

ALKUSANAT

Tämä diplomityö on tehty Valtra Oy:lle osana traktorin sähköisen voimanlinjan taka-akselin konseptitutkimusta. Työn ohjaajina ja tarkastajina toimivat LUT:n sähkökäyttötekniikan professori Juha Pyrhönen sekä Valtra Oy:n tuotekehityspäällikkö, tekniikan tohtori Petri Hannukainen.

Kiitos Juha Pyrhöselle aloitteesta diplomityön tekemiseksi sekä kannustavasta ilmapiiristä projektin aikana. Rakentava, kiertelemättä esittämäsi kritiikki on ollut arvokasta palautetta. Kiitos Petri Hannukaiselle mielenkiitoisesta aihealueesta sähkökäyttöjen parissa. Haluan myös kiittää tekniikan tohtori Paula Immosta avusta Matlab-ohjelmiston ongelmien ratkaisussa.

Kiitos myös perheelleni ja lähisukulaisilleni kaikesta avusta kuluneen kahden vuoden aikana. Ilman teitä tämä olisi jäänyt tekemättä.

Kuopiossa 09.06.2021

Tero Lappalainen

SISÄLLYSLUETTELO

1	JOHDANTO.....	13
1.1	Sähköistyksen potentiaali.....	15
1.2	Tavoitteet ja rajaukset.....	16
1.3	Diplomityön rakenne.....	17
1.4	Traktorin sähköistys.....	19
1.4.1	Pakokaasut ja päästöluokitus.....	21
1.4.2	Dieselin hyötysuhde ja häviöt.....	23
1.4.3	Sähkömoottorin hyötysuhde ja häviöt.....	25
1.4.4	Voimansiirto.....	27
1.4.5	Muut mahdollisuudet.....	30
1.5	Toimintamallit.....	31
1.5.1	Eltrac 135.....	31
1.5.2	Fendt X-Concept.....	32
1.5.3	John Deere SESAM.....	33
1.5.4	John Deere eAutoPowr.....	33
1.5.5	Fendt e100 Vario.....	33
1.6	Vaihtoehdot traktorin ajomoottoriksi.....	34
1.6.1	Tasavirtakone.....	36
1.6.2	Epätahtikone.....	36
1.6.3	Tahtikoneet.....	40
1.6.4	Vierasmagneetoitu tahtikone.....	41
1.6.5	Synkroni- ja kestopagneettiaivusteinen synkronireluktanssikone.....	42
1.6.6	Kestomagneettitahtikone.....	44
1.6.7	Napakäämitty murtovakokestopagneettitahtikone.....	45
2	OHJAUS JA SÄÄTÖ.....	49
2.1	Skalaarisäätö.....	49
2.2	Suora käämivuonsäätö DFLC.....	53
2.3	Suora vääntömomentinsäätö DTC.....	54
2.4	Vektorisäätö.....	56
2.5	Avaruusvektori.....	58
2.5.1	Clarken muunnos.....	59
2.5.2	Parkin muunnos.....	60
2.5.3	Vääntömomentin tuotto (TÄHÄN JÄIN).....	62
2.6	Staattorivirran minimointimenetelmä.....	68
2.6.1	MTPA trajektori.....	69
2.7	Kentänheikennys.....	72
2.7.1	FW-säätömenetelmä.....	73
2.7.2	MTPV-säätömenetelmä.....	73
3	VALINTAPROSESSI.....	77
3.1	Valintaperusteet.....	77
3.2	Traktorin kuormitusolosuhteet.....	77
3.3	Traktorin vetovoimatavoite.....	79
3.4	Epätahtikoneen suorituskyky kentänheikennyksessä.....	81
3.5	Kestomagneettitahtikoneen suorituskyky kentänheikennyksessä.....	83

3.6	Jännitereservin käyttö	89
3.7	Konetyyppien vertailu.....	91
3.7.1	Lähtötiedot ja layout.....	92
3.7.2	Nimellisarvot.....	95
3.7.3	Mitat.....	96
3.7.4	Massat	96
3.7.5	Suhteellisarvot ja raaka-aineiden hinnat	97
3.7.6	Suorituskyky	99
3.8	Johtopäätökset	103
4	SÄHKÖTURVALLISUUS.....	109
4.1	Kapasitanssi.....	110
4.2	Eristystaso	112
4.3	Potentiaalintasaus	113
4.4	Ajomoottorin invertterin moduloinnin menetys	114
5	YHTEENVETO	116

KÄYTETYT MERKINNÄT JA LYHENTEET

Lyhenteet

AlNiCo	Alumiini nikkeli koboltti
AC	vaihtovirta
AEF	agricultural industry electronics foundation
CAN	kommunikointiprotokolla (Car Area Network)
CNY	Kiinan rahayksikkö renmimbi
CO	hiilimonoksidi
CO ₂	hiilidioksidi
CVT	portaaton automaattivaihteisto
DC	tasavirta
DFLC	suora käämivuonsäätö
DLG	Saksan maatalousjärjestö
DTC	suora vääntömomentinsäätö
DPF	hiukkassuodatin
EGR	pakokaasun takaisinkierrätys
EMF	vastasähkömotorinen voima
FW	kentänheikennys, kentänheikennyksen säätömenetelmä
HC	hiilivety
HES880	ABB:n mobiili-invertteri
IC411	täysin koteloitu itsejäähdytteinen sähkömoottori
IEC 60034	sähkökonestandardi
IM	epätahtikone
ISOBUS	kommunikointiprotokolla
IVT	portaaton automaattivaihteisto
Li	Litium
MTPA	vääntömomentin maksimointi tietyllä staattorivirralla

MTPV	vääntömomentin maksimointi tietyllä staattorijännitteellä
NdFeBo	Neodyymi-rauta-Boori
NiCd	Nikkeli-kadmium
NO _x	typen oksidi
NRE	tieliikenteen ulkopuolisen, liikkuvan työkoneen polttomoottori
NRMM	tieliikenteen ulkopuolinen liikkuva työkone
PM	kestomagneetti (permanent magnet), partikkeli
PMaSynRM	kestomagneettiaavusteinen synkronireluktanssikone
PMSM	kestomagneettitahtikone
POWERBUS	työkoneiden suurjännitteinen jakelujärjestelmä
pu	suhteellisarvo
PWM	pulssinleveysmodulointi
SCR	ureapelkistys
SmCo	Samarium-koboltti
SynRM	synkronireluktanssikone
SWM	avaruusvektorimodulointi
WFSM	erillismagnetoitu tahtikone

Roomalaiset kirjaimet

B	magneettivuon tiheys [Vs/m ²], [T]
D_{se}	staattorin ulkohalkaisija
E_{PM}	kestomagneetin lähdejännite [V]
e_s	staattorin lähdejännite [V]
f	taajuus [Hz]
f_n	nimellistaajuus [Hz]
H	magneettikentän voimakkuus [A/m]

i_d	pitkittäisen akselin virta roottorikoordinaatistossa [A]
i_D	pitkittäisen akselin vaimennuskäämin virta roottorikoordinaatistossa [A]
i_{md}	pitkittäisakselin magnetointivirta [A]
i_{mq}	poikittaisakselin magnetointivirta [A]
I_n	nimellisvirta [A]
i_{PM}	kestomagneetin napakäämivirta [A]
i_q	poikittaisen akselin virta roottorikoordinaatistossa [A]
i_Q	poikittaisen akselin vaimennuskäämin virta roottorikoordinaatistossa [A]
\mathbf{i}_s	staattorin virtavektori [A]
i_s	staattorin virtavektorin itseisarvo [A]
$i_{s,meas}$	mitattu staattorivirta [A]
i_x	karakteristinen virta [A]
L	induktanssi [Vs/A], [H]
L_d	pitkittäisakselin induktanssi [Vs/A], [H]
L_{md}	pitkittäisakselin magnetointi-induktanssi [Vs/A], [H]
L_{mq}	poikittaisakselin magnetointi-induktanssi [Vs/A], [H]
L_q	poikittaisakselin induktanssi [Vs/A], [H]
L_{σ}	staattorin hajainduktanssi [Vs/A], [H]
m	vaiheiden lukumäärä, massa
n	pyörimisnopeus [1/min]
n_n	nimellinen pyörimisnopeus [1/min]
n_s	nimellinen pyörimisnopeus [1/min]
p	napapariluku
P	teho [kW]
P_e	sähköteho [kW]

R_s	staattoriresistanssi [Ω]
r	pyörän halkaisija [m]
T	vääntömomentti [Nm]
t	aika
T_e	sähköinen vääntömomentti [Nm]
T_{inv}	invertterin maksimivirtaan perustuva maksimivääntömomentti [Nm]
T_{max}	maksimivääntömomentti [Nm]
T_{rel}	sähköinen reluktanssivääntömomentti [Nm]
u_{ph}	vaihejännite [V]
\mathbf{u}_s	staattorijännitteen vektori [V]
u_s	staattorijännittevektorin itseisarvo [V]
$u_{s,est}$	staattorijännitteen estimaatti [V]
u_{sd}	staattorijännitteen pitkittäisakselin komponentti [V]
u_{sq}	staattorijännitteen poikittaisakselin komponentti [V]

Kreikkalaiset kirjaimet

σ	jännitys [Pa]
δ	napakulma [rad, °]
β	virran vaihekulma [rad, °]
θ	roottorin vaihekulma staattorikoordinaatistossa [rad, °]
θ	magnetomotorisen voiman summavektori [rad, °]
η	hyötysuhde [pu]
Θ	lämpenemä [°C]
μ_r	suhteellinen permeabiliteetti
μ	permeabiliteetti [H/m]
ρ	resistiivisyys [Ωm]

Φ	magneettivuo [Vs]
φ	tehokulma [deg, rad]
ω	sähköinen kulmanopeus [rad/s]
Ω	mekaaninen kulmanopeus [rad/s]
ω_{\max}	maksimikulmanopeus [rad/s]
Ω_{\max}	mekaaninen maksimikulmanopeus [rad/s]
ω_r	roottorin sähköinen kulmanopeus [rad/s]
ω_s	staattorivuon kulmanopeus [rad/s]
ψ_{md}	pitkittäisakselin ilmavälikäämivuo [Vs]
ψ_{mq}	poikittaisakselin ilmavälikäämivuo [Vs]
ψ_{PM}	kestomagneetikäämivuo [Vs]
ψ_s	staattorikäämivuo [Vs]
$\psi_{s,est}$	staattorikäämivuon estimaatti [Vs]
$\boldsymbol{\psi}_s$	staattorikäämivuovektori [Vs]
ψ_s	staattorikäämivuovektorin itseisarvo [Vs]
ψ_{sd}	pitkittäisakselin staattorikäämivuo [Vs]
ψ_{sq}	poikittaisakselin staattorikäämivuo [Vs]

Ylä- ja alaindeksit

D	pitkittäinen vaimennuskäämin virta
d	pitkittäisakselin parametri roottorikoordinaatistossa
DC	tasavirta, tasajännite
FW	kentänheikennys
inv	invertteri
J	Joule
lim	raja
m	magnetointi

max	maksimi
meas	mitattava
MTPA	vääntömomentin maksimointi tietyllä staattorivirralla
MTPV	vääntömomentin maksimointi tietyllä staattorijännitteellä
n	nimellinen,
ph	vaihe
PM	kestomagneetti
pu	suhteellisarvo
q	poikittaisakselin parametri roottorikoordinaatistossa
Q	poikittainen vaimennuskäämin virta
r	roottori, roottorikoordinaatisto
ref	referenssi
rel	reluktanssi
res	reservi
s	staattori, staattorikoordinaatisto
tan	tangentiaalinen
tot	kokonais-
σ	hajaannus
U, V, W	kolmivaihejärjestelmän vaiheet

1 JOHDANTO

Ensimmäiset hahmotelmat sähköisestä propulsiosta esiteltiin jo 1800-luvun puolivälin jälkeen, kun lyijyakku keksittiin vuonna 1859. Muutamia kokeellisia prototyyppejä lukuun ottamatta sähköinen voimansiirto sai kuitenkin merkittävää jalansijaa vasta 1900-luvun alkupuolella.

Tuolloin sähköllä toimivia ajoneuvoja oli merkittävä osuus Yhdysvaltain lisäksi muutamissa Euroopan suurimmista kaupungeista. Esimerkiksi 1900-luvun alussa Yhdysvalloissa oli sähköautoja enemmän kuin bensa-autoja. Hiiliharjallisella tasavirtakoneella varustetun sähköauton etuina polttomoottoriin nähden oli niiden hajuttomuus ja hiljainen ääni. Aluksi polttomoottorikäyttöinen auto piti myös epämukavasti kammata käyntiin, koska starttimoottori tuli markkinoille vasta 1912 (DOE, 2021)

Sähköautoilun läpimurron esteenä oli verrattain rajallinen ajomatka yhdellä akun latauksella, mikä oli ongelma erityisesti kaupunkien ulkopuolella. Sähköautossa nähtiin silti kaupallista potentiaalia. Vaikka Henry Fordkin keskittyi ensisijaisesti polttomoottoriautojen valmistukseen, uskoi hän silti sähköauton mahdollisuuksiin.

Ford ja Thomas Edison aloittivatkin yhdessä systemaattisen työskentelyn akkujen kapasiteetin nostamiseksi 1910-luvun alussa. Vuosien kehitystyön ansiosta Edisonin akuille ilmoitettiin jo lähes 100 km kantama, mutta lupaava kehitys pysähtyi ensimmäiseen maailmansotaan ja 1920-luvun öljyteollisuuden nousu hävitti viimeisetkin sähköajoneuvot liikenteestä. (YLE, 2015)

Halvan öljyn siivittämänä polttomoottoria kehitettiin aktiivisesti salonkikelpoisemmaksi seuraavat vuosikymmenet. Vasta 1970-luvun globaalin öljykriisin seurauksena kertaalleen haudattu sähköinen voimansiirto alkoi jälleen kiinnostaa. Useat valmistajat esittelivätkin kompakteja, lyhyen kantaman sähköautoja kallistuneen polttoaineen seurauksena. Läpimurron esteeksi muodostui jälleen akun rajallinen varauskyky ja sähköisen liikenteen toinen tuleminen hiipuikin 1980-luvulle tultaessa (DOE, 2021)

1990-luvun alussa Yhdysvaltain Kalifornian osavaltio kärsi valtavista ilmansaasteista ja päätti toimenpiteistä päästöttömän liikenteen puolesta. Vuoteen 2003 mennessä kymmenesosan osavaltiossa myytävistä autoista tulisi olla kokonaan päästöttömiä. Tämän seurauksena General Motors toi markkinoille 1990-luvun puolivälissä leasingkäyttöön suunnitellun EV1-sähköauton ja Toyota esitteli ensimmäisen sukupolven Priuksen kyseisen vuosikymmenen lopulla. Sekä Prius että EV1 saivatkin innostuneen vastaanoton seurauksena runsaasti tyytyväisiä käyttäjiä.

Pitkälti öljyteollisuuden sitkeän lobbauksen ansiosta Kalifornian edistykselliset määräykset kuitenkin kumottiin. Seurauksena kaikki EV1-autot vedettiin pois markkinoilta ja romutettiin, vaikka monet kuluttajat olisivat halunneet hankkia leasing -sopimuksella käyttössään olleen auton itselleen. (YLE, 2015)

Negatiivinen kehitys jatkui öljy-yhtiö Chevronin hankkiessa tuolloin yleisesti nikkelikemian (NiCd) ympärille rakennettujen akkujen patentit itselleen 2000-luvun alussa. Kaupallinen kehitystyö lähes pysähtyi hetkeksi.

Sähköautojen lopullinen läpimurto tapahtui entistä energiatiheämpien akkukemioiden ja tehoelektroniikan ympärille rakennetun tuotekehityksen sekä San Franciscon Piilaaksosta vuonna 2003 ponnistaneen Tesla Motors -yrityksen perustamisen myötä.

Kriittisiin metalleihin perustuvien akkujen rinnalle on noussut lukuisia, potentiaalisia vaihtoehtoisia energiavarastoja, joiden ansiosta sähköinen voimansiirto on lähitulevaisuudessa todellinen vaihtoehto myös raskaalle liikenteelle ja työkoneisiin. Työkonevalmistajia kirittävät myös globaalisti tiukentuvat päästömääräykset sekä jatkuva tarve pienentää jo verrattain kalliiden koneiden elinkaarikustannuksia.

Traktoreiden ja maatalouskoneiden valmistajat ovatkin kehittäneet dieselhybridien pohjalta muutamia toimintamalleja tai pienen volyymin sarjatuotteita. Belarus esitteli jo vuonna 2009 prototyypin dieselgeneraattorin ja sähkömoottorin hybridiratkaisusta. Fendt on esitellyt dieselmoottorin ja 700VDC POWERBUS -väylän yhdistelmänä X-concept prototyypin sekä täyssähköisen e100 Vario traktorin (Fendt, 2013, 2018)

Myös John Deere on ollut aktiivinen. 2007 esitellyssä 7530E -prototyypissä dieselmoottorin ja vaihteiston väliin on asennettu generaattori suuritehoisille apulaitteille sekä työkoneita. Lisäksi John Deere esitteli vuonna 2016 6R-mallin pohjalle rakennetun SESAM-akku-tractorin sekä vuonna 2019 GridCON-tutkielman autonomisesta sähkötraktorista, joka on täysin kaapeliyhteyden varassa (iVT 2019, Arkansaslivingmagazine 2018).

1.1 Sähköistyksen potentiaali

Sähköinen voimansiirto on vaihtelevaan kuormitukseen ihanteellinen vaihtoehto, koska ajomoottori voi toimia vaivatta myös generaattorina. Traktorin tapauksessa hyödyt saattavat kuitenkin osoittautua marginaalisiksi traktorin ja työkoneen suuren massan sekä usein tarvittavan korkean vetovoiman vuoksi. Traktorissa sähköisen voimansiirron merkittävin etu onkin sähkömoottorin laajan pyörimisnopeus- ja vääntöalueen tarjoama mahdollisuus vähentää vaihteita murto-osaan nykyisestä. Nykyisiin ratkaisuihin verrattuna sähköisen voimalinjan vaihteistolla on myös potentiaalia olla luotettavampi ja vähemmän huoltoa vaativa.

Traktorien powershift -tyyppisissä vaihteistoissa saattaa olla 20..30 kpl vaihdettavia välityksiä (Koneviesti, 2021). Sähköinen voimansiirto voidaan sähkökoneen tyyppistä, invertterin rajoituksista ja voimansiirron mekaanisista reunaehdoista riippuen rakentaa 1..2 vaihdettavalla välityksellä.

Traktorin jatkuvassa kuormainkäytössä olisi mahdollista hyödyntää käyttöhydrauliikka-järjestelmän rekuperaatiota, mutta traktoria hankitaan harvemmin nykyään vain yhtä työtehtävää varten ja eri teholuokissa koneiden käytönaikainen keskiteho ja aktiivinen työskentelyaika vaihtelevat (Valtra, 2018).

Energiavaraston asettamien rajoitusten vuoksi traktoreiden ajovoimansiirto kehittynee asteittain. Aluksi nähtäneen täyssähköisen voimalinjan sijaan erilaisia dieselin ja tehoa tasaaavan energiavaraston yhdistelmiä, joissa dieseliä käytetään parhaan hyötysuhteen alueella ja kuormitusta tasataan sähköisellä energiavarastolla.

Akustojen energiatiheyden edelleen kehittyessä Fendt e100 Varion kaltaista täyssähköistä traktoria voitaisiin hyödyntää keveisiin, jaksollisiin töihin. Potentiaalisia sovelluskohteita pienille täyssähkötraktoreille voisivat olla esimerkiksi viinitarhat, lentokentät, urheiluareenat sekä kaupunkien kevyet ja keskiraskaat kunnossapitotyöt.

Keskipitkällä aikavälillä erilaiset vetyyn perustuvat järjestelmät saattavat myös osoittautua potentiaalisiksi primäärienergian lähteeksi.

Sähköistäminen tarjoaa potentiaalisia kustannussäästöjä stand by -tyyppisiin töihin, joissa traktorin dieselmoottorilla on pyöritetty työhydrauliikan tai PTO-akselin välityksellä työkoneita, vaikka itse traktori ei liikkuisi. Traktorin energiavarastosta käyttövoimansa saava, invertterillä ohjattu sähkömoottori on merkittävästi energiatehokkaampi kuin traktorin osakuormalla käyvä dieselmoottori.

Työkoneen ajo- ja hydraulijärjestelmän energian talteenottoa on tutkittu (Immonen, 2008 ja 2013) aiemmin Mevea- ja Simulink-ohjelmistojen päälle rakennetun simulaatiomallin avulla. Immosen pohjatyön jatkoksi on myös tarkasteltu hybridivoimalinjalla varustetun traktorin toimintaa ja kustannusrakennetta maatalon pihatöissä 75 kW traktorilla. (Haapaniemi, 2016) Analyysin tuloksena päivän energiahinnoilla sähköistys ei ollut vielä kannattavaa.

Sähköisen etuakselin mahdollisia konstruktioita on myös tutkittu (Rautiainen, 2018). Tutkimustyössä hahmoteltiin vaihtoehtoisia hybridiratkaisuja traktorin etuakselille. Tutkimuksessa havaittiin konstruktioiden toteuttamiskelpoisuus, mutta ratkaisujen kustannusrakenne jäi epäselväksi.

1.2 Tavoitteet ja rajaukset

Tässä diplomityössä tarkastellaan sähköisen propulsioon soveltuvuutta traktorin ajovoimanlähteeksi. Työssä keskitytään taka-akselin ajomoottorin lisäksi traktorin sähköistämisen tarjoamiin mahdollisuuksiin konseptitasolla.

Työssä viitataan satunnaisesti henkilöautojen ajovoimansiirtoon, koska liikenteen sähköistys on työkoneita edellä, ja valmistajat ovat ilmoittaneet tietoja koneistaan.

Syventävään analyysiin valittiin kestromagneettitahtikone, joka on toistaiseksi dominoinut sähköisen propulsioon markkinaa. Konetyyppi onkin traktorin taka-akselin sähköistämisen kannalta erityisen mielenkiintoinen hyvän kokonaishyötysuhteen ja ohuen roottorirakenteen mahdollistavan teknologian ansiosta.

Integroidun napavaihdekestromagneettitahtikoneen osalta on esitetty lupaavaa tutkimustyötä (Montonen 2017, Tehrani 2019). Alunperin LAB / LUT -yhteistyönä InHugor-projektissa esitellyssä vaihdemoottoriratkaisussa murtovakokestromagneettitahtikoneen roottorin sisälle on integroitu planeettapyörästä.

Sähkömoottorin laaja pyörimisnopeusalue ja erinomainen vääntömomentintuottokyky yhdistettynä yksinkertaiseen ja kestäväan planeettavaihteeseen tekevät konstruktioista erityisen kiinnostavan työkonekäyttöön. Prototyypille on raportoitu järjestelmätasolla yli 93 % hyötysuhde. Tarkastelussa on otettu huomioon myös invertteri sekä koneen öljyjäähdytyksen vaatima teho, joiden vuoksi hyötysuhde laski noin 2,5 % (Montonen, 2017).

1.3 Diplomityön rakenne

Tässä diplomityössä tarkastellaan sähköisen propulsioon soveltuvuutta traktorin ajovoimanlähteeksi. Aluksi esitellään traktorin sähköistyksen motiiveja ja yleisiä periaatteita, rajoituksia ja mahdollisuuksia sekä tutustutaan muutamaa alalla jo esiteltyihin toimintamalleihin.

Seuraavaksi esitellään sähköisessä propulsiossa käytetyt yleisimmät sähkökonetyypit sekä tarkastellaan niiden soveltuvuutta traktorin ajomootoriksi. Esittelyssä pureudutaan syvällisemmin erityisesti epätahtimootorin ja kestopagneettitahtikoneen ominaisuuksiin, koska ne ovat mobiilikäyttöjen kaksi yleisintä konetyyppiä. Erityisesti kestopagneettitahtikone on erinomaisen hyötysuhteensa ja geometrisen muunneltavuutensa ansiosta kiinnostava vaihtoehto traktorin ajovoimanlähteeksi.

Muut konetyypit esitellään tiivistetympin. Tarkastelun ulkopuolelle jätetään molempuolinen avonapainen kytkinreluktanssikone. Sen soveltaminen edellyttäisi käytännössä integroidun, oman tehoelektroniikkaan perustuvan teho-ohjaimen kehittämistä, mitä ei tässä hankkeessa vielä pidetty mahdollisena.

Sähkökoneita analysoitaessa huomataan, että jokaista konetyyppiä on mahdollista tavalla tai toisella soveltaa sähköisessä propulsiossa. Energiavarojen rajallinen kapasiteetti on ohjannut kehitystä voimakkaasti kestopagneettitahtikoneiden suuntaan, mutta viime vuosina eri autovalmistajat ovat esitelleet etenevässä määrin muitakin moottorityyppejä ajovoimansiirroissaan. (BMW, Renault). Kestopagneettimateriaalien hintakehityksen seurauksena näemmekin jatkossa yhä enemmän muita konetyyppejä sähköisten liikennevälineiden ja työkoneneiden voimanlähteinä.

Sähköistä voimalinjaa hyödyntävien liikennevälineiden ja työkoneneiden hinnat ovat toistaiseksi merkittävästi korkeampia kuin polttomootoreilla varustettujen mallien. Kalliit akut nostavat täyssähköversioiden hinnan korkeiksi ja hybridiratkaisujen pienemmistä akuista huolimatta niiden hinta nousee, mikäli alkuperäisestä konstruktiosta ei saada jätettyä mitään pois.

Autonvalmistajien keskuudessa on havaittavissa ilmiö, jossa autoja markkinoidaan suorituskyky edellä, vaikka sähköistämisen suurin motiivi on liikkumisen päästöissä. Päästöjen vähentäminen on olennainen motiivi myös työkonene-sovelluksissa.

Valistunut lukija on saattanut myös huomata, että sähköautovalmistajien ilmoittamat tehot ovat maksimitheholukemia, joita voidaan hyödyntää hyvin rajoitetusti. Sähkömoottori

sopii erinomaisesti liikenteen ajovoimanlähteeksi. Kiihdytettäessä koneelta edellytetään suurta vääntömomenttia, mutta likimain vakionopeudella tapahtuvassa siirtymäajossa tarvittava teho on verrattain pieni. Esimerkiksi Teslan S-mallin tehontarve tasamaan siirtymäajossa 80 mailin tuntinopeudella on noin 28 kW, kun epätahtikone pyörii noin 9200 rpm (Narrowband, 2019). Tähän perustuu myös pelkän polttomoottorikäytön tehottomuus.

Toisessa kappaleessa esitellään ajomoottoria ohjaavien invertterien yleisimmät säätömenetelmät. Kappaleessa painotetaan vektorisäätöä sen universaalien luonteen vuoksi. Kappaleessa syvennyttään erityisesti kestopagneettitahtikoneen kentänheikennyksen teoriaan ja säätömenetelmiin.

Kolmas kappale sisältää sähköisen ajomoottorin valintaprosessin traktorin näkökulmasta. Vertailuun valittiin nopeus- ja vääntömomenttipisteiden mukaan yhteensä seitsemän kappaletta sähkökoneita.

Napakäämitty kestopagneettitahtikone oli edustettuna neljällä (PM1..PM4) eri voimansiirron konstruktiolla, pyörimisnopeuden vaihdellessa 1000..2600 1/min välillä. Epätahtikoneita oli kaksi kappaletta siten, että IM1-koneessa oli kaksi vaihdettavaa välitystä ja IM2-koneessa yksi. Seitsemäs kone oli kiertokenttäkäämillä varustettu kestopagneettitahtikone, joka muistutti fyysisiltä mitoiltaan epätahtikonetta. Sen ensisijainen tehtävä oli toimia hyötysuhdereferenssinä napakäämikoneille.

Koneiden analyysissa hyödynnettiin analyttistä laskentaa, joiden pohjalta koottiin kattava taulukko. Taulukkoon koottiin koneiden yleiset nimellisarvot ja mitat sekä aktiiviosien massat. Julkisista lähteistä saatavilla olevien raaka-aineiden pohjalta taulukkoon lisättiin suhdeluvut sekä koneiden suuntaa antava materiaalikustannus. Taulukko on esitetty liitteessä I.

Jatkoon valituille koneille suoritettiin FEM-analyysi, jonka tuloksia ei aihepiirin laajuuden vuoksi esitellä tässä diplomityössä.

Kappaleessa tarkastellaan analyttisen laskennan keinoin sekä epätahtimoottorin että kestopagneettitahtikoneen suorituskykyä kentänheikennyksessä. Tarkastelun painopiste on kestopagneettitahtikoneessa, jolle kentänheikennys on koneen sisäisen vastasähkömotorisen voiman vuoksi haastavampaa.

Neljäs kappale sisältää tulkinnan sähkökäyttöisen traktorin kone- ja käyttäjäturvallisuudesta alan standardien ja teknisten ohjeiden pohjalta. Osiossa tarkastellaan tiivistetysti

sähkövirran vaikutuksia ihmiskehoon, poimitaan alan standardien oleelliset vaatimukset korkeajännitteiseen järjestelmään varautuneen kapasitiivisen energian, korkeajännitejärjestelmän eristystason ja valvonnan sekä laitteiston potentiaalintasauksen osalta.

Yhteenveto ja potentiaaliset jatkotutkimuskohteet esitellään diplomityön lopuksi kappaleessa viisi.

1.4 Traktorin sähköistys

Traktorivalmistajien tuotekehityksen fokus on viime vuosikymmenen aikana ollut erityisesti täsmäviljelyteknologian sekä koneen hallittavuuden ja monipuolisempaa käytettävyyttä helpottavien toimintojen kehityksessä. Ominaisuuksille on ollut luonnollista kysyntää, koska traktorien keskimääräinen koko on kasvanut tasaisesti alati suurentuvien maatilojen mukana. Traktoria käytetään nykyään paljon myös maatilan ulkopuolisiin, usein kausiluontoisiin urakointi- ja kunnossapitotöihin. (Valtra, 2018).

Kiristyvien päästövaatimusten, tehoelektroniikan ja energiavarastojen kehityksen seurauksena traktorivalmistajatkin ovat osittain siirtäneet tuotekehitysprojektiensa painopistettä sähköisen voimansiirron ja sähköistuksen tarjoamien muiden mahdollisuuksien tutkimiseen (John Deere, Belarus, Fendt). Ensimmäisen, julkisissa lähteissä mainitun traktorin sähköistämiseen liittyvän kehityksen mainitaan alkaneen vuonna 2000. (OEM, 2015).

