeudensäätöön ilman PWM-modulaattoria ja takaisinkytkentää. DTC-säädöllä saadaan moottorilta täysi vääntömomentti myös nollanopeudesta, joka on tärkeä ominaisuus monissa moottoreiden käyttökohteissa.

Modernisoimalla eristyslinjan ruuvipuristimien sähkökäytöt saadaan parannettua linjan käyttövarmuutta ja optimoitua huollontarvetta vaihtovirtamoottoreiden ollessa luotettavampia ja vähemmän huoltoa vaativampia, kuin vanhat tasavirtamoottorit. Myös energiatehokkuuden kannalta modernisointi on selkeästi kannattavaa. Modernisoitavaksi moottoriksi paras vaihtoehto luotettavuuden ja energiatehokkuuden kannalta on SynRM. Häviötön roottori pienentää moottorin kokonaishäviöitä parantaen moottorin hyötysuhdetta ja alentaen käämitysten sekä laakereiden käynnin aikaisia lämpötiloja lisäten niiden käyttöikä.

Energiatehokkuuden näkökulmasta kannattaisi tarkemmin tutkia modernisoitavilta moottoreilta vaadittavia vääntömomenteja ja pyörimisnopeusalueita. Pyörittämällä moottoreita nykyistä isommalla nopeudella lähempänä nimellisnopeutta, saataisiin energiatehokkuutta parannettua entisestään sekä moottoreiden tehoa voitaisiin pienentää. Esimerkiksi kaksinkertaistamalla vaihteiston välityssuhteen moottoreiden pyörimisnopeus tuplaantuu ja niiltä vaadittava vääntömomentti puolittuu. Siten modernisoitavien moottoreiden teho voitaisiin puolittaa, joka tarkoittaisi pienempää hankintahintaa ja energiatehokkuuden paranemista. Modernisoitavien moottoreiden nimellisnopeudeksi voitaisiin valita 1000 rpm, joka parantaisi energiatehokkuutta ja nimellistehoa voitaisiin pienentää entisestään.

Työssä laskettuja investointien takaisinmaksuaikoja voidaan pitää lähinnä suuntaa antavina, ja ne riippuvat melko pitkälti sähköhinnan kehityksen suunnasta.

Pienennettäessä modernisoitavien moottoreiden tehoja saadaan takaisinmaksu-aikojakin lyhennettyä merkittävästi. Takaisinmaksuajoissa ei ole myöskään huomioitu linjan DC-moottoreiden vikaantumisten aiheuttamista ennakoimattomien käyttökatkojen aiheuttamista tuotantotappioista. Otettaessa huomioon modernisoinnin aikaansaama käyttövarmuuden parantuminen myös takaisinmaksuajat lyhenisivät.

LÄHTEET

ABB 2001a. Suora momentinsäätö. Viitattu 6.2.2023.

[https://library.e.abb.com/public/fdba0b31a34b89d1c1256d280040b4ae/Tekni-
nenopasnro1.pdf](https://library.e.abb.com/public/fdba0b31a34b89d1c1256d280040b4ae/Tekni-
nenopasnro1.pdf)

ABB 2001b. Sähköinen jarrutus. Viitattu 15.2.2023.

[https://library.e.abb.com/public/2e30f9c0e2d07b9ac1256d28004152df/Tekni-
nen_opasnro8.pdf](https://library.e.abb.com/public/2e30f9c0e2d07b9ac1256d28004152df/Tekni-
nen_opasnro8.pdf)

ABB 2001c. Sähkökäytön mitoitus. Viitattu 7.2.2023.

[https://library.e.abb.com/public/b11dafa92973be93c1256d2800415027/Tekni-
nen_opasnro7.pdf](https://library.e.abb.com/public/b11dafa92973be93c1256d2800415027/Tekni-
nen_opasnro7.pdf)

ABB 2013. IE4 synchronous reluctance motor and drive package for pump and fan applications. Viitattu 28.2.2023.

[https://library.e.abb.com/public/21ee11b9fddfa677c1257bd500219300/Cata-
log_IE4_SynRM_EN_06-2013_9AKK105828_lowres.pdf](https://library.e.abb.com/public/21ee11b9fddfa677c1257bd500219300/Cata-
log_IE4_SynRM_EN_06-2013_9AKK105828_lowres.pdf)

ABB 2021. ABB:n IE5 SynRM -moottoreille Efficient Solution -merkki. Viitattu 16.3.2021.

[https://new.abb.com/news/fi/detail/71053/abbn-ie5-synrm-moottoreille-efficient-
solution-merkki](https://new.abb.com/news/fi/detail/71053/abbn-ie5-synrm-moottoreille-efficient-
solution-merkki)

Aura, L & Tonteri, A. 2009. Teoreettinen sähkötekniikka ja sähkökoneiden perusteet. 6. painos. Helsinki: WSOYpro Oy.

Bruder, U. 2016. Muovin työstö: muottipuhallus, ekstruusio ja kalvopuhallus. Suom. Erik Lähteenmäki. Viitattu 1.3.2023.

[https://www.muoviyhdistys.fi/2016/07/19/osa-10-muovin-tyosto-muottipuhallus-
ekstruusio-kalvopuhallus/](https://www.muoviyhdistys.fi/2016/07/19/osa-10-muovin-tyosto-muottipuhallus-
ekstruusio-kalvopuhallus/)

Giles, H., Wagner, J. & Mount, E. 2005. Extrusion: the definitive processing guide and handbook. 1. painos. Norwich: William Andrew, Inc.

Heidari, H., Rassölkin, A., Kallaste, A., Vaimann, T., Andriushchenko, E., Belahcen, A., & Lukichev, D. V. 2021. A review of synchronous reluctance motor-drive advancements. *Sustainability (Switzerland)*, 13(2), 1-37. [729].

Viitattu 2.3.2023 <https://doi.org/10.3390/su13020729>

Hietalahti, Lauri 2012. *Säädetyt sähkömoottorikäytöt*. Tampere: Amk-Kustannus Oy, Tammertekniikka.

Hietalahti, Lauri 2013. *Teollisuuden sähkökäytöt*. Tampere: Amk-Kustannus Oy, Tammertekniikka.

Kortelainen, A. 2009. Sähkömoottorin hyötysuhteella on väliä. Viitattu 27.3.2023. <http://www.abb.fi/cawp/seitp202/9324577570fc2313c125765e002bfcd2.aspx>

Korpinen, L. 1998. *Sähkövoimatekniikan opus*. Viitattu 12.3.2023.

http://leenakorpinen.com/archive/svt_opus/10sahkokoneet_1osa.pdf

Korpinen, L. & Tuusa, H. 2008. *Sähkövoimatekniikkaopus*. Viitattu 5.2.2023

http://leenakorpinen.com/archive/svt_opus/11sahkomoottorikaytot.pdf

Prysmian Group Finland Oy. 2017a. *Historia*. Viitattu 21.3.2023.

<https://fi.prysmiangroup.com/about-us/history>

Prysmian Group Finland Oy. 2017b. *Prysmian Groupilla on Suomen laajin kaapelivalikoima*. Viitattu 21.3.2023.

<https://fi.prysmiangroup.com/node/9530>