Sähkömoottori onkin ominaisuuksiltaan oivallinen valinta polttomoottorin tilalle propulsiovoiman tuottamiseen. Merkittävästi paremman kokonaishyötysuhteen lisäksi sähkömoottori kykenee toimimaan tehokkaasti laajalla nopeusalueella, jolloin vaihteita tarvitaan merkittävästi vähemmän. Sähkömoottoria voidaan kuormittaa hetkellisesti koneen rakenteesta riippuen 2..3 kertaisella vääntömomentilla. Vastaavan suorituskyvyn polttomoottori tulisi mitoittaa epätaloudellisen suureksi.

Sähköistys tarjoaa mahdollisuuksia maanviljelyn tuottavuuden parantamiseen polttoaineen säästön ja työprosessin tarkemman hallinnan kautta. Sähköistyksellä on myös potentiaalia edelleen parantaa myös koneiden käyttömukavuutta.

Sähkömoottori ei tarvitse portaaton vaihteistoa, ja sen avulla voimalinja voidaan potentiaalisesti rakentaa yksinkertaisemmaksi kuin polttomoottorin voimalinja, jossa dieselmoottorin jatkeena on usein CVT-vaihteisto. Käyttäjätasoisella, mekaanis-hydraulisella voimansiirrolla voidaan optimoida tehon ja vääntömomentin tarve siten, että

moottorin pyörimisnopeus pysyy mahdollisimman alhaisena. Hydraulisen tehonsiirron dominointi alhaisella nopeudella tekee liikkeestä pehmeän, mutta öljyn virtaus on tunnetusti altis ympäristölämpötilan aiheuttamalle viskositeetin vaihtelulle.

Traktoreissa sähköisen energiavaraston heikko energiatiheys korostuu, koska niiden kuormitusyykliä ovat kovin erilaisia verrattuna esimerkiksi liikenteeseen.

Esimerkiksi Fendt 942 Vario Gen6 -traktorin polttoaineen ominaiskulutus DLG Powermix -testin raskaan vetotyön syklissä oli keskimäärin 237 g/kWh. (DLG, 2019). Syklissä mitatun 214 kW nettotehon tuottamiseksi esimerkiksi 6 h ajan tarvittaisiin 366 litraa dieselpolttonestettä. Kun dieselpolttonesteen likimääräinen tiheys on 0,8 kg/l, massaksi saadaan 293 kg. Dieselpolttonesteen energiatheyden ollessa 11,8 kWh/kg, dieselmoottorin primäärienergian tarpeeksi tulisi 3455 kWh. Dieselmoottorin keskimääräinen hyötysuhde olisi netto- ja primäärienergian avulla laskettuna noin 37 %.

Sähköisellä propulsiolla varustetun traktorin voimalinjan kokonaishyötysuhde on huomattavasti parempi. Esimerkiksi 90 % kokonaishyötysuhteella 6 h työskentelyn tarvitsema energiamäärä olisi 1427 kWh. Mikäli Litiumakun energiatiheys olisi 0,1 kWh/kg akuston massaksi tulisi 14270 kg.

Kuuden tunnin mittainen tarkastelujakso on konservatiivinen esimerkki. Urakoinnissa ja maatalon kausiluontoisissa töissä työskentelyjaksot voivat olla edellä mainittua merkittävästi pidempiä, kun työtä tehdään hetkittäin lähes ympärivuorokautisesti.

Suuremman energiatheyden lisäksi dieselpolttoneste on kemiallisena energiavarastona joustavampi ympäristölämpötilan vaihteluille. Normaalin talvilaatuisen dieselin suodatettavuus on tyypillisesti -38°C .. -40°C (Neste, 2021).

Tyypillisen Li-kemiaan perustuvan akun mukavuusalue on huonelämpötilan tuntumassa. Lämpötilan laskiessa esimerkiksi alle $+10^{\circ}\text{C}$ heikkenee sen kapasiteetti lähes puoleen nimellisestä. Samoin käy lämpötilan kohotessa yli $+40^{\circ}\text{C}$.

Energiavaraston rajallisuus kääntyykin polttomoottorin merkittäväksi eduksi, joka halvan öljyn kanssa on edesauttanut sen pitkäaikaista suosiota. Polttomoottori ei akkujen tapaan ole yhtä riippuvainen olosuhteista.

Energiavaraston asettamien rajoitteiden lisäksi traktorin sähköistämisen haasteet liittyvät erityisesti sähköturvallisuuteen, järjestelmätason yhteensopivuuteen sekä kojeiden ja komponenttien kestävyteen vaihtelevissa olosuhteissa.

Traktoreiden sähköisen voimalinjan komponenttien koon optimointi voi osoittautua mutkikkaaksi. Pitkäaikainen työskentely edellyttää jatkuvaa kuormitettavuutta, joka verrattain hyvästä jäähdytyksestä huolimatta saattaa heijastua isokokoisina ja raskasrakenteisina moottoreina.

Tuotantovolyymien puuttuessa sähköisen voimalinjan kehityksen kustannukset saattavat kohota korkeiksi, vaikka sähkömoottoreiden tekninen kehitys on verrattain kypsä ja vaihtoehtoisia energiavarastoja tutkitaan globaalisti.

Tarkastellaan seuraavaksi traktorin sähköistämiseen liittyviä motiiveja ja mahdollisuuksia sekä otetaan huomioon muutamia tärkeimpiä rajoituksia. Kappaleen lopuksi luodaan silmäys muutamiin jo esiteltyihin tutkielmiin ja toimintamalleihin.

1.4.1 Pakokaasut ja päästöluokitus

Sähköistämisen tavoitteena on osaltaan vähentää työkoneiden päästöjä osana Euroopan unionin ilmastopolitiikkaa. Euroopan parlamentin ja neuvoston asetus 167/2013 määrittelee maa- ja metsätaloudessa käytettävien ajoneuvojen tyyppihyväksynnän ja valvonnan. Näitä koneita yhdistävä englanninkielinen termi on NRMM (non-road mobile machinery). Niiden moottoreista käytetään yleisesti lyhennettä NRE (non-road engines) Asetuksen mukaan maa- ja metsätaloudessa käytettävien, tieliikenteen ulkopuolella liikkuvien työkoneiden moottoreiden on oltava EU-tyyppihyväksytyjä pakokaasupäästöjen osalta, ja niistä pitää löytyä EU-jäsenvaltion toimivaltaisen viranomaisen myöntämä tyyppihyväksyntämerkintä. Suomessa tuo viranomainen on Traficom.

Asetus 167/2013 on voimassa EU:n alueella. Yhdysvalloissa vastaava regulaatioluokka on Tier IV Final, jonka päästövaatimukset ovat hieman kevyemmät verrattuna EU:n vaatimuksiin. Muu maailma on seurannut hitaammin perässä.

Moottoritekniikan tulokulmasta pakokaasujen paikallisesti ongelmallisimmat yhdisteet ovat typen oksidit, jotka syntyvät typen reagoissa hapen kanssa moottorin palotilassa. Typen oksideja voidaan vähentää pakokaasusta kierrättämällä (*EGR*). Pakokaasun kierrätys tuo palotilaan inerttiä kaasua, mikä viilentää palamista ja siten estää typen oksidien syntymistä. Pakokaasun ureapelkistyksessä (*SCR*) typen oksidit hajotetaan takaisin alkuaineiksi.

Valmistajat painottavat moottoreissaan vaihtelevasti eri tekniikoita. SCR-menetelmän käyttö edellyttää urean tankkaamista ja varsinkin isoissa traktoreissa urealaitteistosta voi tulla kookas osakokoonpano.

Ureapelkistys mahdollistaa yksinkertaisemman moottorirakenteen, joka suurilla tuotantomäärillä mahdollistaa pienemmät valmistuskustannukset.

Vastineeksi alentunut palamislämpötila lisää hieman polttoaineen kulutusta ja lämmön tuottoa jäähdytysjärjestelmään. Pakokaasujen takaisinkierrätys vaikuttaa myös negatiivisesti moottorin hiukkaspäästöihin ja yli-ilmakertoimeen, ja siksi moottori joudutaan usein varustamaan verrattain kalliilla, pakoputkeen asennettavalla hiukkassuodattimella.

Taulukko 1.1 avaa NRE-päästövaatimusten voimassa olevaa vaiheen V tilaa eri teholuokissa.

Taulukko 1.1. EU:n alueella myytävien tieliikenteen ulkopuolella liikkuvien työkonoiden poltto-moottoreiden päästörajat teholuokittain, jossa typen oksidi (NO_x)-, hiukkas-, hiilimonoksidi (CO)- sekä hiilivetyypäästöt (HC) on määritelty. Vasemmalla vanhentunut vaihe IV. Oikealla koko tehoalueen sisältävä vaihe V, joka astui voimaan 1.1.2019 alkaen. Asetus ei koske bensiinimoottoreita

Tehoalue [kW]	Vaihe III / IV				Vaihe V			
	CO	HC	NO _x	Massa	CO	HC	NO _x	Massa
0..8					8,0	HC+NO _x < 7,5		0,4
8..19					6,6	HC+NO _x < 7,5		0,4
19..37	5,5	HC+NO _x < 7,5		0,6	5,0	HC+NO _x < 4,5		0,015
37..56	5,0	HC+NO _x < 7,5		0,025	5,0	HC+NO _x < 4,5		0,015
56..130	5,0	0,19	0,4	0,025	5,0	0,19	0,4	0,015
130..560	3,5	0,19	0,4	0,025	3,5	0,19	0,4	0,015
yli 560					3,5	0,19	3,5	0,015

Taulukosta 1.1 voidaan todeta, että viimeisimmässä päivityksessä rajoitusten ulkopuolella aiemmin olleet pienet ja isot teholuokat saavat omat päästörajansa. Hiukkasten painorajan lisäksi päivitys ottaa kantaa myös hiukkasten määrään, jotta kehitys ei johtaisi sellaisten menetelmien hyödyntämiseen, jotka tuottavat hyvin pieniä ja pienimassaisia, hengityselimille vaarallisia hiukkasia.

Henkilöautojen Euro 6-normin tapaan NRMM-päästövaatimukset eivät vielä koske kasvihuonekaasuksi luokiteltavaa hiilidioksidia (CO₂), jota hiilivetyjen palamisprosessissa aina syntyy. Se lisättäneen regulaation piiriin asetuksen seuraavassa vaiheessa.

2019 alusta voimaan tullessa vaiheessa V keskitehoalueen HC- ja NO_x-rajoja ei muutettu, joten luokkien moottoreiden puhdistustekniikkaan ei tarvitse tehdä dramaattisia muutoksia. Teholuokissa 19..560 kW hiukkasmäärää on pudotettu tuntuvasti, ja vaatimuksen täyttäminen edellyttäne poikkeuksetta moottorin varustamista pakoputkeen asennettavalla hiukkassuodattimella.

Teholuokkien 56..560 kW rajat ovat niin tiukat, että moottorivalmistajat joutunevat turvautumaan yhdistelmään, jossa hyödynnetään kaikkia kaupallisia pakokaasujenpuhdistuslaitteita. Päästönormien myötä typenoksidien ja pakokaasun pienhiukkasten määrää on vähennetty muutamaaan prosenttiin 15 vuoden takaisista vaatimuksista. Uusien vaatimusten myötä sekä hiukkasten että typen oksidien raja-arvot ovat jo niin matalia, että niiden luotettavasta mittaamisesta on tullut vaikeaa käytettävissä olevilla tekniikoilla.

Merkittävästi pienentyneet päästöt edesauttavat dieselin säilymistä työkoneiden primäärivoiman tuottajana sähköiselle propulsiolle, kunnes akkuihin tai vetyyn perustuvat järjestelmät ovat kaupallisesti laajemmin hyödynnettävissä.

1.4.2 Dieselin hyötysuhde ja häviöt

Diesel on ollut puoli vuosisataa käytetyin työkoneiden voimanlähde, vaikka dieselpolttonesteen ja bensiinin hintaeron kaventuminen on viime vuosina heikentänyt dieselin hintakilpailukykyä. Dieselpolttonesteessä on bensiiniä enemmän energiaa litraa kohti ja dieselmoottorin termodynaaminen prosessi on korkeamman puristussuhteen sekä imuilman vapaamman virtauksen ansiosta hyötysuhteeltaan bensiinimoottoria edellä.

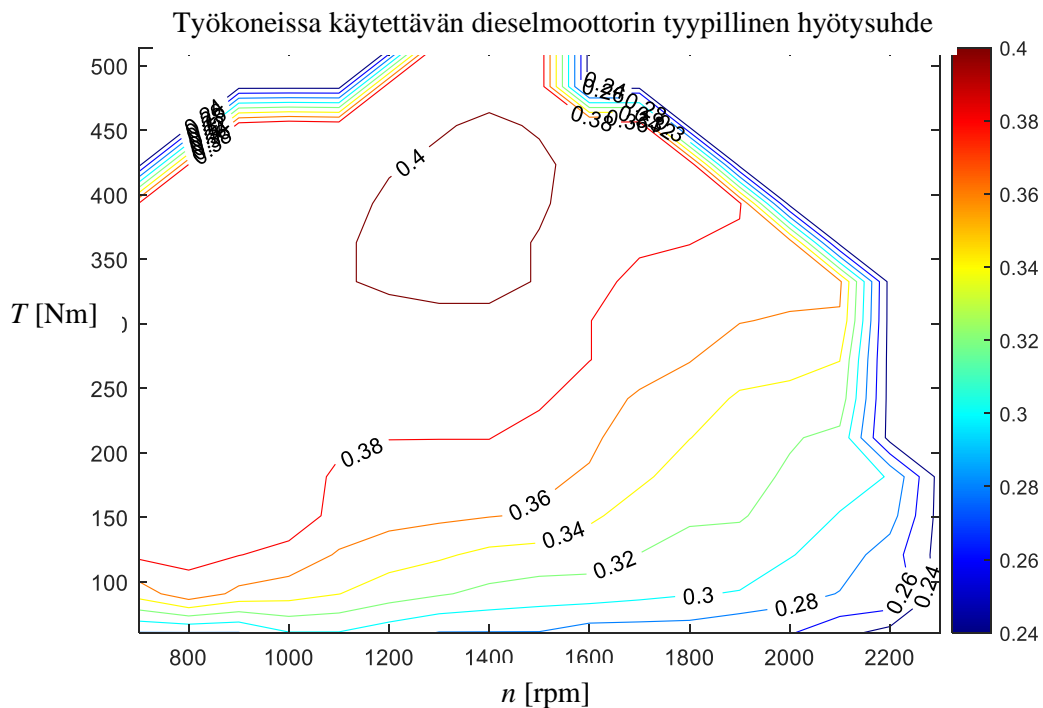
Dieselin huono maine on perua menneiden vuosikymmenien savuttavista liikennevälineistä ja työkoneista. Vanhojen dieselmoottorien typpi- ja hiukkaspäästöt muodostivat paikallista ilmanlaadun heikkenemää erityisesti suurkaupungeissa. Dieselmoottorin mainehaitta on pahentunut viime vuosina autonvalmistajien päästöhuujausten vuoksi. Esimerkiksi Volkswagen jäi kiinni päästöjen manipuloinnista (BBC, 2015). Seurauksena ihmiset ovat alkaneet vältellä dieselmoottoreita ja monet suurkaupungit ovat rajoittaneet, tai kieltäneet kokonaan dieselmoottoreiden käytön keskusta-alueillaan. Autonvalmistajat ovat vastanneet tähän ilmoittamalla tuotannon lopettamisesta tai supistamisesta, mikä saattaa lopulta osoittautua hätiköidyksi johtopäätökseksi.

Huonosta maineestaan huolimatta dieselillä on termodynaamisten kiertoprosessien joukossa paras hyötysuhde, joka työkonekokoluokan koneissa on tällä hetkellä 35...40 % haarukassa. Isoissa laivamoottoreissa hyötysuhde voi olla jo lähes 50 %. Noin 30%

dieselöljyn sisältämästä energiasta häviää pakokaasujen mukana. Vastaavasti 25..30% häviää jäähdytysnesteen kautta. (DieselNet).

Diesel on oikein mitoitettuna luotettava ja kestävä voimanlähde työkoneisiin. Työkoneen dieselillä päästään kuormituksesta ja huolloista riippuen noin 8000...10000 käyttötunnin lukemiin ennen peruskorjausta. Moottorin peruskorjauksen myötä käyttöaika voi olla jopa 20000 tuntia.

Kuva 1.1 esittää työkoneiluokan dieselmoottorin tyypillistä hyötysuhdekarttaa



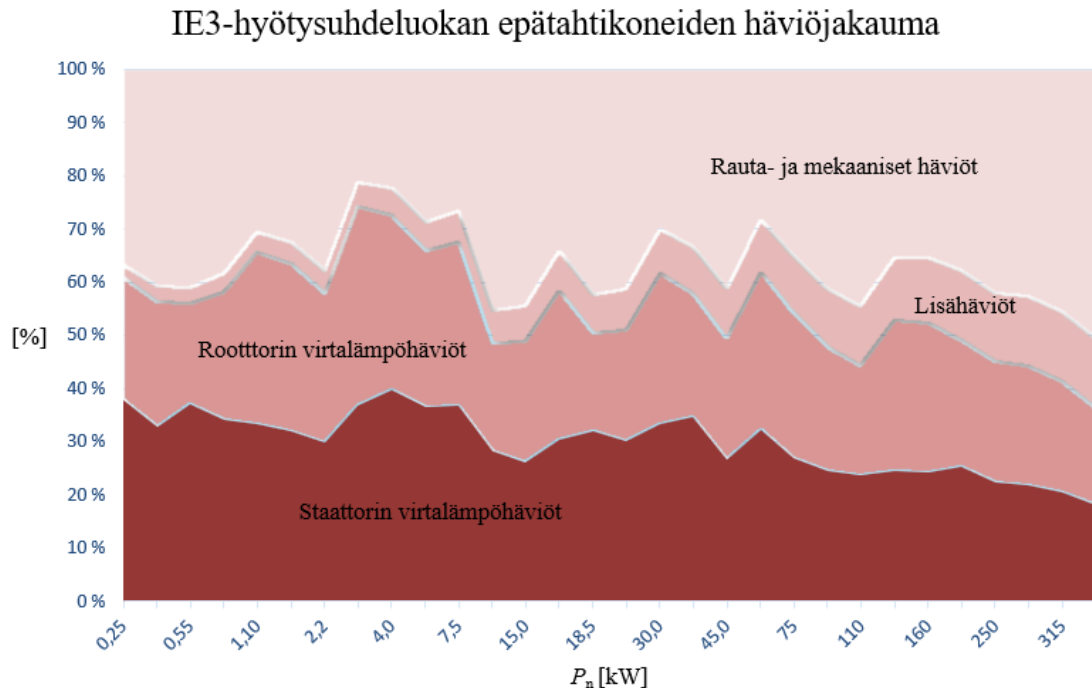
Kuva 1.1. Liikkuivissa työkoneissa käytettävän dieselmoottorin tyypillinen hyötysuhde n/T -koordinaatistossa. Parhaan hyötysuhteen toiminta-alue on hyvin kapea verrattuna sähkömoottoriin. Hyvän hyötysuhteen alue on koneen nimellisen hyötysuhteen huomioon ottaen kohtuullinen välillä 800..1800rpm (Immonen, 2013)

Traktorissa dieselmoottori joudutaan mitoittamaan huippukuormitustilanteisiin, vaikka suuri osa työskentelystä tapahtuukin osakuormituksella. Muissa työkoneissa on jo nähty erilaisia hybridiratkaisuja, jotka perustuvat voimanlähteen käytön optimointiin.

Hybridijärjestelmässä dieselmoottoria voidaan koneen koosta ja sovelluksesta riippuen pienentää aiempaan dieselmoottoriin verrattuna. Pienempi dieselmoottori toimii suppeammalla tehoalueella, joka voidaan optimoida parhaalle hyötysuhdealueelle. Toteutuva primäärienergian säästö on työkonetyyppikohtainen ja vaihtelee luonnollisesti työsykliin mukaan. (Immonen, 2018).

1.4.3 Sähkömoottorin hyötysuhde ja häviöt

Yleisesti sähkökoneen häviöitä voidaan ajatella riippuvaiseksi joko koneen tehosta tai nopeudesta, mutta myös koneen koolla on merkittävä vaikutus häviöjakaumaan. Kuva 1.2 esittää ABB:n IE3-luokan epätahtikoneiden häviöiden suhteellisia osuuksia nimellistehon funktiona.



Kuva 1.2. ABB:n IE3-hyötysuhdeluokan nelinapaiselle ($p = 2$) täysin suljetulle tuuletinjäähdytteiselle (IC411), M3BP -sarjan epätahtikoneelle tyypillinen häviöjakauma. Arvot on laskettu iteroimalla häviökomponenttien suhteellisarvot koneiden datalehdistä. Staattorin ja roottorin virtalämpöhäviöt dominoivat pieniä ja keskisuuria koneita. Mekaanisin häviöihin sisältyy tuuletin- ja laakerointihäviöt Rautahäviöiden osuus kasvaa tasaisesti koneen fyysisen koon mukana. x-akselilla moottoriteho $P_n = 0,25..315$ kW. y-akselilla häviöjakauma. Koneiden napapariluku $p = 2$ ja taajuus $f = 50$ Hz.

Yleisesti epätahtikoneella sekä staattorin että roottorin virtalämpöhäviöt kasvavat eksponentiaalisesti kuormituksen kasvaessa. Virtalämpöhäviöiden suhteelliset osuudet lähestyvät toisiaan tehon kasvaessa, mutta staattorin virta sisältää aina koneen tarvitseman magnetomotorisen voiman ylläpitämiseksi magnetointivirran.

Epätahtikoneessa roottorivirtaa tarvitaan vääntömomentin synnyttämiseksi Lorentzin voiman mukaan. Se kasvaa likimäärin lineaarisesti koneen jättämän kanssa maksimivääntömomenttiin asti. Myös koneen toimintalämpötilalla on vaikutusta virtalämpöhäviöiden syntyyn, sillä kuparin ja alumiinin resistanssit kasvavat lämpötilan funktiona.

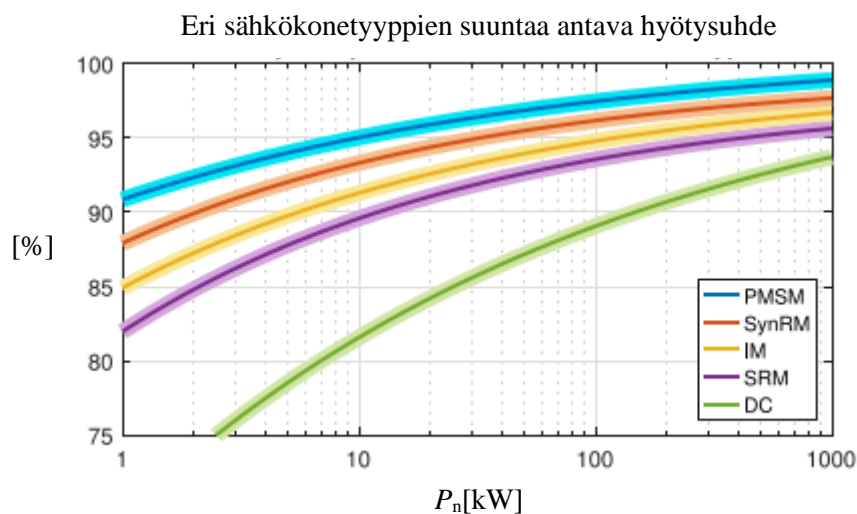
Kehänopeuden neliössä kasvavat mekaaniset häviöt koostuvat koneen laakereista ja roottorin kohtaamasta ilmanvastuksesta koneen ilmapälissä. Mobiilikäyttöissä koneen akselille asennettuja tuulettimia ei yleensä esiinny, koska koneelta voidaan vaatia pitkiä toiminta-aikoja hyvin pienellä nopeudella ja suurella väännöllä, jolloin akselipuhaltimeen perustuva jäähdytys ei toimi.

Magneettiipiirin rautaosissa tapahtuvat häviöt ovat vuontiheyden huippuarvon neliön ohella riippuvaisia sähkölevyn paksuudesta, urien muodosta ja koosta sekä moottoria syöttävästä taajuudesta. Nopeussäädettyjen käyttöjen tapauksessa pulssinleveysmodulointi syöttöjännite sekä moottorin hajaannuksen suodattama virta sisältävät perusaallon lisäksi yliaaltoja, jotka aiheuttavat suurempia kokonaishäviöitä sinimuotoisella verkko- taajuudella pyöriviin koneisiin verrattuna. Näillä on suurempi vaikutus paitsi mekaniikkiin, myös magneettiipiirissä tapahtuviin tila- ja aikaharmonisiin häviöihin. (Boldea & Nasar, 2002b).

Lisähäviöt kasvavat lineaarisesti tehon mukana. Lisähäviöitä syntyy staattorivuon hajaannuksen kulkiessa koneen magneettiipiiriin kuulumattomissa osissa. Esimerkiksi staattorinkäämin vyyhdenpäät indusoivat koneen rautaosiin lisähäviöitä. Lisähäviöitä syntyy myös staattorin ja roottorin selässä. Myös käämityksissä tapahtuva virranahtoilmiö sekä ilmapälän urituksen luomat häviöt luokitellaan lisähäviöiksi.

Lisähäviöt määritellään yleensä kokemuseräisesti konetyyppikohtaisella vakiokertoimella, joka vaihtelee magneettiipiirin ja koneen koon mukaan 0,05..2% välillä.

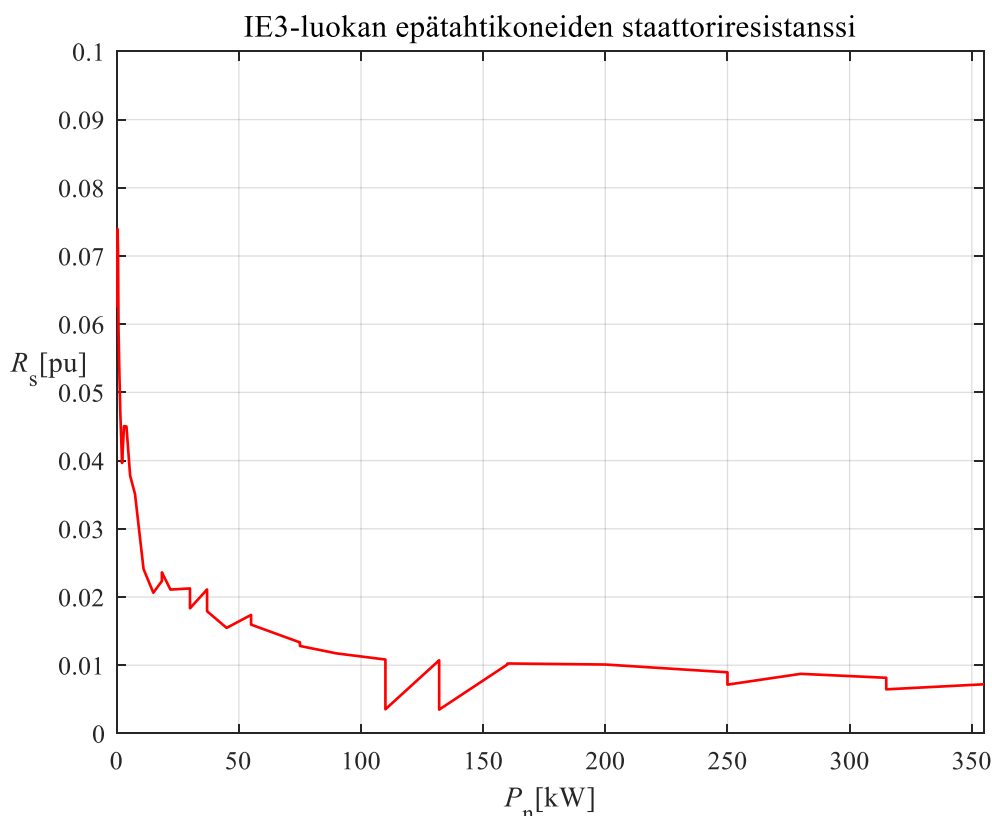
Eri sähkökonetyyppien suuntaa antavia hyötysuhteita voi tarkastella kuvasta 1.3.



Kuva 1.3. IEC 60034-1 sähkökonestandardia mukaileva nimellispisteen hyötysuhde moottoritehon funktiona. (ISEA, 2019)

Kuvasta 1.3 huomataan pienten koneiden hyötysuhteen olevan merkittävästi isoja koneita heikompi. Pienillä koneilla staattorikämeissä käämikierroksille on vähemmän tilaa ja käämilanka on ohuempaa. Pienemmän käämilangan suuremman virrantiheyden vuoksi staattorihäviöt nousevat pienissä koneissa verrattain suuriksi.

Ilmiö voidaan havaita kuvasta 1.4, joka sisältää ABB Oy:n ilmajäähdytteisten (IC411) IE3 -hyötysuhdeluokan staattoriresistanssin suhteellisarvoesityksenä.



Kuva 1.4 ABB M3BP-sarjan IC411-jäähdytettyjen epätahtikoneiden staattoriresistanssi, kun kone-teho vaihtelee 0,25..355kW. Koneiden hyötysuhdeluokka on IE3, napapariluku $p = 2$ ja taajuus $f = 50\text{Hz}$.

Pienillä koneilla myös roottorin säde on luonnollisesti pieni, jolloin vääntömomentin tuotto on heikkoa. Suurella roottorisäteellä ja pienellä virtasummalla saadaan vääntömomenttia pienemmin häviöin.

1.4.4 Voimansiirto

Moderneissa traktoreissa käytetään tyypillisesti joko powershift -tyyppistä mekaanista vaihteistoa tai portaatonta (CVT, IVT) vaihteistoa, jossa voima siirtyy rinnakkain hydraulista ja mekaanista reittiä pitkin.

Powershift-vaihteistossa välitystä vaihdetaan yleensä sähköhydraulisesti valintavivulla ja vetoon tulee pieni katko, vaikka vaihtamiseen käytettäisiinkin rinnakkaisia

monilevykytkimiä. Portaattomassa vaihteistossa tarkoituksena on optimoida tehon ja vääntömomentin jakauma mekaanisen ja hydraulisen voimansiirron väillä siten, että dieselmoottori kävisi mahdollisimman taloudellisella pyörimisnopeusalueella.

Polttomoottorin melko kapean nopeusalueen ja traktorin rajusti vaihtelevan vetovoimantarpeen vuoksi powershift-vaihteistoissa on tyypillisesti paljon vaihteita, jotta traktorille voidaan valita raskaisiin töihin mahdollisimman hyvä välityssuhde moottorin suurimmalla tehon alueella.

Taulukossa 1.2 esitellään eri valmistajien powershift-vaihteistojen vaihteiden lukumäärää.

Taulukko 1.2. Eri valmistajien vaihteiden lukumäärän jakauma Powershift -tyyppisillä vaihteistoilla 120 kW kokoluokassa (Koneviesti, 2021).

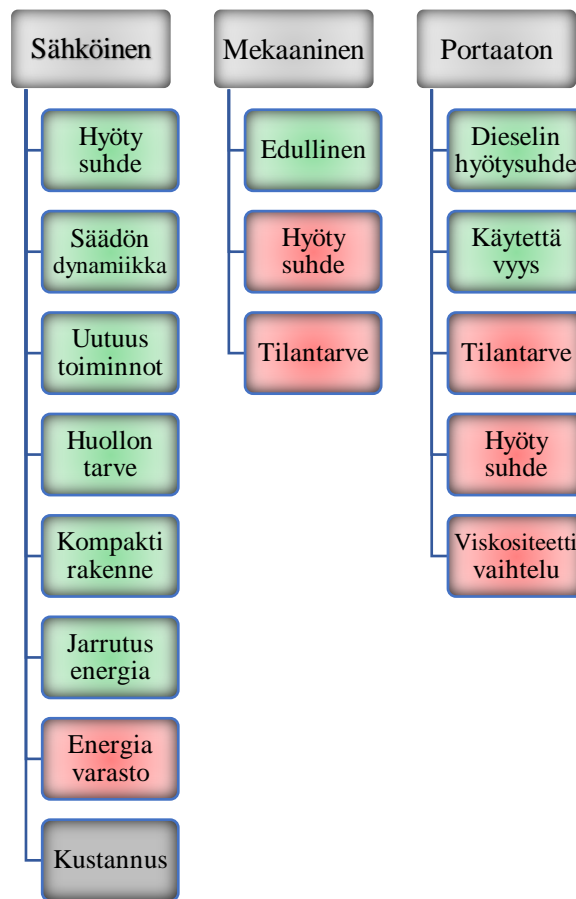
Valmistaja	Kauppanimi	Alue	Pää	Pika	Yhteensä
Claas	Hexashift	4		6	24
John Deere	CommandQuad	6		4	24
Massey Ferguson	Dyna-6	4		6	24
McCormick	ArgoTractors	4	4	3	48
New Holland	DynamicCommand	3		8	24
Valtra	VERSU	4		5	20
Zetor	Powershift	2	5	3	30

Täysin mekaanisessa voimansiirrosta vaihteiston hyötysuhde heikkenee lukuisten hammaspyöräkontaktien ja vaihteiston eri osissa kiertävän voiteluöljyn vatkauhäviöiden vuoksi. CVT-vaihteistossa hydrostaattisen variaattorin käyttö lisää häviöitä ja on altis öljyn viskositeettimuutoksille.

Sähköinen voimansiirto voidaan traktorin tapauksessa rakentaa yhdellä planeettapyörästöllä, jolloin vaihdemoottorin hyötysuhde nousee yli 90 %:n. LUT:n InHugor-prototyypin raportoitu hyötysuhde oli yli 93 % (Montonen, 2017).

Ääritapauksessa sähköinen voimansiirto olisi mahdollista rakentaa ilman vaihdettavia välilyksii. Rakenne edellyttäisi kentänheikennysalueen maksimaalista hyödyntämistä, koneen jäähtymisen optimointia äärimmilleen sekä ajomoottorin ja invertterin erittäin järeää mitoitusta.

Sähköisen voimansiirron etuja mekaaniseen powershift sekä portaattomaan vaihteistoon verrattuna on esitelty lyhyesti kuvassa 1.5. Hydrodynamista voimansiirtoa ei ole otettu huomioon, koska sitä ei traktoreissa juuri käytetä.



Kuva 1.5. Traktorin sähköisen ja perinteisten voimalinjojen suuntaa antava vertailu, jossa vihreä väri merkitsee edullista ominaisuutta ja punainen negatiivista. Harmaa merkitsee neutraalia ominaisuutta.

Sähköinen voimalinja on kokonaishyötysuhteeltaan parempi, mutta yksittäisen komponentin hyötysuhteen asemesta on syytä tarkastella voimansiirron kokonaishyötysuhdetta primäärienergiankulutukseen vertailukelpoista mittayksikköä kohti, esimerkiksi g/kWh.

Sähköinen voimalinja on dynamiikaltaan erinomainen ja tarjoaa mahdollisuuden edistyneisiin käyttäjä- monitorointi- sekä diagnostiikkatoimintoihin sekä kykenee kaksisuuntaisen energiavaraston kanssa ottamaan tarvittaessa jarrutusenergiaa talteen.

Sähköisellä voimalinjalla on potentiaalia olla jatkossa myös kustannustehokkaampi perinteisiin voimansiirtoihin verrattuna, mutta kustannus on vahvasti riippuvainen energiavarastosta. Toistaiseksi sähköisten energiavarastojen energiatiheys asettaa rajoitteen sähköisen voimalinjan kaupalliselle hyödyntämiselle.

Modernien traktorien vaihteistoissa suunnanvaihto toteutetaan tyypillisesti erillisen, vaihteiston ulkopuolisen suunnanvaihtoyksikön avulla. Näin saadaan identtinen määrä vaihteita traktorin molempiin kulkusuuntiin. Suunnanvaihto toteutetaan pääakseli-sivuakseli

-rakenteella tai planeettapyörästöllä. Hydrostaattiyksiköllä ajosuuntaa muutetaan asettamalla pumpun ohjauskulma negatiiviseksi.

Sähköisen ajomoottorin tapauksessa suunnanvaihto on äärimmäisen yksinkertaista. Ajosuuntaa vaihdetaan puolijohdetehokytkimien modulointia muuttamalla siten, että moottorin staattorikäänivuon summavektori alkaa pyöriä vastakkaiseen suuntaan.

Powershift - sekä CVT-vaihteistot vievät traktorin alustasta merkittävän tilavuuden. Kes-
tomagneettitahtikoneen roottorin sisälle rakennettu alennusvaihde on kompakti kokonaisuus, jolla perinteisen vaihteen- ja suunnanvaihdon vaatimasta tilavarauksesta jää merkittävä osa käyttämättä.

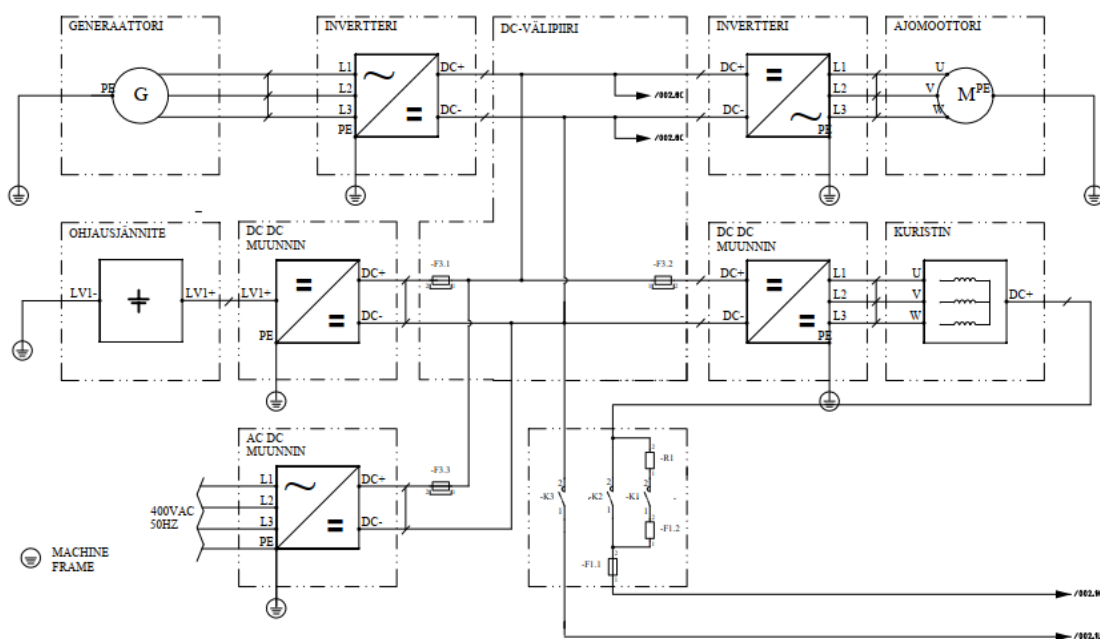
1.4.5 Muut mahdollisuudet

Traktorin ajovoimansiirron sähköistäminen tarjoaa myös järjestelmätason mahdollisuuksia, joita voidaan hyödyntää esimerkiksi traktorin työkonoiden ohjauksessa. POWERBUS- topologiassa dieselgeneraattorin tai energiavaraston syöttämää jännitettä jaetaan ajomoottorin lisäksi pistokeliitännäisille työkoneille. Taajuusmuuttajalla ohjattu työkonon sähkömoottori on ohjattavuudeltaan ja dynaamisten ominaisuuksien ansiosta ylivoimainen verrattuna perinteiseen voiman ulosottoon, jossa akselin nopeus on riippuvainen polttomoottorin nopeudesta.

Traktorin suurimmat apulaitteet, esimerkiksi jäähdytysjärjestelmän puhallin ja ilmastoinnin kompressori vaativat myös verrattain paljon tehoa. Tehoelektroniikka ja korkea jännitetaso tarjoavat uusia mahdollisuuksia näiden aiempaa tehokkaampaan ja kompaktimpaan hyödyntämiseen.

Sähkötekniikan hyödyntäminen tarjoaa mahdollisuuksia myös hydraulijärjestelmän uudistamiselle. Käyttöhydrauliikkajärjestelmän rekuperaatiolla olisi saatavissa potentiaalisia säästöjä, sillä nykyisin taakankäsittelyssä piilevä potentiaalienergia hukataan enimmäkseen lämmöksi. (Immonen, 2008). Toisaalta traktorin tapauksessa talteenottojärjestelmien potentiaalia voi olla lopulta vaikea kaupallistaa. Traktorin monipuolisista työtehtävistä johtuen hydraulista rekuperaatiota voitaisiin hyödyntää vaihtelevin tuloksin lähinnä etukuormaan kanssa.

Traktorin sähköistämisen mahdollisuuksia on havainnollistettu esimerkinomaisesti kuvassa 1.6.



Kuva 1.6. Esimerkinomainen näkemys traktorin sarjahybriditopologian mukaisesta POWERBUS -korkeajännitejärjestelmästä. Generaattorin syöttämä vaihtojännite tasasuunnataan yhteiseen DC välipiiriin. Tasajännitettä jaetaan ajomoottorin lisäksi traktorin pistokeliitäntäisille työkoneille ja mahdollisesti suuritehoisimmille apulaitteille. Esimerkki sisältää myös pienjännitteisen ohjausjännitejärjestelmän latausmahdollisuuden. Kuormitusta tasaavana energiavarastona järjestelmässä on akusto, jonka haaraan on asennettu DC-DC -konverterti. Primäärienergianlähteenä voi vaihtoehtoisesti toimia myös esimerkiksi polttokenno. Laitteiden välinen kommunikaatio tapahtuu CAN-protokollan mukaisesti ISOBUS-väylää pitkin. Työkoneita ja akustoa ei esitetä kuvassa.

1.5 Toimintamallit

Primäärienergiavaraston tuomien rajoitusten vuoksi traktorivalmistajat ovat aivan pienempiä puutarhatraktoreita lukuun ottamatta keskittyneet prototyyppien ja toimintamallien rakentamiseen. Tarkastellaan seuraavaksi muutamia 2000-luvulla esiteltyjä ratkaisuja.

1.5.1 Eltrac 135

Ensimmäinen sähköavusteisen traktorin prototyyppi rakennettiin 1998 saksalaisen Roland Schmetzin toimesta. New Holland M135 traktorin runkoon rakennetussa Eltrac-sarjahybridissä 100kW dieselmoottori pyöritti 6-napaista 500VAC generaattoria, joka oli sarjakytkeettynä 4-napaisten 100 kW teholtaan olevan epätahtikoneen kanssa.

Ulkoisesti magnetoidun, ilmajäähdytteisen generaattorin jännite tasasuunnattiin 6-pulssisella diodisillalla invertterin välipiiriin, josta teho siirrettiin edelleen moduloimalla jännitettä IGBT-kytkimillä nestejäähdytteisellä ajomoottorille.

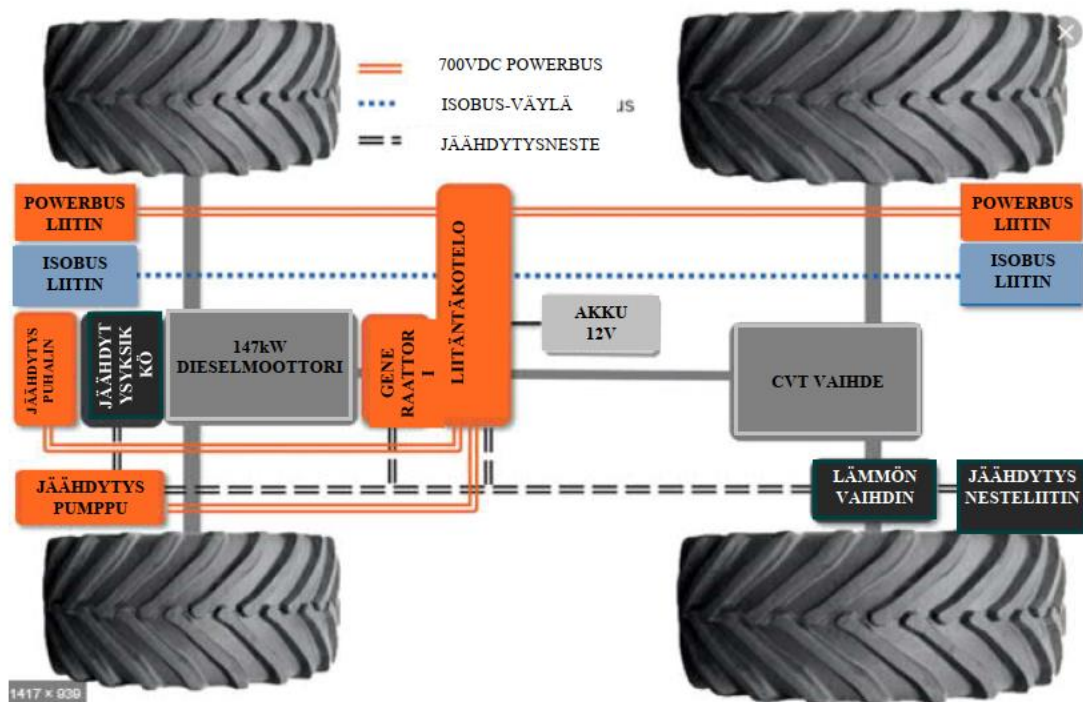
Kaksiportaisessa vaihteistossa oli yksi synkronisesti vaihdettava välitys. Alennetulla välityksellä ajonopeus oli 0..15 km/h ja suoralla vaihteella 0..40 km/h. PTO-akselilla oli suora yhteys dieselmoottoriin onton voimansiirtoakselin lävitse. Traktorin tehoelektronikka oli asennettu traktorin katolla olevaa erilliseen laitekoteloon (Amistat, 2019)

1.5.2 Fendt X-Concept

AGCO-konserniin kuuluva Fendt on rakentanut X-Concept prototyypin. Vuonna 2013 Agritechnica-messuilla esitellyssä X Concept-mallissa traktorin voimansiirtojärjestelmänä toimii Fendtin patentoitu, hydrodynaaminen VarioDrive, mutta moottorin ja voimansiirron väliin on asennettu taajuusmuuttajakäyttöinen generaattori.

Generaattorilla syötetään 700V tasajännitettä suuritehoisimmille apulaitteille sekä edessä ja takana olevien pistokkeiden kautta työkoneille perinteisen hydraulisen tehon tai mekaanisen tehon ulosoton lisäksi. Työkoneissa olevia inverttereitä ohjataan erillisen pistokkeen kautta kulkevan ISOBUS-väylän välityksellä.

X-Concept jäi yksittäiseksi toimintamalliksi, mutta siinä koeteltuja ratkaisuja nähtäneen sovellettuna Fendtin tulevilla malleilla.



Kuva 1.7. Fendt Concept X -prototyypin suurjännitejärjestelmän rakenne vuokaavioesityksenä. Dieselmoottori pyörittää 130 kW generaattoria. 700 VDC tasasuunnattu jännite jaetaan suuritehoisimpien apulaitteiden lisäksi traktorin edessä ja takana oleville työkoneille pistokkeiden kautta. Traktorin 12 VDC järjestelmän akkua ladataan välipiiriin kytketyllä DC/DC-konverterterilla. Työkoneissa olevia inverttereitä ohjataan erillisen pistokkeen kautta kulkevan

ISOBUS-väylän välityksellä. Myös jäähdytysnestekierto on integroitavissa työkoneeseen taakse (AGCO. Fendt X-Concept).

1.5.3 John Deere SESAM

John Deere esitteli vuonna 2016 oman tutkielmansa. Ensimmäisessä täyssähköisessä SESAM-toimintamallissa Direct Drive -kaksoiskytkinvaihteiston etupuolelle on kiinnitetty sähkömoottori ja energiavarastona toimii 130 kWh litiumioniakusto.

6R-sarjan runkoon rakennetusta traktorista saa 150 kW jatkuvaa tehoa. Konetilaan upotettu 130 kWh akusto riittää valmistajan ilmoituksen mukaan 3-4 tunnin työskentelyyn pellolla tai vastaavasti 50 km mittaiseen siirtoajoon kuormitettuna.

Akun kestoiksi mainittiin esittelyn aikaan noin 3000 lataussykliä ja tyhjän akuston ilmoitettiin latautuvan täyteen noin kolmessa tunnissa.

1.5.4 John Deere eAutoPowr

John Deere esitteli vuonna 2019 Agritechnica messuilla palkitun eAutoPowr-järjestelmän. John Deeren ratkaisussa CVT-tyyppisen vaihteiston hydrostaattinen tehon välitys on korvattu generaattori-moottori-yksiköllä.

Invertteriohjattu generaattori-moottori-linja on dynaamiselta vasteeltaan nopeampi sekä hyötysuhteeltaan hieman parempi kuin CVT:ssä yleisesti hyödynnetty hydrostaattinen variaattori, joka kärsii hieman myös kylmän öljyn viskositeetista.

Vaihteiston ohjausfilosofia poikkeaa hieman Deeren perinteisen IVT-vaihteiston ohjauksesta, jossa hydrostaatin osuus on maksimissaan 60%. Uudessa eAutoPowr-vaihteistossa sähköisen linjan osuus nollanopeuden tuntumassa voi olla osakuormituksella 100%.

Generaattorilla voidaan tarvittaessa syöttää kolmivaihejännitettä myös traktorin työkoneeseen eli implementtiin 100 kW maksimiteholla. eAutoPower-konseptin yhteydessä Deere on tutkinut tasaisemmin jakautuvan vetovoiman tuomia etuja yhdessä työkonevalmistaja Joskinin kanssa. (VDI-MEG, 2019)

1.5.5 Fendt e100 Vario

Fendtin e100 Vario on pienen kokoluokan täyssähköinen traktori, jossa energianlähteenä on 100 kWh litiumioniakku. Ajomoottorien yhteenlaskettu jatkuva teho on noin 50 kW luokkaa, mutta niitä voidaan hetkellisesti kuormittaa 150 kW teholla. Valmistaja ilmoittaa traktorille 4-5 tunnin työskentelyajan normaaliolosuhteissa.

Akun latauksessa voidaan käyttää joko 22 kW / 400 V / 32 A kolmivaiheista tai 140 kW / 700 V / 200 A, suoraan DC-piiriin liittyvää pikalaturia. 22 kW teholla akku täytyy noin viidessä tunnissa. Pikalaturilla akku latautuu 80 prosenttiin nimellisvarauksesta noin 40 minuutin aikana.

Traktorin etu- ja takanostolaitteisiin voidaan liittää pienikokoisia työkoneita, joita voidaan käyttää X Concept -mallin tavoin sekä hydraulisesti että POWERBUS-pistokkeen kautta.

Fendt e100 Vario -traktori on kokeellinen tuotantomalli, mutta valmistusmäärästä ei julkisesti ole saatavilla tarkempaa tietoa.



Kuva 1.8. Akkukäyttöinen täyssähkötraktori Fendt eVario (AGCO. e100 Vario).

1.6 Vaihtoehdot traktorin ajomoottoriksi

Työkoneen ajomoottoriksi on tarjolla lukuisia joukko mahdollisuuksia, ja valintaprosessissa päädytään koneen ominaisuuksien osalta aina kompromissiin. Koneelta edellytettävän suorituskyvyn ja hyötysuhteen lisäksi iterointiprosessissa on otettava huomioon myös koneen fyysiset dimensiot ja aktiiviosien massa. Sähkökoneen maltillista kokoa ja kohtuullista painoa korostetaan syystä, varsinkin jos niitä on useampia.

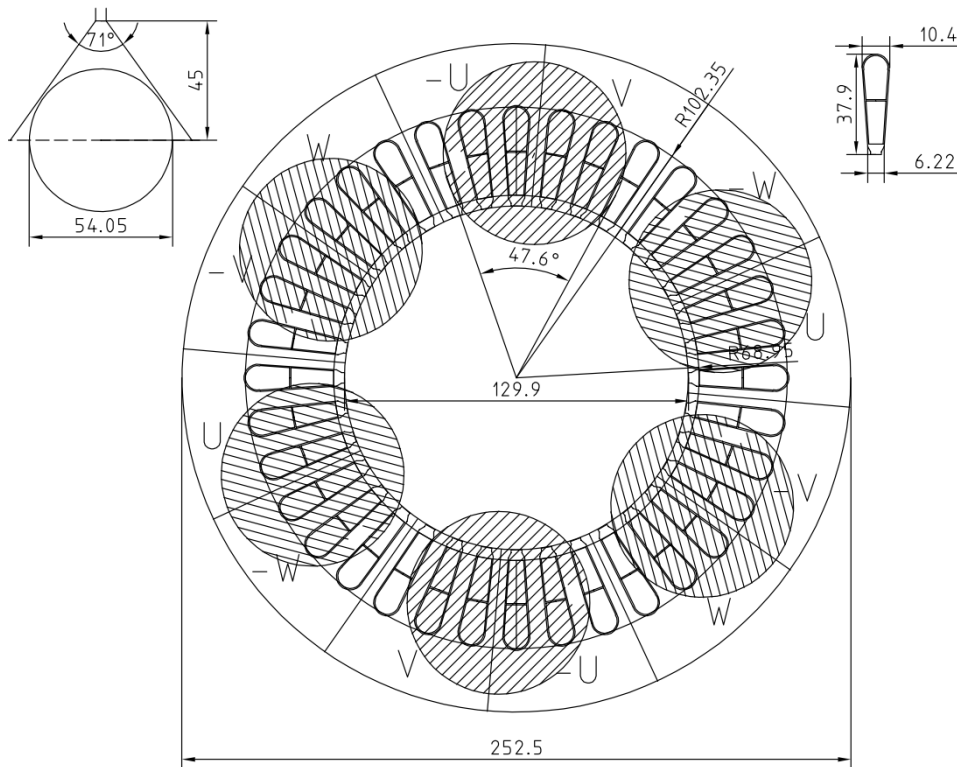
Mobiilikäytöissä koneiden korkea tangentiaalinen jännitys edellyttää poikkeuksetta nestemäiseen konvektioon perustuvaa jäähdytystä, jossa väliaineena hyödynnetään usein vesi-glykoli -seosta tai öljyä.

Traktorissa sähkökoneen öljyjäähdytys on tietyin reunaehdoin toteutettuna ihanteellinen vaihtoehto, koska öljyä joudutaan joka tapauksessa käyttämään voimansiirron mekaanisten osien voiteluun. Vaihteistoöljyjen johtavuus on tyypillisesti luokkaa 80..120 nS/m.

Eristävä ominaisuus tuo mukanaan mahdollisuuksia integroidun vaihdemoottoripaketin mekaaniseen suunnitteluun.

Öljyjäähdytystä voidaan hyödyntää perinteisestä nestejäähdytyksestä tutulla vaippakonvektiolla, ruiskuttamalla öljyä esimerkiksi staattorin vyyhdenpäihin tai järjestämällä monimutkaisempi, koneen sisäinen kanavointi.

Kuva 1.9 esittää alustavan pinta-ala-tarkastelun epätahtikoneen staattorikäänin vyyhdenpäiden jäähdytyksestä.



Kuva 1.9. Esimerkinomainen tarkastelu vyyhdenpäiden öljyjäähdytyksestä, kun suuttimia on kuusi kappaletta. Menetelmä on äärimmäisen houkutteleva ns. hiuspinnikäälityksen kanssa, jossa lämpö johtuu tasaisemmin pyörölänkakäämiin verrattuna.

Staattori voidaan myös upottaa kokonaan öljykylpyyn asentamalla ilmaväliin epämagneettinen, ohut putki.

Avonapaisen koneen voisi teoriassa jäähdyttää vaikka ilmaväliin johdetavalla kaasulla, mutta ratkaisu ei sellaisenaan sovellu käytettäväksi mobiilikäyttöissä.

Ajomootorilla pitää olla hyvät kentänheikennysominaisuudet, jotta sähkömoottorin rakenteellinen etumatka polttomoottoriin tulisi täysimääräisesti hyödynnettyä.

Järjestelmätasolla konetta ohjaava tehoelektroniikka sekä nopeuden takaisinkytkentä on otettava huomioon. Erityisesti nollanopeusalue on työkonoiden kannalta kriittinen, josta selviytyäkseen työkonoiden ajomootoreilta vaaditaan takaisinkytkentä roottorin

asennosta. Lisäksi invertterit on lähes poikkeuksetta ylimitoitettava, jotta ne pystyvät tuottamaan työkonikäytössä tarvittavan vääntömomentin nollanopeuden tuntumassa.

Tarkastellaan seuraavaksi muutamia vaihtoehtoja traktorin sähköiseksi ajomoottoriksi. Tarkasteluun on sisällytetty potentiaalisimmat vaihtoehdot. Tasavirtakone on mukana pitkän historiansa vuoksi.

1.6.1 Tasavirtakone

Erilaisia tasavirtakoneita on käytetty pitkään liikennevälinesovelluksissa sekä ajomoottoreina että apulaitteiden moottoreina. Ensimmäiset sähköautot liikkuvat hiiliharjallisen tasavirtakoneen voimin, koska vaihtovirtamoottorin tehokkaaseen nopeuden säätöön tarvittavaa tehoelektroniikkaa ei ollut käytettävissä.

Täysin kompensoitu tasavirtakone on sähköisiltä ominaisuuksiltaan erinomainen, koska sähkökoneissa yleisesti sovellettu Blondellin ristikenttäperiaate toteutuu koneen rakenteessa luonnostaan (Pyökäri, 1971). Näin sitä on erittäin helppo säätää ja ohjaamiseen käytetty elektroniikka on verraten yksinkertaista. Tasavirtakone onkin ollut vaativien sähkökäyttöjen suvereeni ykkönen aina 1990-luvulle asti, kunnes digitaalitekniikan ja pakkokommutoitujen tehokytkimien kehitys mahdollistivat vaihtovirtakoneiden tehokkaamman ja tarkemman säädön.

Tasavirtakoneen huonoja ominaisuuksia ovat sen jatkuva hiiliharjojen ja kommutaattorin huollon tarve. Lisäksi tasavirtakoneen hyötysuhde jää lukuisten käämitysten vuoksi vaihtovirtakoneita selkeästi heikommaksi. Tyypillisen ajomoottorin tehoisen tasavirtakoneen hyötysuhde on 85..90 prosentin luokkaa.

Tasavirtakone on jäänyt sähkökäyttöissä hieman taka-alalle 1990-luvun AC-nousun myötä. Hiiliharjaton versio säilyttäneenä asemansa ajoneuvojen ja työkoneneiden ohjausjännitetasoissa pienitehoisissa sovelluksissa.

1.6.2 Epätahtikone

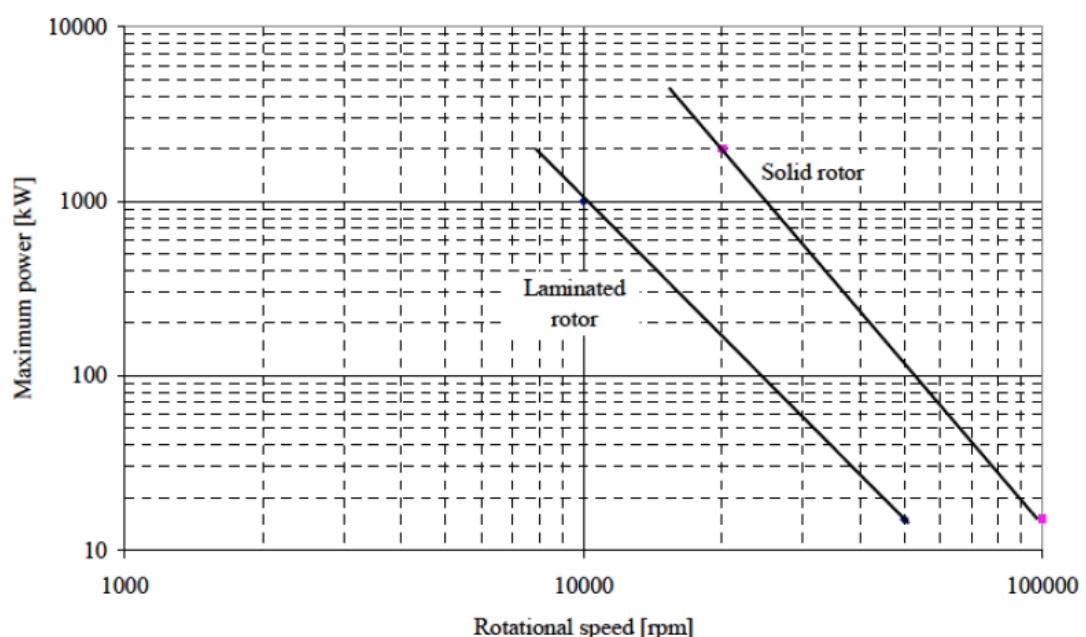
Täysin suljettu ilmajäähdytteinen epätahtikone on ollut teollisuudessa käytetyin sähkökonetyyppi jo vuosikymmenet. Sen erinomainen vääntömomentin tuottokyky, yksinkertainen ja vähän huoltoa vaativa rakenne yhdistettynä edulliseen hintaan tekevät epätahtikoneesta teollisuuden todellisen työhevosen (Pyrhönen, 2016)

Epätahtikone oli myös ensimmäinen, moderneihin sähköajoneuvoihin implementoitu konetyyppi. Sekä General Electricin EV1 että Teslan Roadster -malleissa on ajomoottorina epätahtikone.

Epätahtikoneen nimi tulee roottorin mekaanisen pyörimisnopeuden ja staattorikäimivuon nopeuserosta. Epätahtikoneessa roottori pyörii jättämän verran hitaammin kuin staattorissa tahtinopeudella pyörivä magneettikenttä.

Epätahtimoottori on myös ainoa kiertokenttäkone, joka on luonnolliselta rakenteeltaan itsestään verkkoon käynnistyvä. Ominaisuus saadaan aikaan häkkikäimityksellä, joka on oikosuljettu molemmista päistään oikosulkurenkaalla. Pyörivä staattorivuo saa aikaan Faradayn induktiolain ja Lentzin lain synnyttämänä vuon muutosta vastustavan virran häkkikäimin sauvassa, joka Lorentzin voimalain mukaan synnyttää yhdessä yhteisen ilmavälivuon avulla voiman, joka roottorin säteellä kerrottuna muodostaa momenttia. Roottorin päässä olevan renkaan oikosulkema virta kiertää myös vastakkaisessa häkin sauvassa, aiheuttaen voiman vastakkaiseen suuntaan mutta momentin samaan suuntaan roottorin toisella reunalla. Näin syntyy voimaparin momentti eli vääntömomentti, jossa roottorin sauvoihin syntyvät voimat kumoutuvat ja puhdas vääntömomentti jää jäljelle. Todellisessa häkkikäimityksessä on useita sauvoja, jotka kokonaisuutena synnyttävät roottorin vääntömomentin.

Epätahtimoottorin umpinainen rakenne on dynaamisesti edullinen ja sallii verrattain korkeita kehänopeuksia laminoidullakin roottorirakenteella. Kuvassa 1.10 on suuntaa antava näkemys roottorirakenteen asettamista rajoituksista,

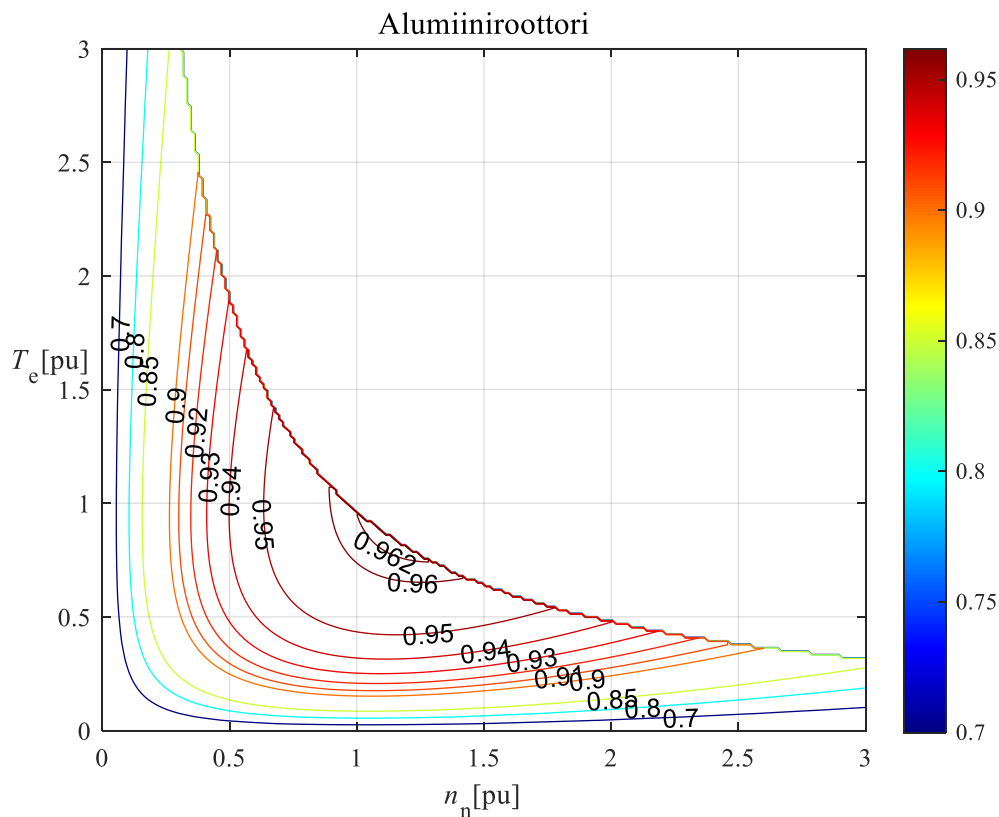


Kuva 1.10. Epätahtimoottorin suuntaa antava maksimiteho pyörimisnopeuden funktiona, kun varmuusmarginaali on $\kappa_\sigma = 20\%$ ja roottoriteräksen myötöraja $\sigma_{\text{yield}} = 700\text{ MPa}$. Kuvaaja ei voi sellaisenaan soveltaa mobiilikäyttöihin, jossa koneilla ei varsinaisesti tulkita olevan nimellistä toimintapistettä, vaan jäähtyminen rajoittaa kuormitettavuutta. Kuvaaja ei myöskään ota huomioon koneen staattoriin vaikuttavia voimia, jotka saattavat rajoittaa koneen pyörimisnopeutta (Jokinen, 1988)

Epätahtikone soveltuu rakenteellisiin reunaehdoin myös nopeussäädettyyn käyttöön. Skaalaarisäädettynä ohjattu epätahtikone toteuttaa yksinkertaisimman kiertokenttäkoneen säätökäytön, mutta koneen jättämä vaikeuttaa säätöä pyrittäessä vaativampaan suorituskykyyn esimerkiksi vektorisäädöllä. Tällöin aivan nollassa nopeuteen asti pyrittäessä epätahtikone vaatii takaisinkytkennän roottorin asennosta.

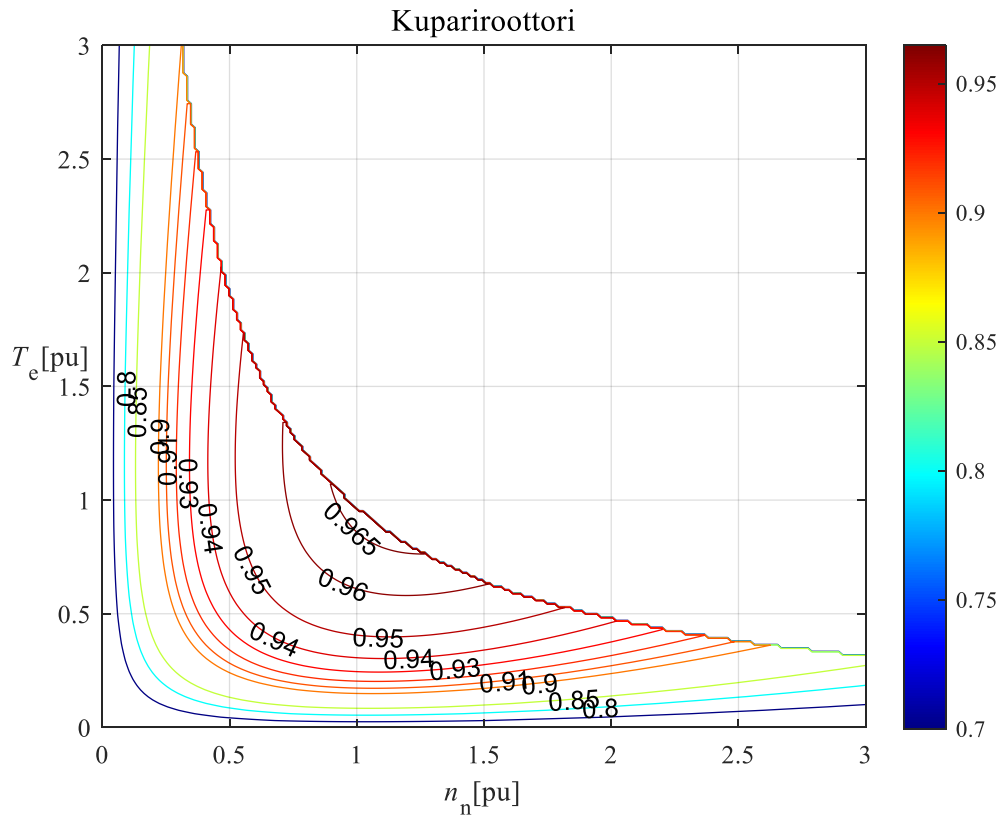
Epätahtimoottorista on mahdollista saada äärimmilleen viritettynä moottorikäytössä lähes kestmagneetikoneen veroinen hyötysuhteessa kuormitusalueen alkupäätä lukuun ottamatta. Tämä edellyttää kuparin käyttämistä roottorimateriaalina virtalämpöhäviöiden minimoiseksi. Kupariroottori on kuitenkin haastavampi valmistaa kuin alumiinipainevaluroottori, ja materiaalikustannuksetkin ovat tuntuvasti alumiinia kalliimpia.

Roottorimateriaalin vaikutusta koneen hyötysuhteeseen voidaan tarkastella esimerkinomaisesti kuvista 1.11 ja 1.12.



Kuva 1.11. Epätahtikoneen analyttisesti laskettu suhteellisarvoesitys vakiotehokäyrän rajoittaman toiminta-alueen eri toimintapisteen hyötysuhteista, kun roottorimateriaalina on alumiini.

Laskenta ei sisällä pulssinleveysmoduloinnista aiheutuvia häviöitä. Koneen nimellisarvot $P_n = 125 \text{ kW} / n_n = 5954 \text{ rpm}$ ja tangentialinen jännitys $\sigma_{T_{an}} = 30 \text{ kPa}$ roottorin lämpenmä $\theta = 80 \text{ }^\circ\text{C}$.



Kuva 1.12. Epätahtikoneen analyttisesti laskettu suhteellisarvoesitys hyötysuhteesta, kun roottorimateriaalina on kupari. Laskenta ei sisällä pulssinleveysmoduloinnista aiheutuvia häviöitä. Koneen nimellisarvot $P_n = 125 \text{ kW} / n_n = 5954 \text{ rpm}$ ja tangentialinen jännitys $\sigma_{T_{an}} = 30 \text{ kPa}$ roottorin lämpenmä $\theta = 80 \text{ }^\circ\text{C}$.

Kuvista 1.11 ja 1.12 voidaan todeta epätahtikoneen hyötysuhteen heikkenevän merkittävästi matalalla kuormituksella nopeusalueen alapäässä ulkoisen magneetoinnin vuoksi. Epätahtikoneen mukavuusalue onkin hieman korkeammilla pyörimisnopeuksilla, jossa sen hyvän hyötysuhteen alue riittää suurnopeusalueelle asti.

Kupariroottorin pienemmän resistanssin vuoksi hyvän hyötysuhteen ($\eta \approx 0,95$) alue kasvaa maltillisesti vääntömomenttiakselin suunnan mukaisesti, korreloiden virtalämpöhäviöiden loogisen kasvusuunnan mukaan.

Nopeusakselin suuntaan erotus on maltillisempi, tosin kupariroottori parantaa erinomaisen hyötysuhteen aluetta ($\eta \approx 0,96$), yltäen aina arvoon $1,5 \times n_{syn}$. Lisäksi kupariroottorilla koneen nimellispisteen jättämä jää luonnollisesti pienemmäksi alumiiniroottorilla varustettuun koneeseen nähden.

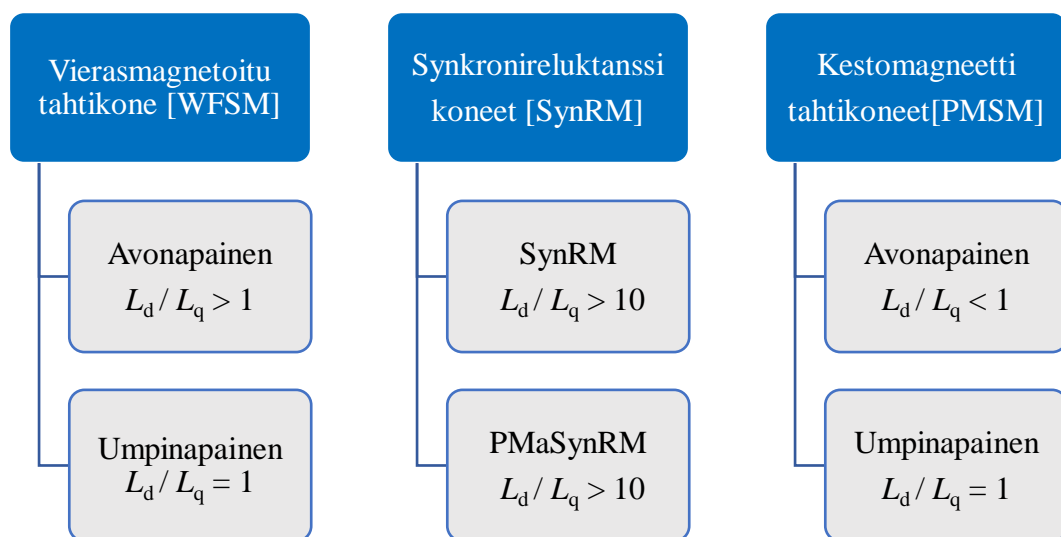
Epätahtimoottori onkin haasteellinen juuri roottorin vuoksi, koska suuremmilla tangenti-aalisen jännityksen arvoilla se edellyttää erittäin tehokasta jäähdytystä. Staattori voidaan jäähdyttää esim. vesi-glykoli -seoksella tai ruiskuttamalla viileää öljyä vyyhdenpäihin.

Roottorin jäähdytys on järjestettävissä, mutta on osittain suljetun rakenteen vuoksi haasteellisempaa. Yleisimmät, suljettua ilmajäähdytystä tehokkaammat menetelmät perustuvat nesteiden käyttöön. Esimerkiksi Teslan Model S -mallissa roottorin jäähdytys on järjestetty vesi-glykoli -seoksella, joka kiertää roottorin ontossa akselissa (R. Thomas et al. 2020)

1.6.3 Tahtikoneet

Tahtikone on kiertokenttäkoneista rakennevaihtoehdoiltaan monipuolisin ja sisältää ominaisuuksia sekä tasavirta- että epätahtikoneesta. Tahtikoneen staattorirakenne on identtinen epätahtikoneen kolmivaiheisen kiertokenttästaattorin kanssa. Tahtikoneen magneetointikäämi on yleensä roottorilla, kun se tasavirtakoneessa on staattorilla. Tahtikoneen staattori on vastaavanlainen kolmivaiheinen kiertokenttästaattori kuin epätahtikoneessakin. Tahtikoneen roottorilla kulkee tasavirta ja staattorissa kolmivaiheinen vaihtovirta.

Tahtikoneiden rakenteellinen jako on esitetty kuvassa 1.13.



Kuva 1.13. Tahtikoneluokat magneettipiirien ominaisuuksien mukaisesti jaoteltuna. L_d on pitkäakselin induktanssi ja L_q on poikkiakselin induktanssi.

Tahtikoneessa vääntömomentti syntyy roottorin ja staattorin välillä ilmapääläkämmivun välityksellä vaikuttavien hylkimis- ja vetovoimien seurauksena. Moottorikäytössä kestopääläkämmivun tai ulkoisella napakäämmivirralla luodut magneettiset navat seuraavat

pysyvyytilassa staattorikämiin generoimaa pyörivää magneettikenttää. Poikkeuksen tekee synkronireluktanssikone, jonka roottorilla ei ole magneetteja – ainoastaan suuri magneettinen anisotropia. Siinä vääntömomentin tuotto perustuu koneen pitkittäis- ja poikittaisakselien väliseen reluktanssiero.

Tarkastellaan seuraavaksi tahtikoneiden ominaisuuksia. Kestomagneettitahtikonetta tarkastellaan hieman syvällisemmin, koska se dominoi ajomoottorien markkinaa epätahtikoneen kanssa.

1.6.4 Vierasmagnetoitu tahtikone

Vierasmagnetoitu tahtikone on perinteisesti toiminut sähköverkkoon kytkettynä megawattiluokan generaattorina, jossa koneen pätötehoa säädetään turbiinilla, ja roottorin napakäämivirralla voidaan säätää sähkönjakelu- tai -siirtoverkon liityntäpisteen loistehotasetta tarpeen mukaan. Moottoreina niitä käytetään suuritehoisissa sovelluksissa. Vierasmagnetoitu tahtikone voi löytyä esimerkiksi suurten laivojen, kaivosnostureiden ja valsauslaitosten käytöstä.

Ulkoisesti säädettävän napakäämivirran ansiosta koneella on moottorikäytössä fantastiset kentänheikennysominaisuudet, ja se olisikin kentänheikennyksen suorituskykynsä puolesta ihanteellinen mobiilikäyttöihin. Moottorilla voidaan esimerkiksi vielä kolminkertaisella nopeudella tuottaa hetkittäin nimellinen vääntömomentti, joka voisi traktorin siirtoajossa olla miellyttävä ominaisuus. Vierasmagnetoitua tahtikonetta on sovellettu mm. Ranskan suurnopeusjunissa ja viimeksi ehkä hieman yllättäen Renault Zoe henkilöautossa.

Erillinen napakäämivirta aiheuttaa kuitenkin virtalämpöhäviöitä roottorilla, mikä heikentää koneen hyötysuhdetta etenkin pienten ja keskisuurten moottoreiden tapauksessa. Koneen keskinkertainen hyötysuhde verrattuna kestomagneetikoneeseen sekä roottorin magnetointivirran syöttöjärjestelyt ovat hidastaneet sen hyödyntämistä mobiilikäytöissä. Nopeussäädetyssä moottorikäytössä ulkoinen magnetointi vaatii oman puolijohdesillan, joka monimutkaistaa ohjausta aavistuksen verrattuna epätahti- tai kestomagneettitahtikoneeseen.

Tahtikoneen käyttöä kuitenkin puoltaa se, että kalliita kestomagneetteja ei tarvita ja hyötysuhde sekä kentänheikennysominaisuudet ovat kuitenkin oikosulkukonetta parempia.

Konetyypin osalta nähtiin mielenkiintoinen avaus, kun vuonna 2013 esitellyn Renault Zoen ajomoottorina oli nelinapainen vierasmagnetoitu tahtikone. Kone magnetoidaan

hitaasti pyörivistä generaattoreista tuttuun napakenkien ympärille käämityillä käämeillä, joihin roottorin napakäämivirta syötetään perinteisillä hiiliharjoilla kommutaattorin kautta. (Renault, 2015)

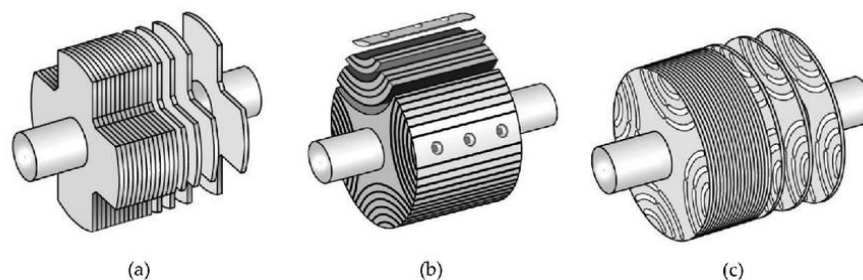
Sittemmin erillismagnetoidun tahtikoneen on esitellyt myös BMW, jonka uuden iX3 -katumaasturin ajovoimanlähteenä on Renault Zoen tavoin myös vierasmagnetoitu tahtikone (BMW, 2020)

1.6.5 Synkroni- ja kestopagneettiavusteinen synkronireluktanssikone

Synkroninen reluktanssikone on mekaaniselta rakenteeltaan ja toimintaperiaatteeltaan yksinkertaisin kiertokenttäkone. Muiden kiertokenttäkoneiden tapaan siinä on kolmivaiheinen staattori, joka generoi koneen ilmaväliin pyörivän käämivuon. Roottori on yksinkertainen, useimmiten säteen suuntaan laminoitu levypaketti, jossa ei ole lainkaan käämejä.

Roottorilla ei kulje virtaa erillismagnetoidun tahtikoneen tai epätahtikoneen tavoin, vaan vääntömomentti perustuu magneettiipiirin reluktanssieroön (induktanssieroön) koneen pitkittäis- ja poikittaisakselien välillä. Reluktanssiero pyrkii kääntämään roottorin asennon staattorissa pyörivän magneettikentän mukaan siten, että magneettiipiiriin varastoitunut energia olisi minimissään.

Kuvassa 1.14 on esitetty synkronireluktanssikoneen yleiset roottorirakenteet



Kuva 1.14. Synkronireluktanssikoneen roottorin laminoitinvaihtoehtoja. a) kokeellinen yksinkertainen roottori, jossa umpinapaisesta laminaattirakenteesta on poistettu napajaon mukaisesti levyä. b) aksiaalisessa laminoinnissa muotoillut, eristetyt teräslevyt pakataan epämagneettisten voosteiden kanssa vuorotellen päällekkäin. c) stanssaamalla teräslevystä pinoamalla kasattu voesteroottori. Esitetyistä vaihtoehdoista stanssattu voesteroottori on kaupallisesti hyödynnettyin. Kaikissa roottoreissa napapariluku $p = 2$ (Pyrhönen, 2014)

Yksinkertaisen roottorirakenteen ja epätahtikonetta paremman hyötysuhteensa ansiosta synkronireluktanssikone olisi potentiaalinen ehdokas moniin säädettäviin sovelluksiin, joissa ei edellytetä suurta maksimivääntömomenttia.

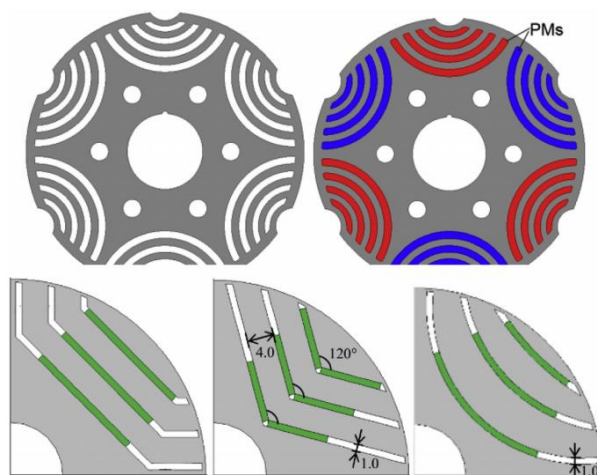
Puhtaan synkronireluktanssikoneen maksivääntömomentintuottokyky on melko vaatimaton verrattuna esimerkiksi epätahtimoottoriin. Jotta synkroninen reluktanssikone kykenisi tuottamaan yleisenä nyrkkisääntönä vaaditun 1,5...1,6 pu maksivääntömomentin, olisi pitkittäisakselin induktanssin oltava kymmenkertainen poikittaisakselin induktanssiin nähden ja poikittaisakselin induktanssin pieni.

Puhdas synkronireluktanssikone suunnitellaan tyypillisesti napapariluvuille $p = 1 \dots 2$. Napojen lisääminen heikentää koneen magnetointi-induktanssia ja d- ja q- akseleiden väliseen reluktanssieroön perustuvalla roottorilla ei voi lisätä kovin paljon napoja suorituskyvyn kärsimättä.

Koneen ominaisuuksia voidaan parantaa ilmavälien ja vuo-ohjaimien lisäksi upottamalla koneen roottoriin kestomagneetteja. Kestomagneetit parantavat koneen väännöntuotantokykyä ja ennen kaikkea tehokerrointa.

Pelkällä vuoesteroottorilla päästään tyypillisesti noin 1,6 pu maksivääntömomenttiin. Kestomagneettiaavusteisella koneella maksivääntömomenttia saadaan nostettua 1,5..2,5 pu lukemiin, jotka ovat vertailukelpoisia epätahtikoneen kanssa. Niillä maksivääntömomentti on tyypillisesti noin 2,5..3,2 pu.

Kuvassa 1.15 havainnollistetaan kestomagneettien avulla paranneltua roottoria eri vaihtoehdoin.



Kuva 1.15. Synkronireluktanssikoneen stanssattu roottori, jossa vuoesteisiin on asennettu kestomagneetteja. Magneettimateriaalina käytetään tyypillisesti ferriittejä niiden edullisuuden vuoksi, vaikka paljon paremmat ominaisuudet saavutettaisiin kalliimmilla NdFeB magneeteilla (Luk et al., 2020)

Synkronireluktanssikoneen roottorin rakenteellinen heikkous rajoittaa sen hyödyllistä nopeusalueita ja dynaamisesti suorituskykyisen roottorin rakentaminen on

valmistusteknisesti haastavaa. Roottorin pitsimäinen rakenne ei myöskään kestä fyysisesti kovin montaa napaa. Mekaanista heikkoutta voidaan kompensoida täyttämällä vuoesteet painevalumenetelmällä tai kietomalla roottori esimerkiksi hiilikuitupannan sisälle.

1.6.6 Kestomagneettitahtikone

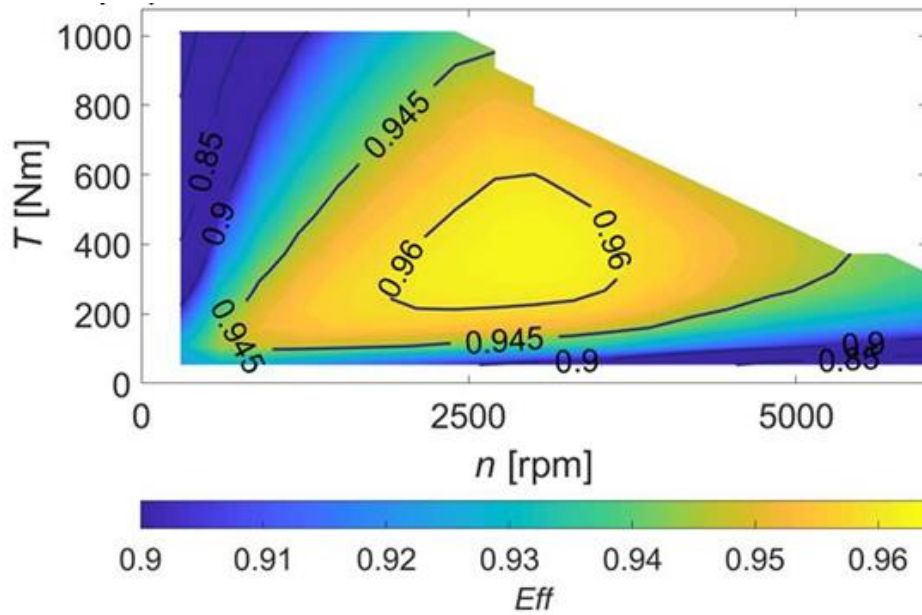
Kestomagneettitahtikoneen toimintaperiaate eroaa vierasmagnetoidusta tahtikoneesta siten, että konetyypissä piirin perusmagnetointi perustuu kiinteisiin kestopagneetteihin. Kestomagneettien tuottama käämivuo on riippumaton koneen jännitteestä ja pyörimisnopeudesta, eikä sitä voi säätää ulkoisen magnetoinnin tapaan.

Kestomagneettitahtikone on erityisen ihanteellinen vaihtoehto pääasiassa vakiovuoaalueella ja maltillisesti kentänheikennysalueella käytettäviin sovelluksiin. Ulkoisen virran asemesta magneettipiirin virtasumma luodaan enimmäkseen kestopagneetein, joiden häviöt ovat virralliseen magnetointiin verrattuna vähäisiä.

Kentänheikennysalueella koneen ilmavälikäämivuota joudutaan heikentämään keinotekoisesti magnetoimalla konetta negatiivisella d-akselin staattorivirralla, mikä aiheuttaa ylimääräisiä virtalämpöhäviöitä staattorissa.

Pidemmälle kentänheikennysalueelle edettäessä suurempi taajuus lisää erityisesti staattoriraudassa tapahtuvia häviöitä. Roottorin rautahäviöt kasvavat samassa suhteessa, mutta niiden absoluuttinen osuus jää pienemmäksi roottorin puuttuvan perustaajuuden ja luonnollisesti staattorin massaa pienemmän massan vuoksi.

Kuva 1.16 esittää kestopagneettitahtikoneelle tyypillistä hyötysuhdekarttaa.



Kuva 1.16. Pyörölankaisella kiertokenttäkäämillä varustetun kestopagneettitahtikoneen tyypillinen hyötysuhdekartta n/T -koordinaatistossa. Virtalämpöhäviöt kasvavat koneen vääntömomentin neliössä y-akselin suuntaan. Kitkahäviöt nousevat koneen pyörimisnopeuden mukaisesti x-akselin suuntaan. Staattorin rautahäviöt kasvavat seuraten väljästi koneen tehokvaajaa diagonaalin suuntaan. Roottorihäviöissä kulmakerroin on identtinen koneen tehon suhteen. Myös koneen vakiokertoimella lasketut lisähäviöt kasvavat diagonaalin suuntaan kasvavan tehon mukaan. Laskenta ei sisällä pulssinleveysmoduloinnista johtuvia häviöitä. Koneen nimellisarvot $P_n = 125$ kW, $n_n = 2000$ rpm, $Q_s = 48$, $p = 4$

Monet kestopagneettimateriaalit ovat alttiita korkealle lämpötilalle. Kentänheikennysalueella alle nimellisen käyttölämpötilan oleva kestopagneettimateriaali kestää melko hyvin demagnetoivaa vaikutusta, mutta saattaa osittain menettää magneettiset ominaisuutensa, mikäli materiaali joutuu voimakkaan demagnetoivan kentänvoimakkuuden alaiseksi käyttölämpötilansa ylärajalla.

Napakäämein varustettu murtovakotahtikone on työkonsovelluksissa erityisen mielenkiintoinen vaihtoehto, koska sen avulla voidaan tietynkokoiseen runkoon valmistaa suurin mahdollinen roottori ja näin tuottaa kiertokenttäkonetyyppejä enemmän vääntömomenttia samasta tilavuudesta.

Tarkastellaan napakäämittyä murtovakokestopagneettitahtikonetta seuraavaksi hieman tarkemmin.

1.6.7 Napakäämitty murtovakokestopagneettitahtikone

Napakäämityissä murtovakokestopagneettitahtikoneissa vakoluku q eli staattoriurien määrä napaa ja vaihetta kohti on pienempi tai yhtä suuri kuin 0,5. Ykköstä pienemmällä

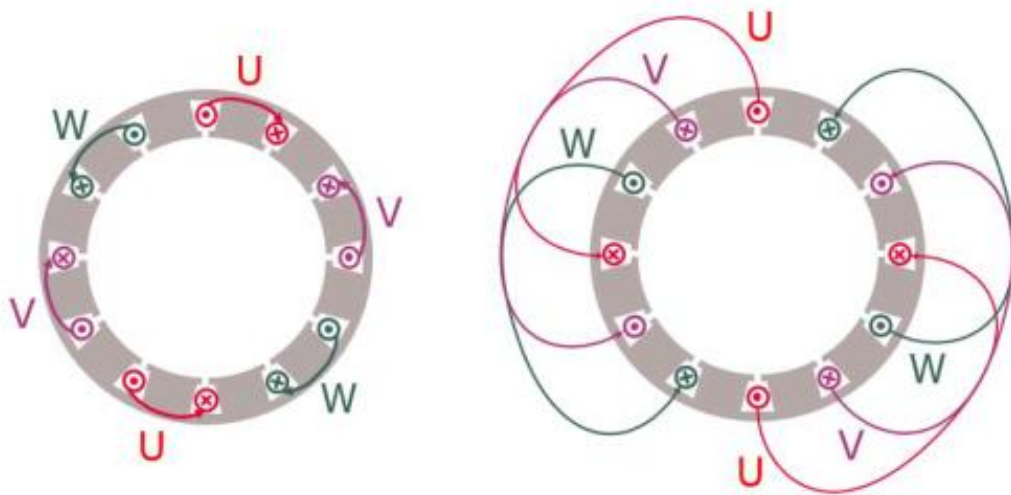
vakoluvulla koneelle tulee enemmän napoja urien määrään verrattuna ja vuon pitää kulkea staattorin ja roottorin välillä parittomasta määrästä hampaita. Seurauksena staattorin selästä voidaan tehdä ohuempi.

Traktorin napakäämi-propulsiomootorin roottorin sisälle on mahdollista rakentaa akselin ensimmäinen planeettapyörästä, jonka voiteluöljyä voidaan mahdollisuuksien mukaan hyödyntää myös roottorin jäähdytyksessä. Usein roottorirunko vaatii vielä mekaanisen tuennan.

Ohut staattoriselkä vähentää paitsi koneen painoa, mahdollistaa myös suuremman il-maväliahkaisijan, joka on suoraan verrannollinen koneesta saatavaan vääntömomenttiin. Kun vielä vyyhdenpäät ovat lyhyet, saadaan tiettyyn kokonaistilavuuteen mahdollisimman suuri roottorin aktiivinen il-maväli-pinta. Napakäämityllä murtovakokotahtikoneella saadaankin maksimaalinen vääntömomentti / halkaisija -suhde (Jussila, 2005).

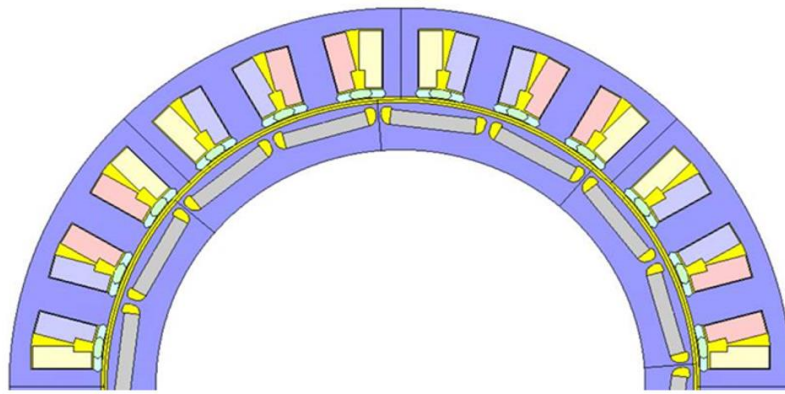
Sopivasti valituilla uraluku-napapariyhdistelmillä voidaan käämiä yksi vyyhti yhden hampaan ympärille ja viereisissä urissa olevat vyyhdensivut voivat muodostaa yhden vyyhdin. Näin vyyhdestä tulee lyhin mahdollinen, minkä seurauksena staattoriresistanssi jää myös verrattain pieneksi.

Ominaisuutta on havainnollistettu kuvassa 1.17.



Kuva 1.17. Vertailu napakäämin (vasemmalla) ja kiertokenttäkäämin (oikealla) välillä (Wilson, 2011)

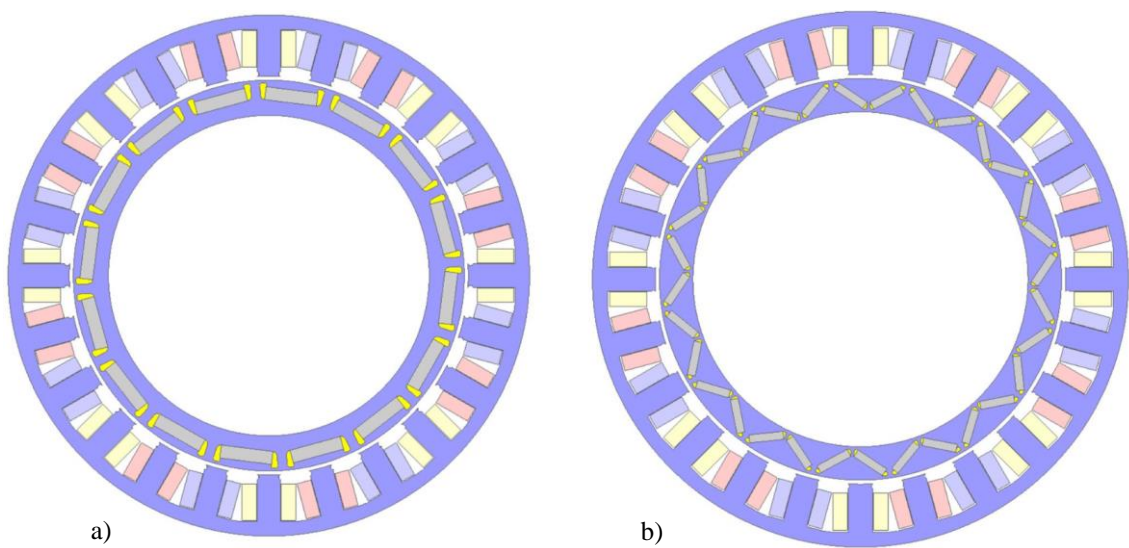
Ohuen staattoriselän vuoksi napakäämikoneella roottorin sisähalkaisijastakin tulee suuri. Tätä ominaisuutta on havainnollistettu kuvassa 1.18.



Kuva 1.18. Esimerkinomainen poikkileikkaus murtovakokestomagneettitahtikoneen puolikkaasta. Staattorin ja roottorin sähkölevyistä laminoitu runko on merkitty sinisellä. Staattorihampaita kiertävät punaisella ja vaaleansinisellä merkityt käämit. Keltainen väri indikoi ilmaa. Kuva sisältää ainoastaan magneettiin osat ja vyyhdensivut. Kuva esittää mainiosti, miten moninapaisen kestopäätiköiden sisään jää tilaa muulle tekniikalle.

Avourainen napakäämikone on verrattain helppo valmistaa. Käämi voidaan esiasentaa kelarungon ympärille valmiiksi. Sen avulla käämi voidaan helposti pujottaa varsinaisen navan ympärille. Ominaisuus on erityisen kiinnostava työkaluvalmistajien kannalta, sillä niiden lajikohtaiset tuotantovolyymit ovat verrattain pieniä verrattuna autovalmistajiin, jotka tuntuvat suosivan perinteisen pyörölään käämityksen lisäksi muun muassa ns. hiuspinnikäätymistä, jonka valmistus voidaan robotisoida suursarjoissa.

Kiertokenttäisen kestopäätiköiden tavoin, napakäämikönetä voidaan valmistaa eri roottorivariantein. Kuva 1.19 esittelee 24/20 napakäämiköneten roottoria avo- ja umpinapaisena.



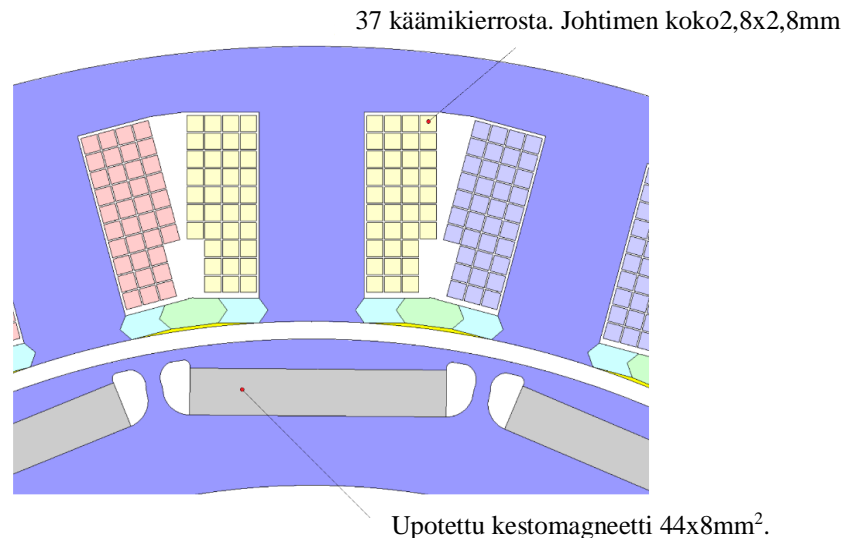
Kuva 1.19. Esimerkinomainen poikkileikkaus murtovakokestomagneettitahtiköneten a) lähes umpinapaisesta ja b) avonapaisesta roottorirakenteesta. Vasemmalla oleva rakenne ei ole täysin umpinapainen, koska magneetit ovat upotettuna. Suuren poikittaisakselin induktanssinsa johdosta

rakenne tuottaa myös hieman reluktanssivääntömomenttia. Oikealla vahvasti avonapainen rakenne, jossa magneetit on asennettu V-muotoon. Vaihtoehto tuottaa merkittävästi reluktanssivääntömomenttia, mutta suurempi osa käämivuosta hukataan roottorin hajaannukseen. Molemmilla rakenteilla roottorin sisähalkaisija on likimäärin sama, vaikka V-asento vaatiikin usein hieman paksumman roottorirakenteen.

Umpinapaisessa rakenteessa koneen pitkittäisen d-akselin ja poikittaisen q-akselin välillä ei ole reluktanssieroja ja vääntömomentintuottokyky perustuu ainoastaan kestmagneetin käämivuon ja staattorin poikittaisakselin virran vuorovaikutukseen.

Avonapaisessa rakenteessa hyödynnetään kestmagneetin lisäksi reluktanssivääntömomenttia. Tähän syvennyttään tarkemmin kappaleessa viisi.

Kuvasta 1.18 huomattiin, että käytettäessä esivalmistettuja käämivyyhtejä murtovakonapakäämitahtikoneen staattorirakenteesta tulee luonnostaan hieman väljä. Käämien väliin jäävää tyhjää tilaa voidaan mahdollisuuksien mukaan hyödyntää koneen jäähdytyksessä. Tätä ominaisuutta tarkennetaan kuvassa 1.20.



Kuva 1.20. Esimerkinomainen poikkileikkaus murtovakokestmagneettitahtikoneen staattorista. Napakäämissä on käytetty Litz -lankaa, jossa yhden johtimen koko on $2,8 \times 2,8 \text{ mm}^2$. Roottorin selkä on konerakenteelle tyypillisen ohut ja vuon kulutie voi vaihdella useamman hampaan välillä. Roottoriin kevyesti upotettu magneetti tuo hieman reluktanssivääntömomenttia. Magneettien päihin on muotoiltu vuoesteet roottorihajaannuksen minimoimiseksi. Staattorikäämien uria voidaan hyödyntää staattorin nestejäähdytyksessä.

Napakäämikoneen haittapuolena ovat ilmavälissä esiintyvät harmoniset vuontiheydet, jotka aiheuttavat helposti vääntömomenttivärettä moottorin akselille (Salminen 2004). Värähtelyä voidaan vähentää hyväksyttävälle tasolle huolellisella koneensuunnittelulla.

Napakäämikoneen säätö on periaatteeltaan analoginen kiertokenttäkestmagneettitahtikoneen kanssa, mutta napakäämirakenne tarjoaa myös mielenkiintoisen mahdollisuuden, jossa konetta säädettäisiin koneeseen integroiduilla vyyhtikohtaisilla H-silloilla.

2 OHJAUS JA SÄÄTÖ

Nykyisin tarjolla olevat sähkökäyttöjen ohjausmenetelmät voidaan jakaa kahteen ryhmään: skalaariohjatut ja vektorisäätöön perustuvat. Skalaariohjaus on yksinkertainen menetelmä, eikä useimmiten vaadi toimiakseen käyttäjältä tietoa sovelluksesta. Toisaalta skalaariohjauksen tarjoama suorituskyky on varsin rajallinen, eikä siten sovellu esimerkiksi nopeaa vääntömomenttivastetta vaativiin sovelluksiin.

Vektorisäädetyt käytöt soveltuvat hyvin kaikille markkinoilla oleville moottorityypeille ja tarjoavat hyvän suorituskyvyn useimpiin vaativampiinkin sovelluksiin. Vektorisäätömenetelmät kuitenkin vaativat toimiakseen moottorimallin.

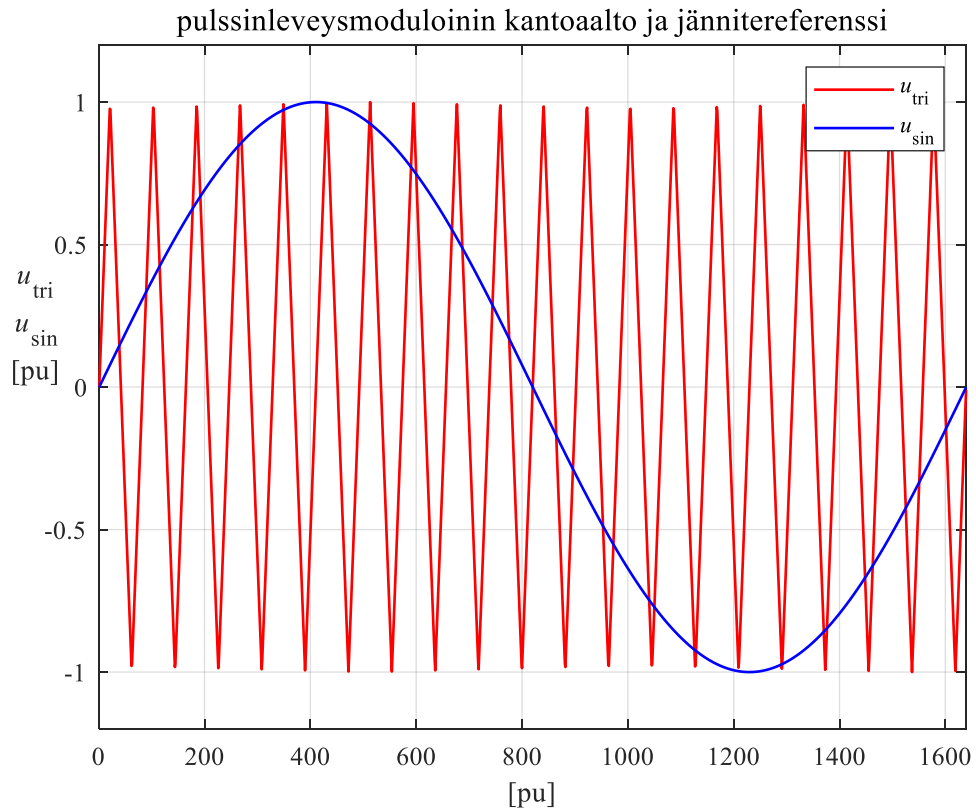
Tutustutaan seuraavaksi tarkemmin näihin säätömenetelmiin.

2.1 Skalaarisäätö

Skalaarisäädössä koneelle syötettyä jännitteen amplitudia muutetaan taajuuteen verrannollisena. Ohjaus perustuu oletukseen moottorin aikaharmonisesta tilasta, jossa koneen sähkötekniset suureet eivät muutu.

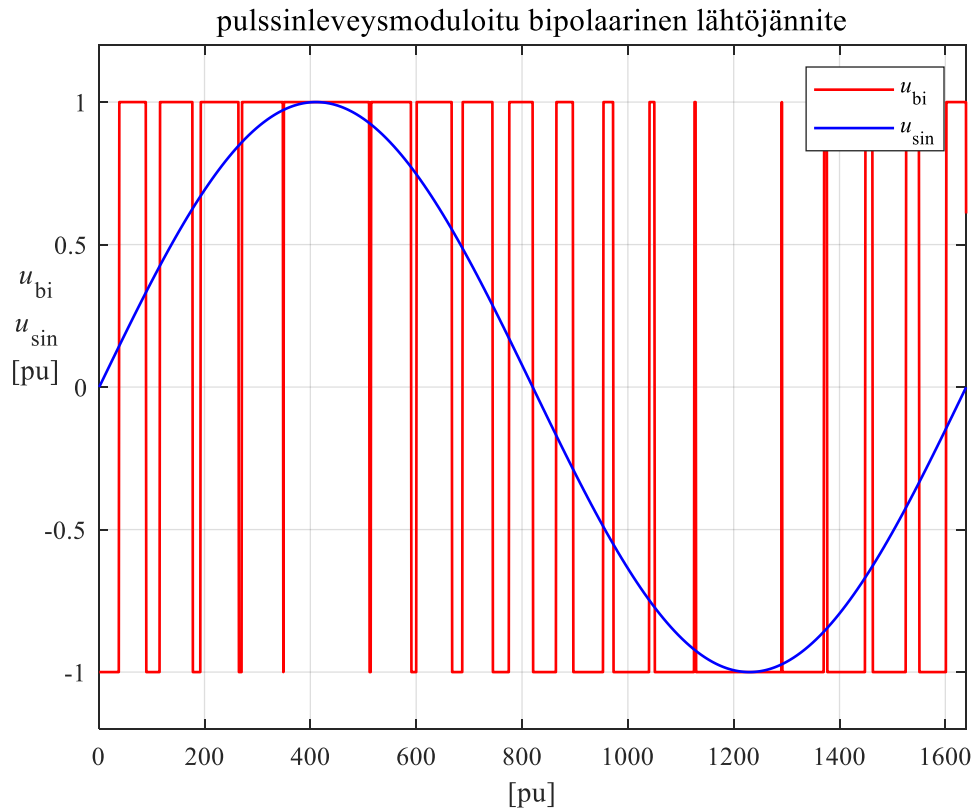
Skalaariohjauksessa hyödynnetään tyypillisesti sini-kolmiomodulaattoria, joka vertaa taajuusmuuttajan kytkentätaajuudella värähtelevää kolmionmuotoista kantaaltoa keskenään 120 asteen vaihesiirrossa oleviin siniaaltoihin ja muodostaa näistä ohjeet kytkimille. Modulaattori tarvitsee ohjeikseen halutun lähtötaajuuden lisäksi amplitudin modulointiasteen, joka vastaa toivottua taajuusmuuttajan lähtöjännitettä.

Kuva 2.1 esittää sini-kolmiovertailijan, jossa sinimuotoista perusaaltoa verrataan kolmionmuotoiseen kantaaltoon. Kantaalton taajuus on yhtä suuri taajuusmuuttajan kytkentätaajuuden kanssa.



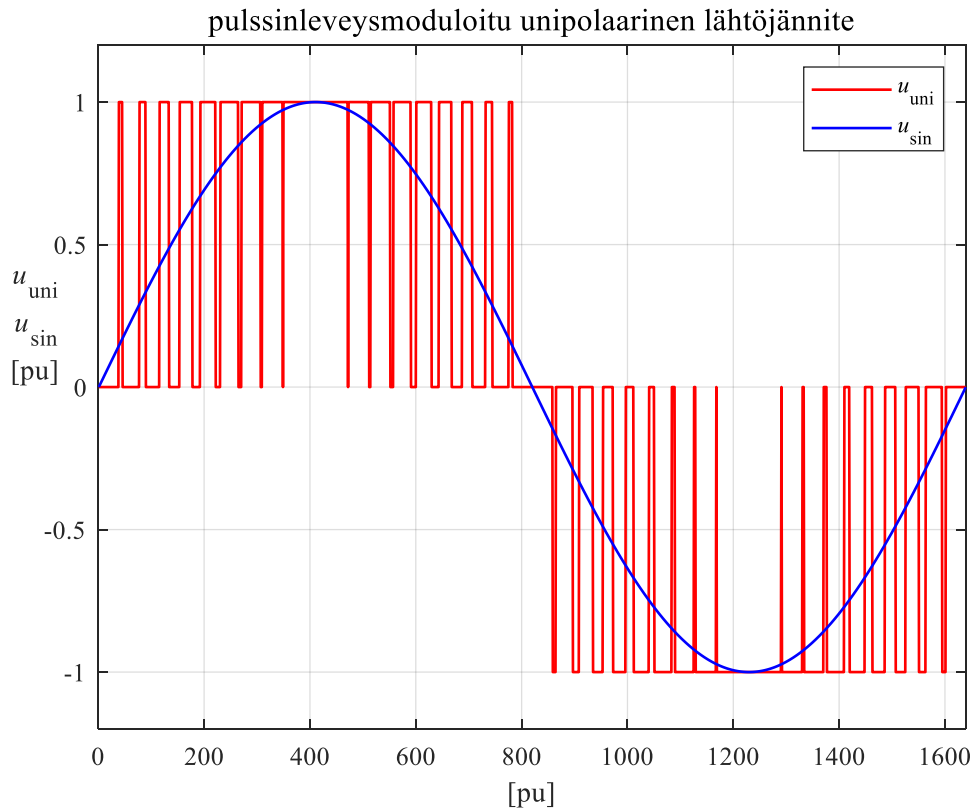
Kuva 2.1. Pulssinleveysmoduloinnin sinikolmiovertailu yksivaiheisena esityksenä. 50Hz taajuudella etenevää jännitereferenssiä u_{sin} verrataan 1 kHz taajuudella värähtelevään kantaaltoon. u_{tri} . Näin yhdellä jaksolla esiintyy 20 pulssia. Kuvassa jännitereferenssin ja kantaallon amplitudit ovat yhtä suuria eli amplitudin modulointi-indeksi on 1. Kuva on periaatekuva. Perinteisesti on vaadittu synkronista modulaatiota, kun jaksolla esiintyy alle 21 pulssia.

Sini-kolmiovertailijan perusteella moduloitu taajuusmuuttajan bipolaarinen lähtöjännite on esitetty kuvassa 2.2.



Kuva 2.2. Kuvassa 2.1 esitetystä pulssinleveysmoduloinnista syntyvä bipolaarinen lähtösignaali u_{bi} yksivaiheisena suhteellisarvoesityksenä. 50 Hz taajuinen lähtöjännite vaihtelee välipiirin jännitteiden U_{DC+} ja U_{DC-} välillä. Lähtöjännitteen perusaalto on yhtenevä jänniteohjeen u_{sin} kanssa. Kytkimet on tarkastelussa oletettu ideaalisiksi. Kuva selittää myös, miksi olisi syytä käyttää taajuuden modulointiasetusta 21 20:n asemesta. Tämä pulssikuvio on epäsymmetrinen ja tuottaa siten moottorille haitallisia aliharmonisia. Kuva on kuitenkin relevantti, sillä suurella taajuudella toimivan moottorin syöttöön ei välttämättä saada riittävän korkeaa kantoaaltotaajuutta.

Kuvan 2.1 sini-kolmiovertailijan perusteella moduloitu taajuusmuuttajan unipolaarinen lähtöjännite on esitetty kuvassa 2.3.

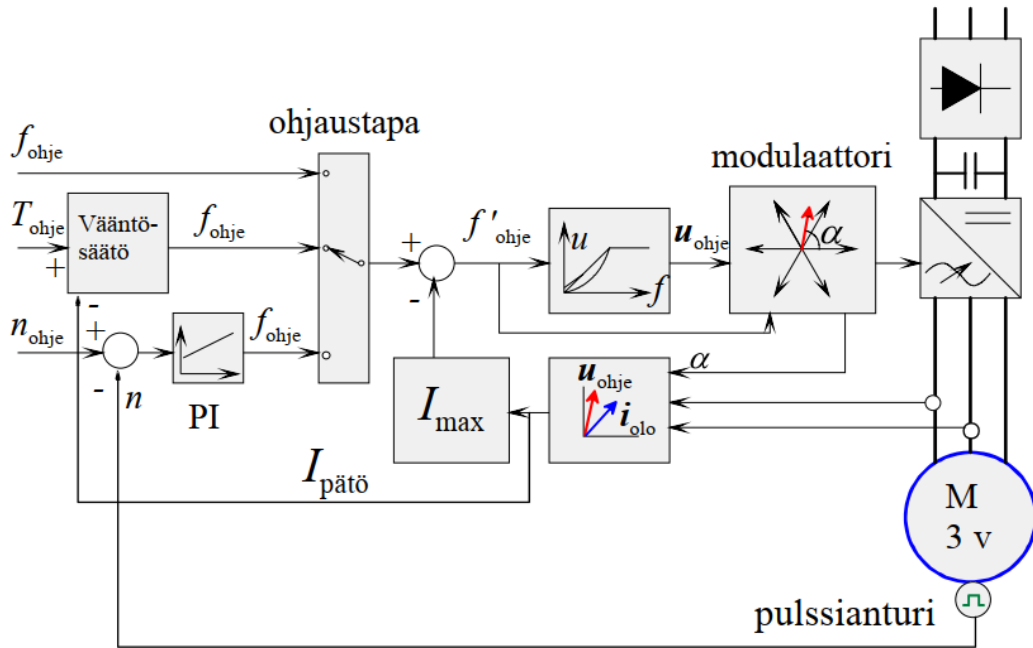


Kuva 2.3. Kuvassa 2.2 esitetystä pulssinleveysmoduloinnista syntyvä unipolaarinen lähtösignaali u_{ni} yksivaiheisena suhteellisarvoesityksenä. 50 Hz taajuinen lähtöjännite vaihtelee välipiirin jännitteiden U_{DC+} ja U_{DC-} välillä. Lähtöjännitteen perusaalto on yhtenevä jänniteohjeen u_{sin} kanssa. Kytkimet on tarkastelussa oletettu ideaalisiksi.

Skalaarisäätö kykenee toistamaan pätevyyden mittaukseen perustuvaa alkeellista vääntömomentin säätöä. Omaisuutta hyödynnetään ensisijaisesti sellaisissa oikosulkumoottori-käytöissä, joissa käytön dynamiikalta ei vaadita korkeita suoritusarvoja.

Skalaarisäätö ei sovellu sellaisenaan mobiilikäyttöihin. Sen toiminta tahtikoneiden kanssa on varsin epäluotettavaa, jos käytöllä on yhtään erityisiä dynamiikkavaatimuksia.

Kuvassa 2.4 on esimerkki skalaarisäädön lohkoakaaviosta.



Kuva 2.4. Skalaarisäädön lohkokaavio. Ohjearvon referenssinä voi toimia taajuus-, vääntömomentti- tai pyörimisnopeusohje. Vaikka skalaarisäädössä voidaan kohtalaisella tarkkuudella estimoida vääntömomenttia virran pätökomponentin mittaukseen perustuen, säätö ei kykene reagoimaan nopeasti äkillisiin kuormituksen muutoksiin. Vasteaika on tyypillisesti 100..300ms luokkaa. (Pyrhönen, 2010)

2.2 Suora käämi vuonsäätö DFLC

Saksalainen Manfred Debenbrock sekä japanilaiset Takahashi ja Noguchi esittivät 1980-luvulla säätömenetelmän, jossa staattorijännitettä integroidaan staattorikäämi vuon määrittämiseksi (Takahashi, I. and Noguchi, T, 1986). Faradayn induktiolakiin perustuva suora käämi vuon säätö on periaatteeltaan yksinkertainen, perustuen d- ja q-akselin jännitemalliin.

Staattorikäämi vuovektorin estimaatti $\psi_{s, \text{est}}$ arvioidaan integroimalla moottorin jännite $u_{s, \text{est}}$ vektoriavaruudessa yhtälöllä

$$\psi_{s, \text{est}} = \int (u_{s, \text{est}} - R_s i_{s, \text{meas}}) dt \quad (2.1)$$

Huomataan, että moottoriparametreista tarvitaan vain staattoriresistanssi R_s . Moottorin vääntömomentti T_e lasketaan estimoidusta staattorivuosta sekä kahdelta vaiheelta mitatusta staattorivirrasta vektoritulona

$$T_e = \frac{3}{2} p \psi_s \times i_s \quad (2.2)$$

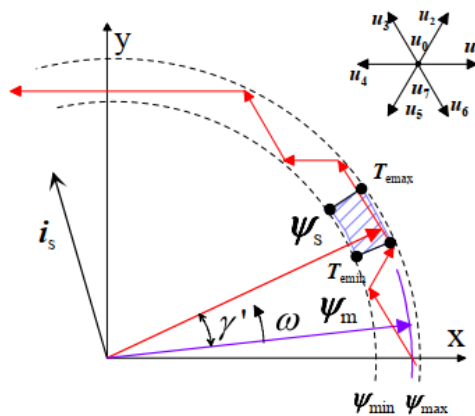
2.3 Suora vääntömomentinsäätö DTC

ABB kehitti DFLC-säätömenetelmää edelleen, patentoiden sen 1990-luvun lopulla suoraksi vääntömomentin säädöksi (DTC). Menetelmä esiteltiin alun perin oikosulkumoottorille, mutta sitä voidaan käyttää kaikkien kiertokenttäkoneiden kanssa.

DTC on säätönä erittäin nopea verrattuna vektori- ja skalaarisäätöön, kun käytössä ei ole jaksollista PWM tai SWM-modulointia. Lisäksi DTC-säätö kuormittaa säätöpiiriä vähemmän, koska se ei tarvitse koordinaatistomuunnoksia. Jännitevektoria voidaan muuttaa asynkronisesti aina tarpeen mukaan. Staattorikäännyys estimoidaan staattorikoordinaatistossa jännitteen ja virran oloarvosta vähentämällä staattorikäännyydestä staattorin magneettinen hajaannus.

ABB:n DTC-säädössä käännyys ja vääntömomenttia ohjattiin suoraan ilman erillistä modulaattoria yhtälöiden (2.1) ja (2.2) sekä moottorimallissa olevien moottorin sijaiskytkentään perustuvien käännyys- ja vääntömomenttiestimaattien mukaan. Lisäksi tarvitaan käännyysvektorin paikkatieto vuoympyrältä.

Näiden muuttujien perusteella saadaan Takahashin esittelemä jännitevektoreiden optimikäyntötaulukko, jolla koneen vuota ja vääntömomenttia säädetään hystereesin rajoissa, kuva 2.5.



Kuva 2.5. DTC:n hystereesissäädön käännyysympyrä tahtikoneelle. Varjostettu alue esittää staattori- ψ_s ja ilmavälikäännyys ψ_m vaihtelualuetta vääntömomentin minimi- ja maksimiarvojen puitteissa. Tehokytkimien ohjauksia muutetaan ainoastaan vääntömomentin tai käännyysvektorin poikkeusta referenssiarvoistaan. Kun käännyysvektori törmää hystereesialueen minimi- tai maksimirajaan, valitaan seuraava sopiva jännitevektori (pienempi piirros) ohjaamaan staattorikäännyysvektoria oikeaan suuntaan. Tästä seuraa PWM-säädölle tyypillistä suurtaajuista vääntövärettä (Pyrhönen, 2010).

DTC-säädössä ohjearvoon verrattavat erosuuret vietään hystereesissäätimelle, jonka perusteella optimaalinen kytkentälogiikka valitsee kulloiseenkin toimintatilaan sopivimman jännitevektorin.

DTC-säädön kytkentätaajuus ei ole vakio. Puolijohdetehokytкимиä ohjataan ainoastaan tarpeen mukaan, vääntömomentin tai käämivuon poiketessa liiaksi ohjearvoistaan. Säädön törmätessä hystereesirajaan, valitaan seuraava sopiva jännitevektori ohjaamaan staattorikäämivuota haluttuun suuntaan.

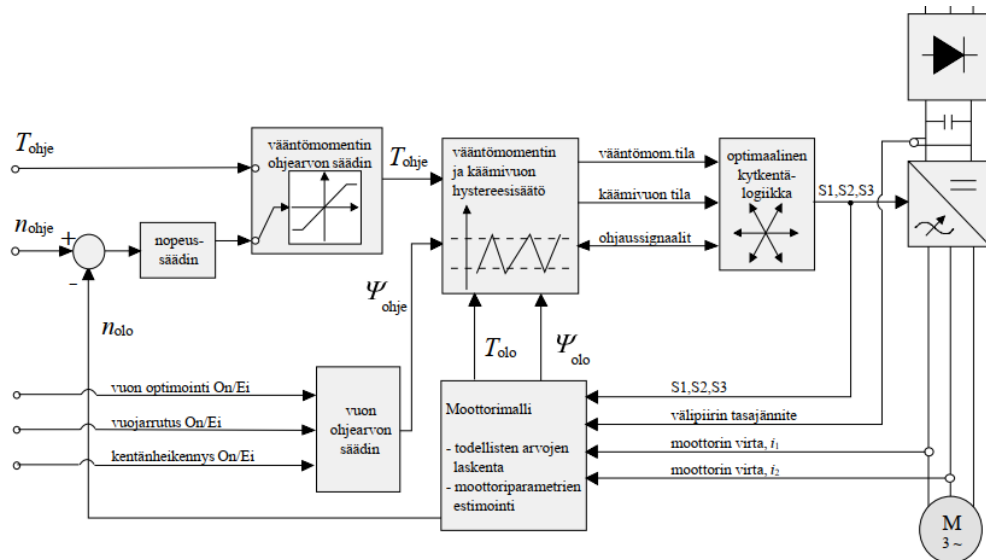
Hystereesisäädöstä seuraa DTC-säädön heikkoudeksi väitetty ominaisuus, joka realisoituu mahdollisena vääntöväreinä moottorin akselilla. Sama ongelma koskee kuitenkin kaikkia pulssinleveysmodulaatioon perustuvia tehonsäätöjärjestelmiä. Vääntövarettä voidaan kuitenkin pienentää sähkökoneen verrattain pitkällä aikavakiolla tai suurentamalla kytkentätaajuutta. Tämä pätee sekä DTC:lle että vektorisäädölle.

DTC:ssä toistuvaan jännitteen integrointiin perustuva käämivuon estimointi on altis aiheuttamaan puolijohdetehokytкимиien epälineaaristen ominaisuuksien, staattoriresistanssin tai välipiirin jännitteessä tapahtuvien mittausvirheiden seurauksena moottorin käämivuon ajautumisen origoepäkeskeiseksi.

DTC-säätöön onkin implementoitu jatkuvaa integrointia stabiloiva menetelmä, virtamalli, joka tarvittaessa korjaa integroinnissa koneen jännitemallissa syntyvää virhettä siirtämällä moottorin käämivuoympyrän keskipistettä takaisin kohti origoa. Virta- ja jännitemallin yhdistäminen tekee perinteisestä DTC:n suorituskyvystä erinomaisen vaihtelevissa olosuhteissa. Säätö painottaa jännitemallia nopeissa dynaamisissa vaihteluissa ja muutostilan laannuttua virtamallin osuus origokeskeisyyden korjaamiseksi kasvaa.

Suorassa vääntömomenttisäädössä ei välttämättä tarvita koneen asento- tai nopeusmitausta, mutta anisotrooppisilla roottoreilla virtamallikorjauksen käyttö edellyttää roottorin asentotietoa. Isotrooppisella roottorilla DTC-käytön suorituskyky riittää ilman kulmatietoa lähes nollanopeuteen asti.

Kuvassa 2.6 on DTC-säädön lohkokaaavioesimerkki.



Kuva 2.6. DTC-säädön lohkokkaavio. Moottorimalli laskee vääntömomentin, käämivuon ja pyörimisnopeuden oloarvot eri nopeus- ja kuormitustilanteiden varalle. Modulaattorin puuttuminen säätöpiiristä tekee säädöstä erittäin nopean. Alkuperäisessä ABB:n DTC-säädössä eri kytkentätilojen laskenta suoritetaan 25 μ s välein. Näin käytön vasteaika suorassa vääntömomenttisäädössä on takaisinkytketyn tasavirtakoneen luokkaa eli noin 1-2 ms. Edistyneellä vektorisäädöllä se voi olla 10..15 ms luokkaa (Pyrhönen, 2010).

ABB on sittemmin luopunut varsinaisesta DTC-säädöstä. Jäljelle on jäänyt markkinointimielessä nimitys. Uusimmat muuttajat perustuvat käytännössä vektorisäätöön. Näin on myös ABB:n mobiilikäyttöihin lanseeraaman HES880 -taajuusmuuttajan tapauksessa.

2.4 Vektorisäätö

Rác ja Kovács esittelivät avaruusvektorikäsitteen 1950-luvulla. 1960- ja 1970-luvuilla Siemensillä työskennellyt Felix Blaschke jalosti teoremaa eteenpäin, esitellen sen pohjalta oikosulkumoottorin roottorivuohon kiinnitetyn vektorisäädön. Kauppanimeksi tuli transvektorisäätö.

Teoreeman mukaan staattorista mitatut vaihevirratt muunnetaan koordinaatistomuunnoksin kaksikomponenttitasoon, jossa virran pitkittäinen d-komponentti määrää käämivuon oloarvon ja poikittainen q-komponentti määrää puolestaan vääntömomentin oloarvon. Virtaa ja käämivuota ohjataan mahdollisimman kohtisuoraan toisiaan vastaan, koska vääntömomentti saa ristikenttäperiaatteen mukaan maksiminsa, kun niiden välinen kulma on 90 sähköastetta. Tämä käy ilmi yhtälöstä (2.2).

Skalaariohjauksen tavoin vektorisäätö tarvitsee puolijohdetehokytkimien ohjaukseen modulaattoria. Modulointimenetelmänä käytetään tyypillisesti avaruusvektorimodulointia, missä kytkinkomponentteja ohjaava vektori pyörii kaksivaihetasossa kiinnitettynä johonkin valittuun koordinaatistoon.

2.5 Avaruusvektori

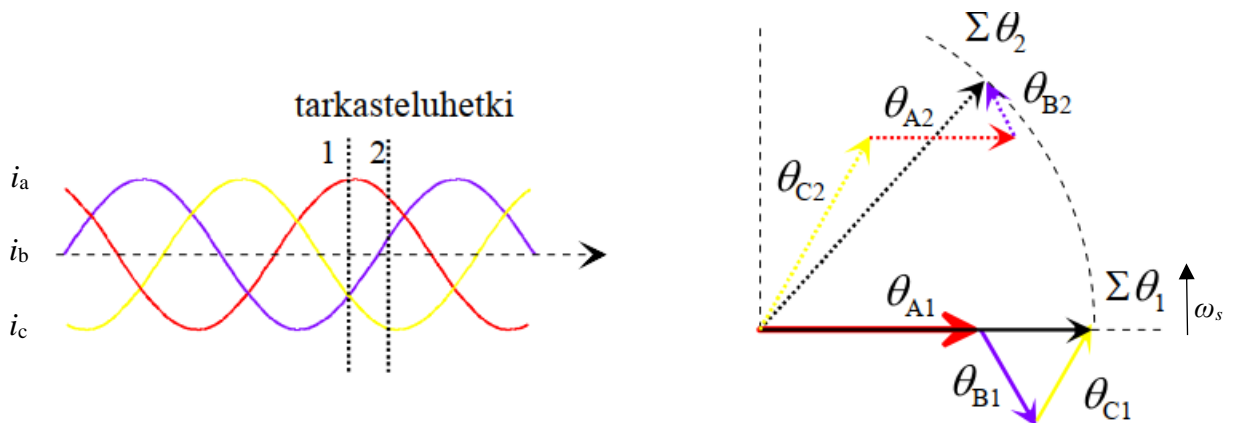
Vaihtovirtakone esitetään usein luonnollisessa koordinaatistossa, jossa y-akselilla sinimuotoiset vaihesuureet saavat arvon jokaista x-akselin ajanhetkeä kohden. Niiden reaali-aikainen matemaattinen käsittely on työlästä.

Kolmivaiheisen systeemin voi mallintaa avaruusvektoreilla. Mielivaltaisesti ajan mukana muuttuvien virtojen $i_U(t)$, $i_V(t)$ ja $i_W(t)$ avaruusvektori esitetään reaali- ja imaginäärikomponenttien $i_\alpha(t)$ ja $i_\beta(t)$ avulla stationaarisessa kompleksikoordinaatistossa seuraavasti

$$\mathbf{i}_s = i_\alpha(t) + j i_\beta(t) = \frac{2}{3} (i_U(t) + e^{j\frac{2\pi}{3}} i_V(t) + e^{j\frac{4\pi}{3}} i_W(t)) \quad (2.3)$$

Yhtälön matemaattista rakennetta voidaan soveltaa myös koneen jännite- ja käämivuonkomponenttien tarkastelussa.

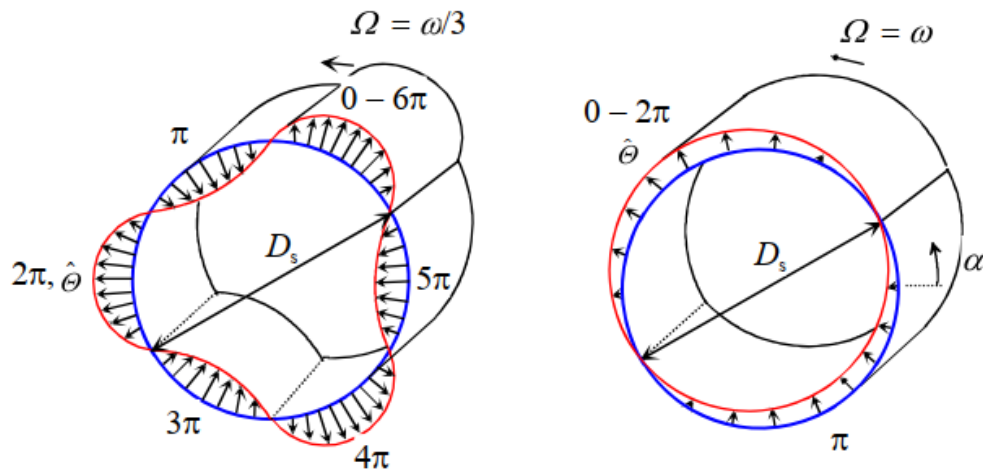
Kuva 2.8 selventää vaihevirtojen summavektorin muodostumista.



Kuva 2.8. Yhtälön (2.3) esitys symmetrisen kolmivaihejärjestelmän virroista i_a , i_b ja i_c . Luonnollisessa koordinaatistossa (vasemmalla) sekä sinimuotoisten virtojen synnyttämät virtasummien amplitudit (oikealla). Kone tuntee sen tasossa kulmanopeudella ω_s pyörivänä summavektorina. Lähtötilanteessa $\Sigma\theta_1 = \theta_{A1} + \theta_{B1} + \theta_{C1}$. Summavektorin komponenttien pituudet muuttuvat siten, että noin 45 sähköasteen kuluttua $\Sigma\theta_2 = \theta_{C2} + \theta_{A2} + \theta_{B2}$. Avaruusvektoriesityksissä pyörimissuuntaa tarkastellaan luonnollisen koordinaatiston etenemän vuoksi vastapäivään (Pyrhönen, 2010).

Kuvasta 2.8 voidaan todeta, että koneen tuntema amplitudi määräytyy luonnollisen koordinaatiston vaihevirtojen summasta. Kuvan 2.8 esimerkissä kolmivaihejärjestelmän sähköinen kulmanopeus ω on yhtä suuri kuin mekaaninen kulmanopeus Ω .

Sähkökoneella napapariluku p määrää koneen mekaanisen pyörimisnopeuden. Kuva 2.9 havainnollistaa kolmivaiheista staattorikämmivuojaikaa eri napapariluvuilla.



Kuva 2.9. Staattorikämmivuovektorin aaltomuotoesitys, kun koneen napapariluku $p = 3$ (vasemmalla) ja $p = 1$ (oikealla). Mekaaninen kulmanopeus saadaan jakamalla sähköinen kulmanopeus rad/s koneen napapariluvulla. Näin kaksinapaisessa koneessa sähköinen ja mekaaninen kulmanopeus ovat yhtä suuria ja kuusinapaisessa koneessa sähköinen kulmanopeus on pienempi suhteessa $1/p$ (Pyrhönen, 2010).

Seuraavaksi tarkastellaan avaruusvektoriteorian koordinaatistojen välillä tarvittavia geometrisia muunnoksia.

2.5.1 Clarken muunnos

Avaruusvektoriteoreemassa symmetrisen kolmivaihejärjestelmän sinimuotoiset suureet muunnetaan ensin kaksivaiheiseksi järjestelmäksi.

Matriisimuotoinen esitys Clarken muunnoksesta on

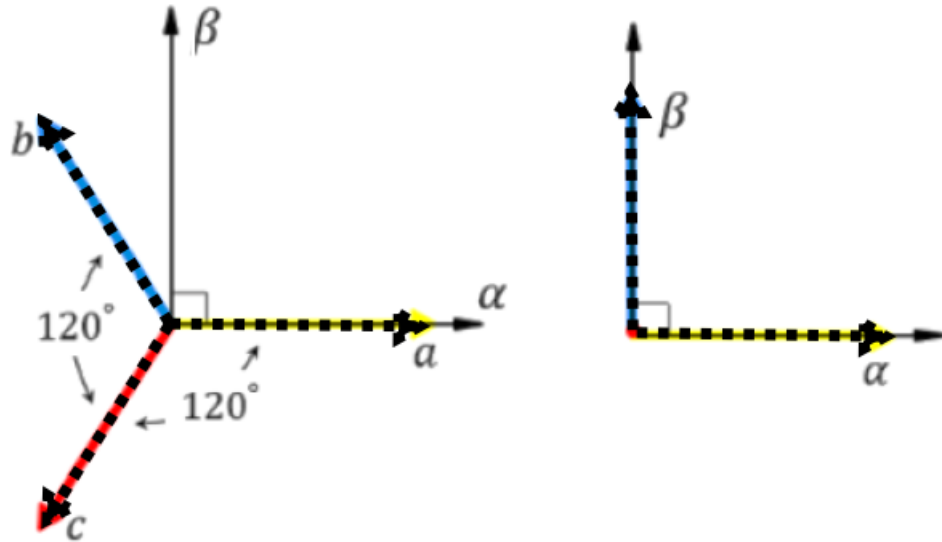
$$\begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \\ i_0 \end{bmatrix} = \begin{pmatrix} 2 \\ 3 \end{pmatrix} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} \quad (2.4)$$

Siirryttäessä α - β -koordinaatistosta normaalikoordinaatistoon, muunnosta sovelletaan myös käänteisenä

$$\begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} = \left(\sqrt{\frac{2}{3}} \right) \begin{bmatrix} 1 & 0 & 1 \\ -\frac{1}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} & 1 \\ -\frac{1}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \\ i_0 \end{bmatrix} \quad (2.5)$$

Yhtälöissä (2.4) ja (2.5) on mukana myös virran nollakomponentti i_0 , joka kolmivaiheisessa symmetrisessä järjestelmässä on normaalisti nolla.

Muunnosta on havainnollistettu polaarikoordinaatistoesityksellä kuvassa 2.10.



Kuva 2.10. Polaarikoordinaatistoesitys Clarke-muunnoksesta. Vasemmalla a- b ja c ovat luonnollisen koordinaatiston suureita. Oikealla Clarke-muunnetut α - β -komponentit. Käänteismuunnoksessa suunta on vastakkainen.

Clarcken muunnoksena tunnettu yhtälö pätee luonnollisen järjestelmän huippuarvoille. Mikäli yhtälö halutaan skaalata tehollisarvoille, tulee se kertoa huippu- ja tehollisarvon suhdeluvulla. Yleensä vektoriesityksessä on kuitenkin luonnollista valita huippuarvosuhde, jolloin vektoreiden välillä ovat voimassa kolmivaihejärjestelmän piirianalyysin mukaiset suhteet ja matemaattisessa tarkastelussa voidaan käyttää koneen sijaiskytkennän arvoja sellaisenaan.

2.5.2 Parkin muunnos

Clarcken muunnoksella kaksivaiheiseksi muunnettu järjestelmä on matemaattisesti kevyempi verrattuna luonnolliseen koordinaatistoon. Vaikka muutos vähentää muuttujia kahteen, pyörivän järjestelmän analysointi on edelleen verrattain työlästä suureiden arvon vaihdellessa sinimuotoisesti.

Digitaaliseen elektroniikkaan perustuvaa säätöpiiriä hyödynnettäessä, on stationaarisessa koordinaatiston tahtinopeudella pyörivä avaruusvektori saatava näyttämään tasasuurelta. Se onnistuu Parkin muunnoksella

Matriisimuotoinen esitys Parkin muunnoksesta on

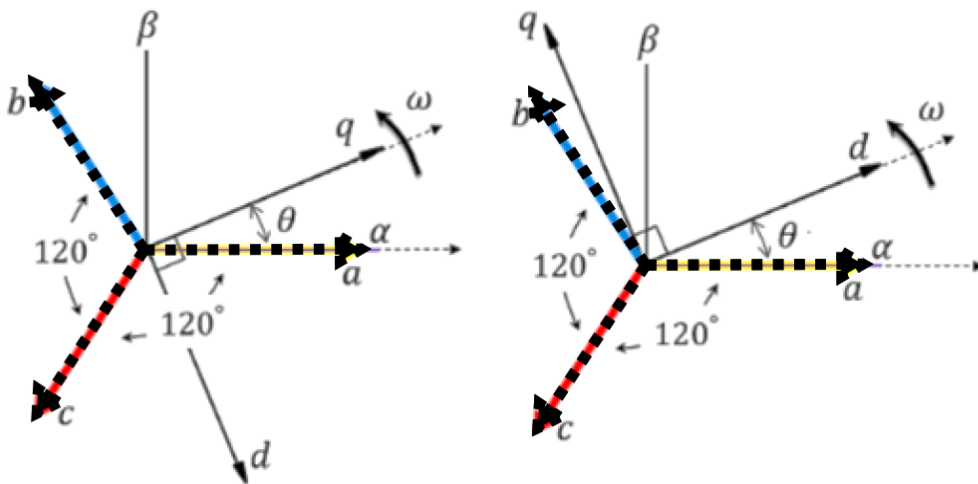
$$\begin{bmatrix} i_d \\ i_q \\ i_0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \sin(\theta) & 0 \\ -\sin(\theta) & \cos(\theta) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \\ 0 \end{bmatrix} \quad (2.6)$$

Siirryttäessä d-q-koordinaatistosta α - β -koordinaatistoon, muunnosta sovelletaan myös käänteisenä

$$\begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\theta) & -\sin(\theta) & 0 \\ \sin(\theta) & \cos(\theta) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \\ i_0 \end{bmatrix} \quad (2.7)$$

Yhtälöissä (2.6) ja (2.7) on mukana myös virran nollakomponentti i_0 , joka kolmivaiheisessa symmetrisessä järjestelmässä on normaalisti nolla.

Parkin muunnosta on havainnollistettu polaarikoordinaatistoesityksellä kuvassa 2.11.



Kuva 2.11. Polaarikoordinaatistoesitys Park-muunnoksesta. Vasemmalla a- b ja c ovat luonnollisen koordinaatiston suureita. Lisäksi vasemmalla on esitetty Clarke-muunnetut α - β -komponentit. Oikealla α - β -komponenteista Park-muunnettu pitkittäisakselin d-komponentti ja poikittaisakselin q-komponentti. θ merkitsee moottorimallista tai fyysisestä takaisinkytkennästä saatavaa rotorin kulmaa. Käänteismuunnoksessa suunta on vastakkainen.

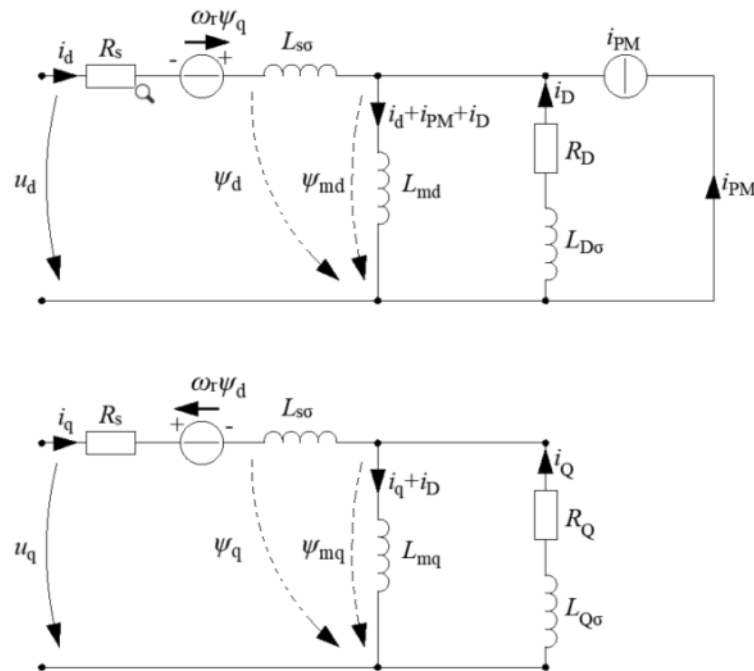
Clarcken muunnos on verrattain helppo sisäistää, koska järjestelmä pyörii edelleen tahtinopeudella. Park-muunnosta voidaan yrittää havainnollistaa siten, että esimerkiksi kuvan 2.11 stationaarisen koordinaatiston päällä pyöritetään kompleksista tahtikoordinaatistoa avaruusvektorin tahtinopeudella. Näin Clarke-muunnetun tahtikoordinaatiston suhteen tarkasteltuna avaruusvektori pysyy paikallaan.

Maanläheisempi tapa on ajatella itsensä pyörivän karusellin kyytiin tai sekoittaa kahvia kupissa lusikalla, ja sen jälkeen pyöriä itse kahvikuppi kädessä samaan suuntaan kupissa pyörivän pyörteen kanssa.

2.5.3 Vääntömomentin tuotto (TÄHÄN JÄIN)

Edellisissä kappaleissa pyörivä kolmivaiheinen järjestelmä muunnettiin Clarke-muunnoksen avulla kaksivaiheiseen, α - β -kompleksikoordinaatistoon. Tämä kaksivaiheinen järjestelmä muunnettiin edelleen Park-muunnoksella pyörivään d- q-tahtikoordinaatistoon.

Vääntömomentin tuottamiseksi kaksiakselimallin filosofian mukaisesti, tarkastellaan koneen suureita staattisessa tilassa roottorikoordinaatiston sijaiskytkennän kautta kuvan 2.12 mukaisesti



Kuva 2.12. Kestomagneettitahtikoneen yleinen, kaksiakselimallin mukainen sijaiskytkentä roottorikoordinaatistoon kiinnitettynä. Roottorikoordinaatistossa konetta syötetään tasajännitteillä u_d pitkittäiselle d-akselille (ylempi) sekä u_q poikittaisella q-akselille (alempi). Staattorin resistanssi R_s sekä staattorihajaannus L_{σ} on otettava huomioon molemmilla akseleilla. Koneen magnetointi-induktanssin komponentit L_{md} ja L_{mq} jakautuvat akseleille koneen magneettiipiirin rakenteen mukaisesti. Kestomagneetin tuottama käämivuo ψ_{PM} voidaan esittää ideaalisena virtalähteenä i_{PM} , joka generoi magneetivaa virtasummaa magnetointi-induktanssin haaraan. Koneen käämivuokomponenttien ψ_d ja ψ_q ja roottorin kulmanopeuden ω_r tulo on koordinaatistojen nopeuserosta johtuva liikejännitetermi. Kuvassa on esitetty erillismagnetoiduissa tahtikoneissa tyypillisesti käytetty vaimennuskäämi (R_D ja R_Q), mutta kestopmagneettitahtikoneissa tätä ei yleensä ole tai se voidaan jättää tarkastelun ulkopuolelle.

Tarkastellaan seuraavaksi kuvassa 2.12 esitetyn kaksivaiheisen sijaiskytkennän mukaisia yhtälöitä kestopagneettitahtikoneen rakenteen mukaisesti.

Koneen jänniteyhtälö pitkittäiselle d-akselille

$$u_d = R_s i_d + \frac{d\psi_d}{dt} - \omega_r \psi_q \quad (2.8)$$

sekä poikittaiselle q-akselille

$$u_q = R_s i_q + \frac{d\psi_q}{dt} - \omega_r \psi_d \quad (2.9)$$

Staattorikäänivuon d-akselin komponentti, jossa on mukana kestopagneetin generoima käänivuo

$$\psi_d = L_d i_d + L_{md} i_D + \psi_{PM} \quad (2.10)$$

Staattorikäänivuon q-akselin komponentti

$$\psi_q = L_q i_q + L_{md} i_q \quad (2.11)$$

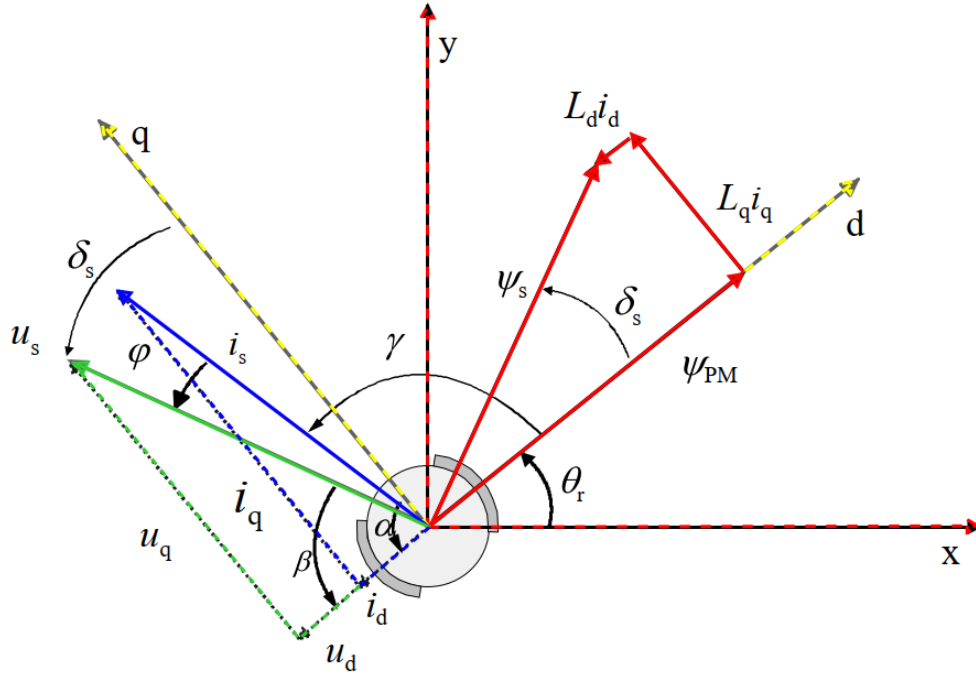
Staattorikäänivuon d- ja q-akselin komponentit yhdistettynä

$$\psi_s = \sqrt{\psi_d^2 + \psi_q^2} \quad (2.12)$$

sekä kestopagneetin generoima käänivuo pitkittäisen magnetointi-induktanssin ja napakäänivirran tulona

$$\psi_{PM} = i_{PM} L_{md} \quad (2.13)$$

Sijaiskytkennässä sekä yhtälöissä (2.8)..(2.13) esitettyjä suureita on luonnollista tarkastella vektoripiirroksena kuvan 2.13 mukaisesti



Kuva 2.13. Esimerkki kestopagneettitahtikoneen kaksiakselimallin mukaisesta vektoripiirroksesta suhteellisarvoesityksenä. Koneita magnetoidaan pitkittäisen d-akselin komponenteilla ja poikittainen q-akseli tuottaa vääntömomenttia. Staattori- (xy, punainen katkoviiva) ja roottori-koordinaatiston (dq, keltainen katkoviiva) välillä on roottorin kulmaero θ_r . Staattorikämmivuon ψ_s muodostavat koneen kestopagneettikämmivuo ψ_{PM} sekä poikittais- ja pitkittäisakselin induktanssit L_q ja L_d kerrottuna staattorivirran (sininen) i_s -komponenteilla i_d ja i_q . Staattorijännite u_s (vihreä). Kestopagneettikämmivuon ja staattorikämmivuon välinen tehokulma δ_s sekä kestopagneettikämmivuon ja staattorivirran välinen virtakulma γ kasvavat koneen kuormituksen mukaan. Staattorivirran ja jännitteen välinen vaihekulma $\cos \varphi$ määrittelee koneen tehokertoimen. Kuvan esimerkissä virta on pyörimissuuntaan nähden jännitettä perässä, jolloin koneen tehokerroin on induktiivinen. Punaisella viivalla indikoidaan ilmapääläkämmivuota. Jännitekomponentit on merkitty vihreällä katkoviivalla ja virtakomponentit vastaavasti sinisellä. Staattoriresistanssia ei ole otettu huomioon.

Kuvassa 2.13 esitetyn vektoripiirroksen ilmapääläkämmivuon komponenttien perusteella kestopagneettikoneen staattorikämmivuolle ψ_s voidaan Pythagoraan lauseen mukaan kirjoittaa yhtälö

$$\psi_s = \sqrt{(\psi_{PM} + L_d i_d)^2 + (L_q i_q)^2} \quad (2.14)$$

joka sijoitettuna vääntömomentin yhtälöön (2.2) antaa

$$T_e = \frac{3}{2} p ((i_d + i_q)(\psi_{PM} + L_d i_d - L_q i_q)) \quad (2.15)$$

Yhtälöä (2.15) edelleen sieventäen saadaan

$$T_e = \frac{3}{2} p (\psi_{PM} i_q + (L_d - L_q) i_d i_q) \quad (2.16)$$

Yhtälöstä (2.16) voidaan todeta, että kestmagneettitahtikoneella on kaksi vääntömomenttikomponenttia koneen magneettiipiirin rakenteen mukaan.

Umpinapaisen roottorin tapauksessa pitkittäisakselin induktanssi L_d on likimääräisesti tarkasteltuna yhtä suuri poikittaisakselin induktanssin L_q kanssa. Näin yhtälö (2.16) sieventyy muotoon.

$$T_e = \frac{3}{2} p (\psi_{PM} i_q) \quad (2.17)$$

Yhtälöstä (2.17) voidaan todeta, että yleinen vääntömomentin tuottokyky riippuu termistä $\psi_{PM} i_q$.

Avonapaisen roottorirakenteen tapauksessa $L_q \neq L_d$, jolloin yhtälön (2.16) jälkimmäinen termi $(L_d - L_q) i_d i_q$ tuottaa d- ja q- akselin magneettisesta epäsymmetriasta johtuvaa reluktanssivääntömomenttia. Tämä on luonnollista isotrooppiselle roottorille, joka pyrkii kääntymään aina magneettiipiirin reluktanssiminimiä vastaavaan asentoon.

Tätä ilmiötä havainnollistetaan kuvalla 2.14, jossa on esitetty kestmagneettitahtikoneen umpi- ja avonapainen roottorirakenne d-q-tasossa.



Kuva 2.14. Kestomagneettitahtikoneen isotrooppinen roottori (vasemmalla), jonka d- ja q-akseleilla ei ole induktanssieroa. D-q-tasossa anisotrooppisella roottorilla (oikealla) d-akselin induktanssi on pienempi kuin q-akselin, jolloin koneella on mahdollista tuottaa myös reluktanssivääntömomenttia. Koneen pitkittäinen d-akseli ja poikittainen q-akseli. Molemmissa tapauksissa $p = 1$.

Induktanssisuhteella tarkoitetaan magneettinavan pitkittäis- ja poikittaisakselin suuntaisen magneettisen ilmavälin pituuden eroavuuden aiheuttamaa muutosta niiden suuntaisiin induktansseihin. Kestomagneettimateriaalien tyypillisen permeabiliteetin μ_r ollessa likimain 1, avonapaisen koneen tapauksessa induktanssien arvot määräytyvät tyypillisesti rautaosien sijoittelun ja dimensioiden perusteella.

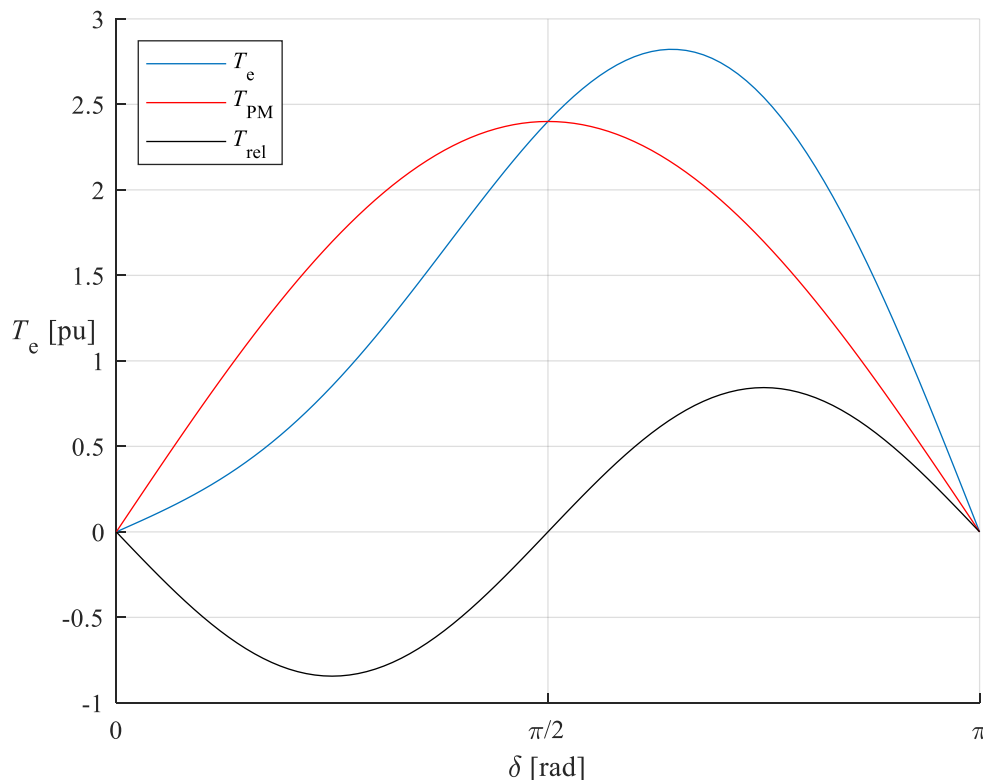
Kuvassa 2.14 vasemmalla olevan koneen magneettisen ilmvälän pituus on likimain sama pitkittäis- ja poikittaisakseleilla. Rakennetta kutsutaan umpinapaiseksi. Kuvassa 2.14 oikealla koneen induktanssit poikkeavat toisistaan. Kone on avonapainen.

Induktanssisuhde voi olla yli tai alle yhden (1) riippuen roottorin rakenteesta. Induktanssisuhteella on merkittävä vaikutus koneen kykyyn tuottaa vääntömomenttia ja vastaavasti siihen tarvittavan virran suuruuteen. Avonapainen kestopagneettikone, jonka d-akseli on q-akselia reluktiivisempi tarvitsee negatiivista d-akselin virtaa reluktanssivääntömomentin tuottamiseksi. Rautaosien dimensiot, rakenne ja niiden keskinäinen sijoittelu vaikuttavat olennaisesti myös koneen dynaamisiin ominaisuuksiin ja myös koneen käytössä aiheuttamaan ääneen.

Reluktanssivääntömomentin maksimoimiseksi d- ja q- akselien induktanssien suhdetuvun L_d/L_q pitäisi olla mahdollisimman suuri. Yhtälön (2.16) sijaan ominaisuutta on mielekkäämpää tarkastella tahtikoneen yleisen tehokulmayhtälön mukaan, joka tehollisarvoille sievennettynä on

$$T=3p\left(\frac{U_{\text{sph}} E_{\text{PM}}}{\omega_s^2 L_d} \sin\delta_s + U_{\text{sph}}^2 \frac{L_d - L_q}{\omega_s^2 2L_d L_q} \sin 2\delta_s\right) \quad (2.18)$$

Tätä ominaisuutta havainnollistetaan tehokulman funktiona kuvassa 2.15.



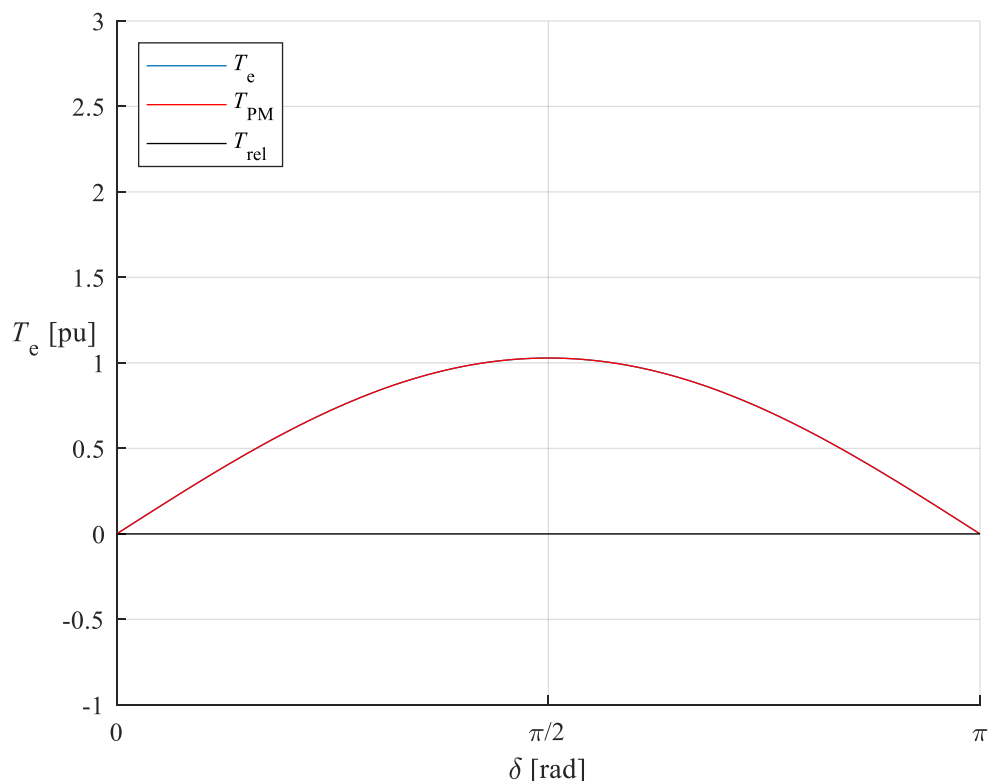
Kuva 2.15. Avonapaisen kestopagneettitahtikoneen vääntömomentti tehokulman funktiona, kun $L_q = 0,8$, $L_d = 0,3$, $u_s = 0,9$, $\psi_{PM} = 0,8$, $i_s = 1$ ja $\omega_s = 1$. Pitkittäis- ja poikittaisakselin reluktanssieron tuottama vääntömomentti $T_{rel} = (L_d - L_q)i_d i_q$. Reluktanssitermi vastustaa vuon muutosta kulman kasvaessa, kunnes tehokulma on kääntynyt 90 asteeseen. Tästä eteenpäin reluktanssitermi on samansuuntainen kestopagneetin käämivuon kanssa. Tällä induktanssisuhteella kone tuottaa maksimivääntömomenttinsa tehokulman ollessa noin 115 astetta. 90 asteen ylittäminen vaatii negatiivista d-akselin virtaa. Staattoriresistanssia ei oteta huomioon.

Kuvasta 2.15 huomataan, kuinka suurempi poikittainen magnetointi-induktanssi aiheuttaa korkeamman ankkurireaktion, edelleen suurentaen napakulmaa yli 90 asteen. Napakulman kasvattaminen yli 90 asteen edellyttää negatiivista d-akselin virtaa. Tätä tutkitaan tarkemmin kappaleessa 2.6.

Umpinapaisen koneen ($L_q/L_d \approx 1$) tapauksessa yhtälön jälkimmäinen termi supistuu pois, ja vääntömomentin tuottokyky määräytyy pitkittäisakselin tahti-induktanssin ja kestopagneetin tuottaman kiinteän käämivuon perusteella.

$$T = 3p \frac{U_{sph} E_{PM}}{\omega_s^2 L_d} \sin \delta_s \quad (2.19)$$

Yhtälöä (2.19) havainnollistetaan tehokulman funktiona kuvassa 2.16.



Kuva 2.16. Umpinapaisen kestopagneettitahtikoneen vääntömomentti (T_e ja T_{PM} ovat päällekkäin) tehokulman funktiona, kun $L_q = L_d = L_s = 0,7$, $u_s = 0,9$, $\psi_{PM} = 0,8$, $i_s = 1$ ja $\omega_s = 1$. Kone ei tuota reluktanssivääntömomenttiä, koska roottorilla ei ole induktanssieroja. Staattoriresistanssia ei oteta huomioon.

Kappaleessa todettiin, että anisotrooppisella roottorirakenteella varustettu kestopagneetikone tuottaa maksimimomenttinsa yli 90 asteen tehokulman arvoilla, joka edellytti negatiivisen magnetointivirran syöttämistä d-akselille. Seuraavaksi tarkastelemme menetelmää, jolla avonapaisen kestopagneettitahtikoneen suorituskyky voidaan optimoida yli 90 asteen napakulman arvoilla.

2.6 Staattorivirran minimointimenetelmä

Jotta avonapaisesta kestopagneettitahtikoneesta saadaan optimaalinen vääntömomentti mahdollisimman pienillä staattorin virtalämpöhäviöillä, tulee staattorivirta jakaa d- ja q-akselin suuntaisiin komponentteihin koneen induktanssisuhteen perusteella. Näillä konekohtaisilla virtakomponenteilla koneen vääntömomentti maksimoidaan vaadittavaan virtaan nähden.

Staattorivirran minimimoivasta säätötavasta on yleisesti esitetty kaksi erilaista toteutusta lähteissä (Jahns et al. 1986 sekä Kim J.-M. ja Sul S.-K. 1997a). Tässä yhteydessä tarkastelemme jälkimmäistä metodia.

Edellisessä kappaleessa johdettiin ristikenttäperiaatteen ja vektoriesityksen pohjalta kestopagneettitahtikoneen vääntömomentille yhtälö (2.16), joka kerrataan tässä

$$T_e = \frac{3}{2} p (\psi_{PM} i_q + (L_d - L_q) i_d i_q) .$$

Lisäksi staattorivirran komponenteille on voimassa

$$i_s = \sqrt{i_d^2 + i_q^2} \quad (2.20)$$

Yhdistämällä (2.20) yhtälön (2.16) kanssa, saadaan

$$T_e = \frac{3}{2} p ((\psi_{PM} + (L_d - L_q) i_d) \sqrt{i_s^2 + i_d^2}) \quad (2.21)$$

Sieventämällä yhtälöä d-akselin virran suhteen saadaan suhteellisarvoesityksenä

$$\begin{aligned} T_e \frac{3}{2} p &= ((\psi_{PM} + (L_d - L_q) i_d) (i_s^2 + i_d^2)^{\frac{1}{2}}) \quad (2.22) \\ &= (\psi_{PM} + (L_d - L_q) i_d) \left(\frac{1}{2} (i_s^2 - i_d^2)^{\frac{1}{2}} (-2i_d) \right) + (L_d - L_q) (i_s^2 + i_d^2)^{\frac{1}{2}} \\ &= (L_d - L_q) \sqrt{i_s^2 + i_d^2} - \frac{(\psi_{PM} + (L_d - L_q) i_d) i_d^2}{\sqrt{i_s^2 + i_d^2}} \end{aligned}$$

Yhtälöstä (2.22) saadaan koneelle maksivääntömomentti etsimällä vääntömomentin ääriarvo

$$i_d^2 + \frac{\psi_{PM}}{2(L_d - L_q)} i_d - \frac{i_s^2}{2} = 0 \quad (2.23)$$

Sievennetyllä yhtälöllä (2.23) on kaksi mahdollista ratkaisua seuraavasti

$$i_{dMTPA} = \frac{\psi_{PM}}{4(L_q - L_d)} \pm \sqrt{\frac{\psi_{PM}^2}{16(L_q - L_d)^2} + \frac{i_s^2}{2}} \quad (2.24)$$

Yhtälön (2.24) jälkimmäisen termin etumerkki määräytyy induktanssisuhteen L_q / L_d mukaan, etumerkin ollessa negatiivinen, kun $L_q > L_d$.

Poikittaisakselin virtakomponentti saadaan yhtälöstä

$$i_{qMTPA} = \sqrt{i_s^2 - i_{dMTPA}^2} \quad (2.25)$$

Yhtälöiden (2.24) ja (2.25) perusteella saadaan staattorivirran minimipiste suhteellisarvoesityksenä tietyllä vääntömomentilla etsimällä hyperbelin ja origon välinen minimietäisyys i_d / i_q -tasossa, joka määrittelee ohjearvot virroille i_d ja i_q .

Menetelmää kutsutaan staattorivirran minimoinniksi (MTPA). Tarkastellaan seuraavaksi, kuinka virtakomponentit esitetään i_d / i_q -koordinaatistossa.

2.6.1 MTPA trajektori

Staattorivirran minimointimenetelmän virtareferenssejä on mielekästä tarkastella i_d / i_q -koordinaatistossa, jossa x-akselilla on pitkittäisen d-akselin virtakomponentti ja y-akselilla poikittaisen q-akselin komponentti. Trajektoria kuvaajat ratkaistaan i_d -komponentin suhteen.

Staattorivirran yhtälöstä (2.20) virran q-komponentti on staattorivirran ja d-komponentin neliön erotus.

$$i_q = \sqrt{i_s^2 - i_d^2}$$

Eri vääntömomenttien hyperbelikäyrät saadaan ratkaisemalla q-akselin virta vektoritu-
loon perustuvasta yhtälöstä suhteellisarvomuodossa

$$i_q = \frac{T_e}{(\psi_{PM} + (L_d - L_q)i_d)} \quad (2.26)$$

Koneen käytettävissä olevan jänniterajan yhtälö määräytyy staattorikämmivuon yhtälöstä (2.14)

$$\psi_s = \sqrt{(\psi_{PM} + L_d i_d)^2 + (L_q i_q)^2} \leq \frac{u_s}{\omega_s} \quad (2.27)$$

Staattorijännitteen rajoittama ellipsi voidaan ratkaista q-akselin virtana kämmivuon yhtälöstä (2.27) Se sievenee muotoon

$$i_q = \sqrt{\frac{\psi_s^2 - (\psi_{PM} + L_d i_d)^2}{L_q^2}} \quad (2.28)$$

Toisaalta jännitteelle on voimassa

$$u_s = \sqrt{u_d^2 + u_q^2} \quad (2.29)$$

Jossa jännitteen pitkittäisakselin d-komponentti

$$u_d = -\omega_s L_q i_q \quad (2.30)$$

Vastaavasti poikittaisakselin q-komponentti

$$u_q = \omega_s (\psi_{PM} + L_d i_d) \quad (2.31)$$

Yhtälöiden (2.30) ja (2.31) perusteella jänniteraja voidaan vaihtoehtoisesti määrittellä

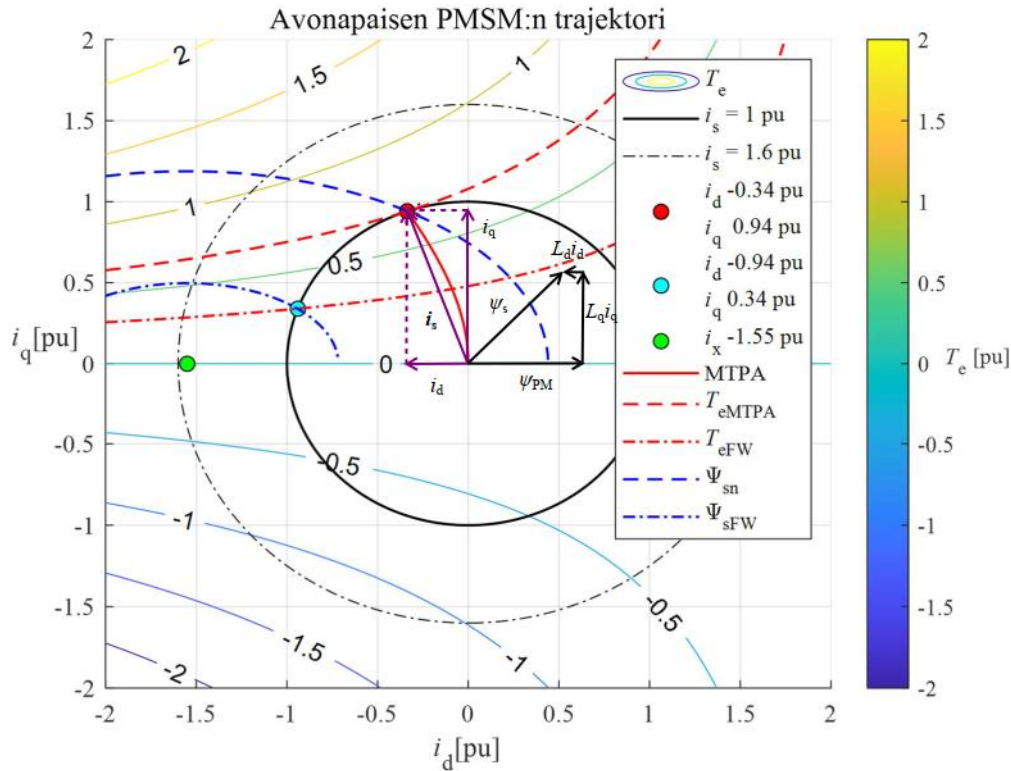
$$i_q = \sqrt{\frac{\psi_s^2 - (\psi_{PM} + L_d i_d)^2}{L_q^2}} \quad (2.32)$$

Staattorivirran minimointimenetelmän virtaohjeiden mukainen ura voidaan yhtälön (2.23) perusteella esittää

$$i_s^2 = i_d^2 + \frac{\psi_{PM}}{L_d - L_q} i_d \quad (2.33)$$

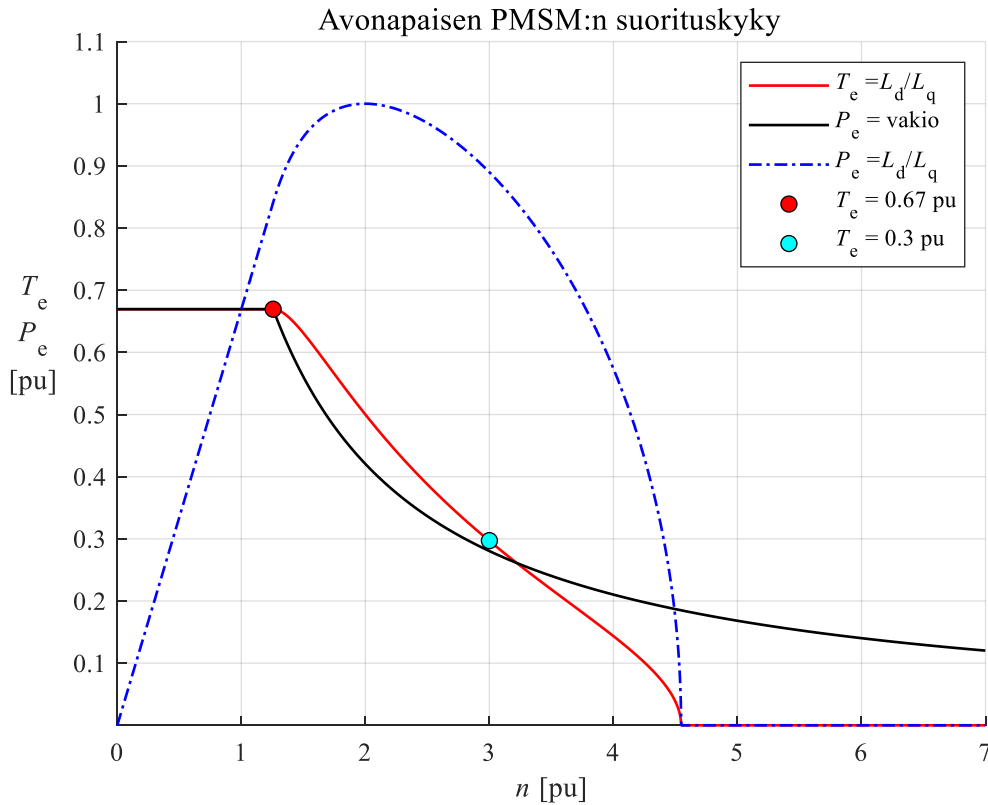
Kaikki MTPA-säätömenetelmän kuvaajat on mielekästä koota avonapaisen kestopaattikoneen trajektoriksi i_d / i_q -koordinaatistoon.

Kuva 2.17 sisältää kappaleessa 2.6.1 esitetyt yhtälöt graafisesti.



Kuva 2.17. Avonapaisen kestopagneettitahtikoneen MTPA-säätömenetelmän mukainen trajektorii i_d / i_q -koordinaatistossa. Mustilla, origon suhteen symmetrisillä ympyräkäyrillä on merkitty koneen virtarajat. Yhtäjaksoinen musta viiva osoittaa nimellisvirtarajan $|i_s| = 1$ ja musta piste katkoviiva ylikuormitusvirran $i_{\max} = 1,6$ pu. Taustalla sinisestä keltaiseen liukuva hyperbelikäyrästä indikoi koneen vääntökäyriä eri staattorivirran arvoilla siten, että virtakulma suurenee vääntömomentin kasvaessa. Origosta lähtevä punainen käyrä on koneen induktanssisuhteen ja eri kuormitussuhteille optimoitavan vääntömomentin ohjearvokäyrä. Punainen katkoviivakäyrä edustaa koneesta saatavaa vääntömomenttia, joka punaisella ympyrällä korostetussa nimellis pisteessä on 0,67 pu. Violetilla merkityn staattorivirran i_s d-akselin virtakomponentti on $i_d = -0,34$ ja q-akselilla $i_q = 0,94$. Nimellis pisteessä staattorikäänivuon itseisarvo $\psi_s = 0,76$ on kääntynyt q-akselin induktanssin vaikutuksesta 45 asteen kulmaan käämnivuoön nähden. Säädön virtavektori on negatiivisen d-akselin virran vuoksi 110 asteen kulmassa käämnivuoön ψ_{PM} nähden. Ylikuormitusvirralla vääntömomentti $T_e = 1,6 \cdot 0,67 = 1,07$ pu. Vihreä piste osoittaa koneen jännitehyperbelien origon. Sininen katkoviiva indikoi kentänheikennyksen aloituspistettä nimellisvääntömomentilla, jossa kone törmää jänniterajaan nopeudella $\omega_s = 1,26$. Turkoosi piste indikoi kentänheikennyksen toimintapistettä nopeudella 3 pu, jossa virtakomponentit $i_d = -0,94$, $i_q = 0,34$ tuottavat vääntömomenttia 0,3 pu. Tarkasteltavan koneen parametrit ovat $|u_s| = 1$, $\psi_{PM} = 0,62$, $L_d = 0,4$, $L_q = 0,67$. Staattoriresistanssia ja magneettiipiirin kyllästymistä ei oteta huomioon.

Kuvasta 2.17 havaitaan, että negatiivisen i_d :n itseisarvo kasvaa koneen induktanssieron mukana. Kuvan 2.17 trajektorissa havainnollistetun koneen suorituskyky on esitetty kuvassa 2.18.



Kuva 2.18. Kuvassa 2.17 olevan avonapaisen kestopagneettitahtikoneen MTPA -trajektoria mukaileva vääntömomenttikuvaaja nopeusalueella $\omega_s = 0.7$ pu. Kone törmää nimellisvääntömomentillaan jänniterajaan punaisen ympyrän kohdalla nopeudella $\omega_s = 1,26$. Kentänheikennykseen siirryttäessä punainen kuvaaja indikoi koneen induktanssisuhteen L_d/L_q mukaan laskettua suorituskykyä. Musta kuvaaja on koneen tyypistä riippumaton, liikeyhtälön mukainen vakiotehokäyrä. Sininen pistekatkoviiva indikoi koneen tahti-induktanssin mukaan laskettua tehokäyrää. Koneen huipputeho staattorivirtakomponenteilla $i_d = -0,8$ ja $i_q = -0,59$ on nopeudella $\omega_s = 2$ kun vääntömomentti $T_e = 0,49$ pu. Turkoosi ympyrä indikoi koneen induktanssisuhteen mukaan laskettua, toimintapistettä nopeudella 3 pu, jossa koneen tuottama vääntömomentti on pudonnut arvoon $T_e = 0,67 - 0,37 = 0,3$ pu. Nostettaessa koneen nopeutta yli 3 pu, tahti-induktanssi alkaa rajoittaa koneen kuormitettavuutta. Koneen parametrit ovat $u_s = 1$, $i_s = 1$, $\psi_{PM} = 0,62$, $L_d = 0,4$, $L_q = 0,67$. Staattoriresistanssia ja magneettiipiirin kyllästymistä ei oteta huomioon.

2.7 Kentänheikennys

Kestomagneettitahtikoneen nopeuden kasvaessa sen tuottama käämivuo ylittää välipiirin jännitteen eikä modulointia voida toteuttaa MTPA-menetelmän mukaan.

Mikäli kestopagneettitahtikoneella halutaan tehokkaasti hyödyntää kentänheikennysaluetta, pitää d- ja q-akselin virtareferenssit muodostaa ottaen huomioon koneen vastasähkömotorinen voima. Koneen d-akselin negatiivisen virtakomponentin itseisarvoa on lisättävä vuon pienentämiseksi.

Säädössä pitää ottaa huomioon myös koneen karakteristinen virta, jota on mielekästä käyttää suhteellisarvoesityksenä kestopagneettikäämivuon ja koneen pitkittäisakselin tahti-induktanssin perusteella seuraavasti

$$i_x = \frac{\psi_{PM}}{L_d} \quad (2.34)$$

Yhtälön (2.34) kuvaama karakteristinen virta i_x määrittää koneen suorituskyvyn kentänheikennyksessä siten, että lähellä $i_x = 1$ pu arvoja olevat konetyypit ovat kentänheikennysominaisuuksiltaan erinomaisia.

Kun karakteristista virtaa tarkastellaan suhteessa koneen staattorivirtaan, voidaan määrittellä koneen tarvitsemat säätömenetelmät kentänheikennysalueella. Tarkastellaan niitä seuraavaksi.

2.7.1 FW-säätömenetelmä

Kun yhtälössä (2.34) esitelty karakteristinen virta i_x on hieman suurempi kuin yksi, koneella on hyvä suorituskyky kentänheikennyksessä. Moottorin nopeuden kasvaessa yhtälön (2.28) tai (2.32) mukaan laskettu jännite-ellipsi pienenee kohti yhtälön (2.34) osoittamaa pistettä negatiivisella d-akselilla.

Vakiovoalueella nämä jänniterajat eivät rajoita koneen vääntömomentintuottokykyä, mutta nopeuden kasvaessa jänniteraja tulee ottaa huomioon yhtäläisesti virtarajan ohella.

Yhdistämällä yhtälöt (2.16) ja (2.23) saadaan kentänheikennysalueen virta- ja jänniterajat huomioiva yhtälö

$$(L_d^2 - L_q^2)i_d^2 + (2\psi_{PM}L_d)i_d + \left(L_q^2 i_s^2 + \psi_{PM}^2 - \frac{u_s^2}{\omega_s^2}\right) = 0 \quad (2.35)$$

Yhtälö (2.35) ratkaistaan d-akselin virran suhteen, saadaan

$$i_{dFW} = \frac{\psi_{PM}L_d - \sqrt{L_d\psi_{PM}^2 + (L_q^2 - L_d^2)\left(\psi_{PM}^2 + L_q^2 i_s^2 - \frac{u_s^2}{\omega_s^2}\right)}}{(L_q^2 - L_d^2)} \quad (2.36)$$

Josta virran q-komponentti yhtälön (2.20) mukaan

$$i_{qFW} = \sqrt{i_s^2 - i_{dFW}^2}$$

Kappaleen 2.71 yhtälöitä sovelletaan koneelle, jolla karakteristinen virta i_x on hieman suurempi kuin yksi.

2.7.2 MTPV-säätömenetelmä

Kun yhtälössä (2.34) esitelty karakteristinen virta $i_x < 1$, koneella on teoreettisesti tarkasteltuna mahdollista ajaa ääretöntä nopeutta kentänheikennyksessä. Karakteristisen virran

määräämään pisteen asettuessa invertterin nimellisvirtaympyrän sisäpuolelle, koneen va-
kiotehokäyrää voidaan jatkaa hyvin syvälle kentänheikennykseen. Suorituskyvyn opti-
moimiseksi syvällä kentänheikennyksessä on virtareferenssit laskettava eri tavoin.

Yhdistämällä staattorikämmivuon yhtälöt (2.10)...(2.12) vääntömomentin yhtälöön (2.16)
saadaan syvällä kentänheikennyksessä koneen vääntömomenttiohjeeksi

$$T_e = \frac{3}{2} p \left(\psi_{PM} + \left(\frac{1}{L_q} - \frac{1}{L_d} \right) + \frac{\psi_{PM}}{L_d} \right) \sqrt{\psi_s^2 + \psi_d^2} \quad (2.37)$$

Derivoimalla (2.37) d-akselin kämmivuokomponentin suhteen, ja asettamalla yhtälö
nollaksi johtaa

$$(\psi_{PM} + L_d i_d)^2 + \frac{L_q}{L_d - L_q} (\psi_{PM} + L_d i_d) - (L_q i_q)^2 = 0 \quad (2.38)$$

MTPV-säätömenetelmässä staattorivirran vektori $i_s < 1$, jolloin virran d-komponentin re-
ferenssi lasketaan

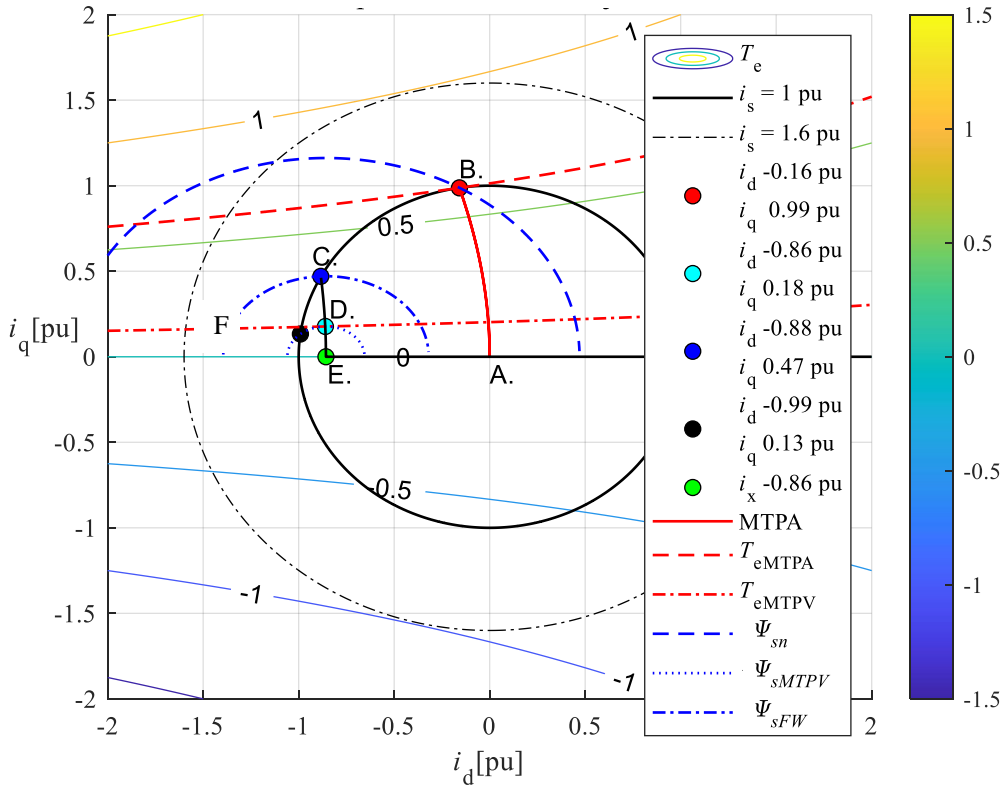
$$i_{dMTPV} = -\frac{\psi_{PM}}{L_d} - \frac{\frac{L_q}{L_d} \psi_{PM} + \sqrt{\frac{L_q}{L_d} \psi_{PM}^2 + 8 \left(\frac{L_q}{L_d} - 1 \right) \left(\frac{u_s}{\omega_s} \right)^2}}{L_q} \quad (2.39)$$

Vastaavasti q-komponentin referenssi.

$$i_{qMTPV} = \frac{\sqrt{\left(\frac{u_s}{\omega_s} \right)^2 - \left[\frac{\frac{L_q}{L_d} \psi_{PM} + \sqrt{\frac{L_q}{L_d} \psi_{PM}^2 + 8 \left(\frac{L_q}{L_d} - 1 \right) \left(\frac{u_s}{\omega_s} \right)^2}}{L_q} \right]^2}}{L_q} \quad (2.40)$$

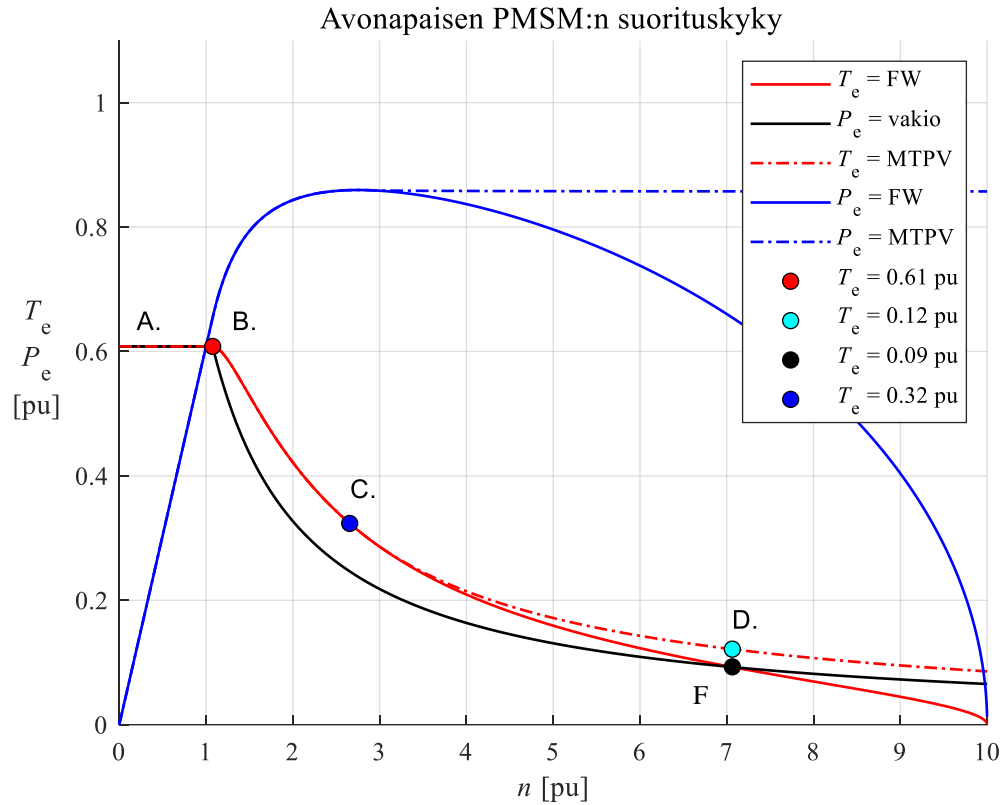
Yhtälöiden (2.24), (2.36), (2.39) ja (2.40) virtareferenssien kuvaajat sekä niitä vastaavat
toimintapisteet on havainnollistettu kuvassa 2.19.

Avonapaisen PMSM:n trajektori



Kuva 2.19 Avonapaisen kestopagneettitahtikoneen MTPA- FW- sekä MTPV-säätömenetelmät yhdistävä trajektori i_d/i_q -koordinaatistossa. Mustilla, origon suhteen symmetrisillä ympyräkävyrillä on merkitty koneen virtarajat. Yhtäjaksoinen musta viiva osoittaa nimellsvirtarajan $i_s = 1$ ja musta pistekatkoviiva ylikuormitusvirran $i_{smax} = 1,6$ pu. Taustalla sinisestä keltaiseen liukuva hyperbelikäyrästä indikoi koneen vääntökäyriä eri staattorivirran arvoilla siten, että virtakulma suurenee vääntömomentin kasvaessa. Origosta A lähtevä punainen käyrä on koneen induktanssisuhteen ja eri kuormitussuhteille optimoitavan vääntömomentin ohjearvokäyrä. Punainen katkoviivakäyrä edustaa koneesta saatavaa vääntömomenttia, joka punaisella ympyrällä (B) korostetussa nimellispisteessä on $T_e = 0,67$ pu. Koneen nopeutta nostettaessa siirrytään FW-säätömenetelmän käyttöön. Pisteestä B kiihdytetään nopeutta, kunnes nopeus saavuttaa arvon $\omega_s = 2,65$ pu (C), jossa kone tuottaa vääntömomenttia $T_e = 0,32$ pu. Nopeutta edelleen nostettaessa siirrytään pisteestä C kohti pistettä D. Virtareferenssit lasketaan MTPV-säätömenetelmän mukaan. D pisteessä nopeus on noussut arvoon $\omega_s = 7,06$ pu ja koneen vääntömomentti on laskenut arvoon $T_e = 0,12$ pu. Mikäli pisteestä C olisi jatkettu FW-säätömenetelmällä pisteeseen F vääntömomentti olisi laskenut arvoon $T_e = 0,09$ pu. MTPV -menetelmää soveltaen vääntömomenttia saatiin siis $T_e = 0,12 - 0,09 = 0,03$ pu enemmän. Vihreä piste osoittaa koneen jännitehyperbelien origon. Sininen katkoviiva indikoi kentänheikennyksen aloituspistettä nimellsvääntömomentilla. Sininen pistekatkoviiva indikoi kentänheikennyksen toimintapistettä, jossa FW-menetelmän sijasta tulisi siirtyä MTPV-menetelmän käyttöön. Koneen parametrit ovat $u_s = 1$, $\psi_{PM} = 0,62$, $L_d = 0,4$, $L_q = 0,6$. Staattoriresistanssia ja magneettiipiirin kyllästymistä ei oteta huomioon.

Kuvan 2.19 trajektorissa havainnollistetun koneen suorituskyky on esitetty kuvassa 2.20.



Kuva 2.20. Kuvassa 2.19 olevan avonapaisen kestopagneettitahtikoneen MTPA / FW- /MTPV -virtareferenssijä mukaileva vääntömomenttikuvaaja nopeusalueella $\omega_s = 0..7 \text{ pu}$. Kone törmää nimellivääntömomentillaan jänniterajaan punaisen pisteen kohdalla nopeudella $\omega_s = 1,26$. Kentänheikennykseen siirryttäessä punainen kuvaaja indikoi koneen induktanssisuhteen L_d/L_q mukaan laskettua suorituskykyä. Musta kuvaaja on koneen tyypistä riippumaton vakiotehokäyrä. Nopeudella $\omega_s = 2,65 \text{ pu}$ (C) invertterin tulisi siirtyä MTPV-säätöalgoritmin käyttöön. Kuvaajassa nopeudella $\omega_s = 7,06 \text{ pu}$ FW-menetelmä (punainen viiva) tuottaa enää $T_e = 0,09 \text{ pu}$ vääntömomenttia pisteessä F. MTPV-algoritmilla (punainen katkoviiva) saatu etu samalla nopeudella on $\Delta T_e = 0,03 \text{ pu}$. Sininen viiva indikoi koneen tahti-induktanssin mukaan laskettua tehokäyrää. Sininen pistekatkoviiva seuraa MTPV-menetelmää ja tuottaa vakiotehon pitkälle kentänheikennykseen. Koneen parametrit ovat $u_s = 1$, $i_s = 1$, $\psi_{PM} = 0,62$, $L_d = 0,4$, $L_q = 0,6$ ja $i_s = 1$. Staattori-resistanssia ja magneetti-piirin kyllästymistä ei oteta huomioon.

Kuvista 2.19 ja 2.20 voidaan huomata, kuinka MTPV-säätöalgoritmilla saadaan syvällä kentänheikennyksessä merkittävä parannus avonapaisen kestopagneettitahtikoneen suorituskykyyn, jonka karakteristinen virta $i_x < 1$.

3 VALINTAPROSESSI

3.1 Valintaperusteet

Mobiilikäyttöjen moottorien vertailu ei ole suoraviivaista, sillä ajomoottoreiden hyötysuhteita ei ole millään tavalla standardoitu. Koneille ei myöskään ilmoiteta nimellistä toimintapistettä teollisuusmoottoreiden tapaan. Autovalmistajat näyttävät ilmoittavat moottoreille sen sijaan hetkellisen huipputehon.

Traktoreiden voimalinjan polttoainetaloudellisuutta arvioidaan globaalisti Saksan maatalousyhdistyksen DLG:n (Deutsche Landwirtschafts-Gesellschaft) organisoiman testiprotokollan avulla. DLG:n PowerMix -testi sisältää yhteensä 14 testisykliä. Testin työsykleissä mitataan tehoa, hyötysuhdetta sekä polttoaineenkulutusta grammoina kilowattituntia kohden (g/kWh) traktorille tyypillisissä, dynamometrin avulla simuloituissa käyttöolosuhteissa eri kuormitussuhteilla.

Perinteisen vetotyön lisäksi syklit sisältävät simulointeja olosuhteista, joissa voiman ulostottoa ja työhydrauliikkaa kuormitetaan samanaikaisesti. Testin sykleissä traktorilla ajetaan myös siirtoajoa vaihtelevilla kuormilla.

DLG -testien tuloksia hyödynnetään valmistajien tuotekehityksen kannustimina ja ne luovat myös kaupallisesti melko vertailukelpoisen kannan eri valmistajien traktoreista viljelijöiden investointipäätösten tueksi.

3.2 Traktorin kuormitusolosuhteet

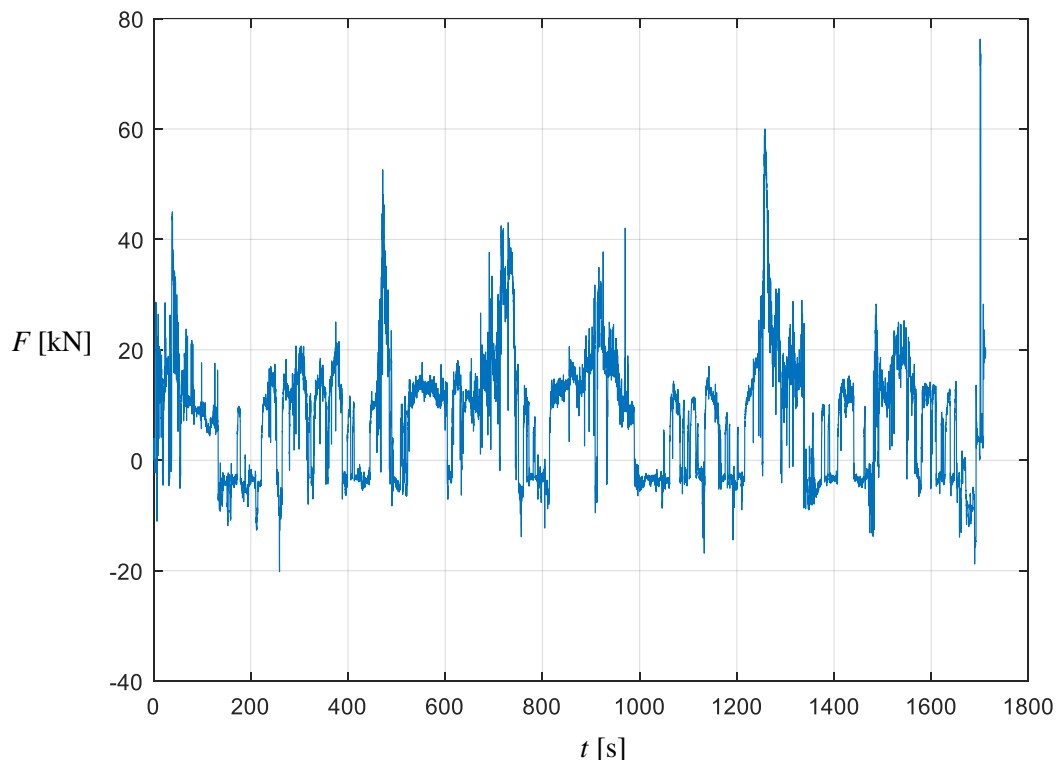
Traktori on sopivilla työkoneilla täydennettynä varsin monikäyttöinen ja muuntunut puhtaasta maataloustyökoneesta monipuolisiin maanrakennus- ja urakointitöihin. Traktoria hyödynnetään etenevässä määrin myös erilaisissa kiinteistöjen kunnossapitotöissä.

Monipuoliset työtehtävät eri olosuhteissa merkitsevät erittäin suuresti vaihtelevaa kuormitusta myös ajomoottorille. Hyötysuhteen optimointi kaikkia työtehtäviä silmälläpitäen on äärimmäisen haastavaa, useimmiten mahdotonta.

Tyypillisesti tarkasteluun valittujen konetyyppien nimellisen toimintapisteen hyötysuhde saadaan hyvällä koneensuunnittelulla, konetyypin asettamien reunaehtojen puitteissa, melko lähelle toisiaan mutta yksittäisen toimintapisteen arvo ei sellaisenaan ole kovin merkittävä.

Todellisen vertailukelpoisen tuloksen saamiseksi koneen hyötysuhdetta pitää tarkastella yli koko työsyklin, jossa kone joutuu toimimaan vaihtelevasti eri nopeus- ja vääntömomenttireferensseillä.

Kuvassa 3.1 esitetään traktorille tyypillistä kuormitus sykliä, jossa vetovoima vaihtelee ajan funktiona.



Kuva 3.1. Esimerkki traktorin simuloidusta työsyklistä t/F -koordinaatistossa (Immonen, 2013)

Traktorin on kyettävä vetämään työkonetta ilman, että pyörien luisto kasvaa liian suureksi. Toisaalta traktorissa on oltava riittävästi moottoritehoa, jotta työkone liikkuu halutulla nopeudella. Traktorilla myös oltava riittävästi omamassaa työkoneneen vetämiseen, ja sen renkaissa on oltava riittävä pito.

Maan kantavuuden puitteissa traktorin massaa voidaan tilapäisesti kasvattaa lisäpainoilla pidon lisäämiseksi. Traktoreissa käytetään yleisesti myös paripyöriä, joilla voidaan kompensoida lisäpainon aiheuttamaa maan tiivistymistä ja lisätä koneen kulkukelpoisuutta upottavilla mailla esimerkiksi kevättöiden aikaan. Toimenpiteet lisäävät myös traktorin vierintävastusta, joskin vetovoima kasvaa vierintävastusta enemmän.

Peltotöissä renkaat uppoavat maahan, ja niiden kehävoima pyrkii kuorimaan maan pintaa eli renkaan rivat uppoavat maahan ja yrittävät leikata ripojen väliin jäävän maakannaksen

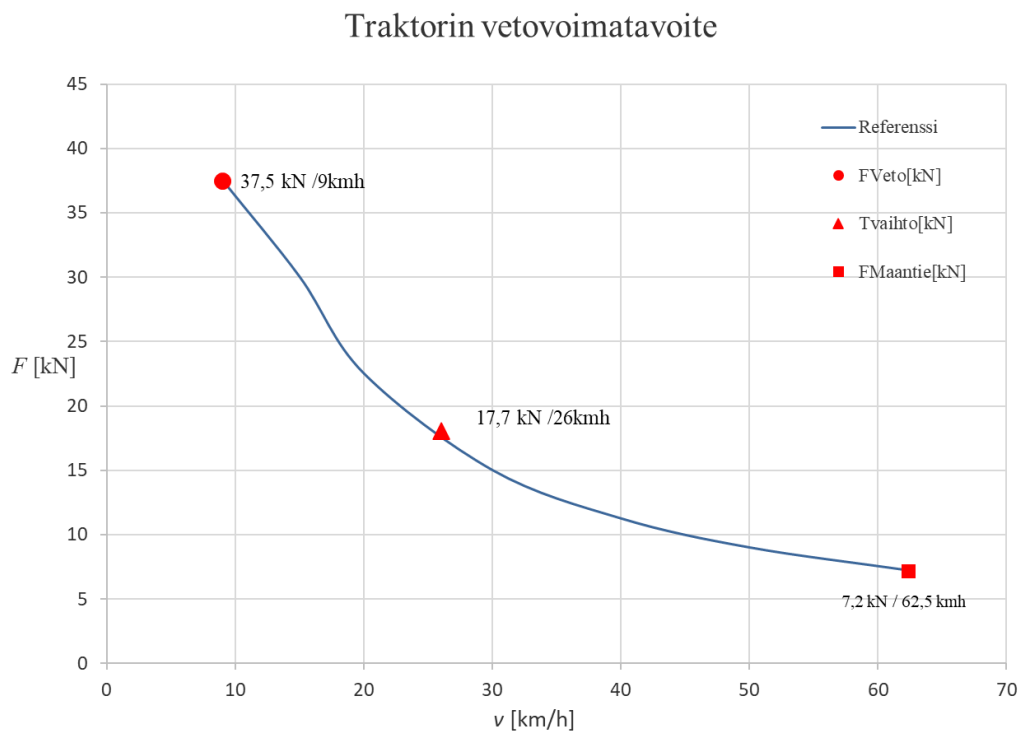
irti. Renkaan pito perustuukin pellolla suurimmaksi osaksi tähän maan leikkaamiseen. Leikkaamisilmiön lisäksi renkaan ja maan välillä on kitkaa, johon pito perustuu kovalla alustalla ajaessa. Maan leikkausvoima kasvaa siirtymän lisääntyessä. Luiston lisääntyessä myös renkaan pito paranee. Luisto on siten välttämätön paha, jota tarvitaan pidon takia. Toisaalta luisto aiheuttaa suoraan suhteellisen luistoon verrannollisen häviötehon (Elonen et al 1995).

Traktorin sähköisen ajomoottorin ylikuormitettavuutta mitoittaessa on otettava huomioon alhaisella nopeudella esiintyvä vääntömomentin tarve sekä vakiovoalueella tapahtuva peltotyö. Ylikuormitettavuus edesauttaa myös jouhevaa vaihtenvaihtoa. Kentänheikennysalueella ajomoottorilla pitää olla jonkin verran suorituskykyä reservissä, jotta kone pystyy vastaamaan kohtuullisesti esimerkiksi kuorman kanssa ylämäkeen ajettaessa.

Tarkastellaan seuraavaksi sähköisen voimanlinjan suorituskykyä 125 kW referenssitraktoriin verrattuna.

3.3 Traktorin vetovoimatavoite

Esimerkki traktorin vetovoimantarpeesta ja ajomoottorin yleisimmät toimintapisteet on esitetty nopeuden funktiona kuvassa 3.2



Kuva 3.2. Erään 125 kW traktorin takapyörien vetovoiman tavoitekuvaaja v / F -koordinaatissa. Sininen käyrä indikoi vetovoiman tavoitetta ja punaiset pisteet yksittäisiä toimintapisteitä. Ympyrä indikoi vetovoiman tarvetta peltotöiden referenssipisteessä, neliöllä indikoidaan

siirtoajon maksinopeudella tarvittavaa vetovoimaa. Punainen kolmio indikoi summittaista vaihtopistettä. Siirtoajon toimintapiste vaihtelee tyypillisesti traktorin koon mukaan 40..60 km/h välillä. Tässä tarkastelussa siirtoajon maksiminopeus rajattu arvoon 62,5 km/h.

Kuvasta 3.2 huomataan, kuinka traktorin vakiotehokäyrää muistuttava suorituskyyvyn referenssikäyrä poikkeaa esimerkiksi sähköauton vastaavasta profiilista huomattavasti. Autoilla tehoa tarvitaan kiihdyttäessä paljon verrattuna usein vakionopeudella tapahtuvaan siirtymäaioon. Ilmanvastuksen vuoksi auton kuormitusvääntömometti alkaa suuremmilla nopeuksilla muistuttaa pumpuille ja puhaltimille tyypillistä, neliöllistä kuormitusvääntömomenttia, jossa kuormitus kasvaa eksponentiaalisesti nopeuden funktiona. Koska autoilla ajetaan yleensä varsin maltillista matkanopeutta, käy suuritehoinen polttomoottori usein hyvin pienellä osakuormalla, jolloin hyötysuhde jää auttamatta heikoksi.

Traktorilla voidaan työskennellä pitkiäkin aikoja liki nimellisteholla, jolloin päästään tehokkaasti hyödyntämään dieselmoottorin verrattain hyvää hyötysuhdetta. Kevyessä työskentelyssä traktoridieselkin toimii huonolla hyötysuhteella polttomoottoriautojen tapaan. Esimerkiksi tyhjäkäynnissä dieselin akselilta otetaan tyypillisesti noin 10 % nimellisestä vääntömomentista pelkästään erilaisten sisäisten kitkojen voittamiseksi.

Kuvan 3.2 mukaan vetovoiman tarve on peltotyössä yli nelinkertainen maantieajoa nähden. Optimaalisesti valittu sähkökone tulisikin mitoittaa niin, että kone siirtyisi kentänheikennykseen melko pian 9 km/h peltotyönopeuden jälkeen. Kulmapisteen asettelussa on kuitenkin otettava huomioon vetovoimatarpeen muutos 15..16 km/h alueella, jossa tarkasteltavan verrokitraktorin neliveto kytkeytyy pois päältä. Peltotyönopeuksilla 20..30% vetovoimasta saadaan tyypillisesti etupyöriltä, mutta nopeuden kasvaessa takapyöriltä vaadittava suhteellinen vetovoima kasvaa.

Kuvasta 3.2 voidaan todeta traktorin ajomoottorilta vaadittavan jatkuvaa vääntömomentintuottoa tyypillisesti vakiovoimalla peltotyönopeuksilla. Yksiselitteisesti voidaankin todeta peltotyössä traktorin ajomoottorilta edellytettävän suorituskyyvyn vastaavan IEC 60034-1 sähkökonestandardin käyttötapaa S1. Käyttötavan mukaan mitoitettua moottoria voidaan käyttää jatkuvasti nimellistehollaan läpi teknisen käyttöiän, joka tavanomaisilla lämpenemillä ja eristemateriaalivalinnoilla on noin 15..20 vuotta.

Kuvan 3.2 perusteella voidaan myös todeta, että mitoittamalla sähkökone sopivasti koko toiminta-alue voitaisiin ainakin periaatteessa kattaa kiinteällä alennusvaihteella. Ratkaisu edellyttäisi kentänheikennysalueen maksimaalista hyödyntämistä. Esimerkiksi kuvan 3.2 tapauksessa sähkökoneen nopeus siirtoajossa olisi noin $\omega_s = 6,9$ pu.

Siirtoajon merkitys on traktorin yhä monipuolistuvien työtehtävien vuoksi kasvanut ja kentänheikennyksessä pitäisi pystyä toimimaan vähintään vakioteholla. Tarkastellaan seuraavaksi epätahtikoneen ja kestopagneettitahtikoneen ominaisuuksia kentänheikennyksessä.

3.4 Epätahtikoneen suorituskyky kentänheikennyksessä

Sähköisen ajomoottorin nimellispisteen valinta kannattaa mitoittaa niin, että suurilla nopeuksilla kentänheikennysaluetta hyödynnetään maksimaalisesti. Mikäli operatiivinen nopeusalue jäisi nollanopeuden ja nimellisnopeuden väliin, kone jouduttaisiin mitoittamaan epätaloudellisen suureksi tai vaihteiden lukumäärä kasvaisi.

Kun sähkömoottoria halutaan pyörittää nimellispistettä suuremmalla pyörimisnopeudella, on Faradayn induktiolain mukaan staattorivuota alettava pienentää käytön jännitteen noustessa nimellisarvoonsa.

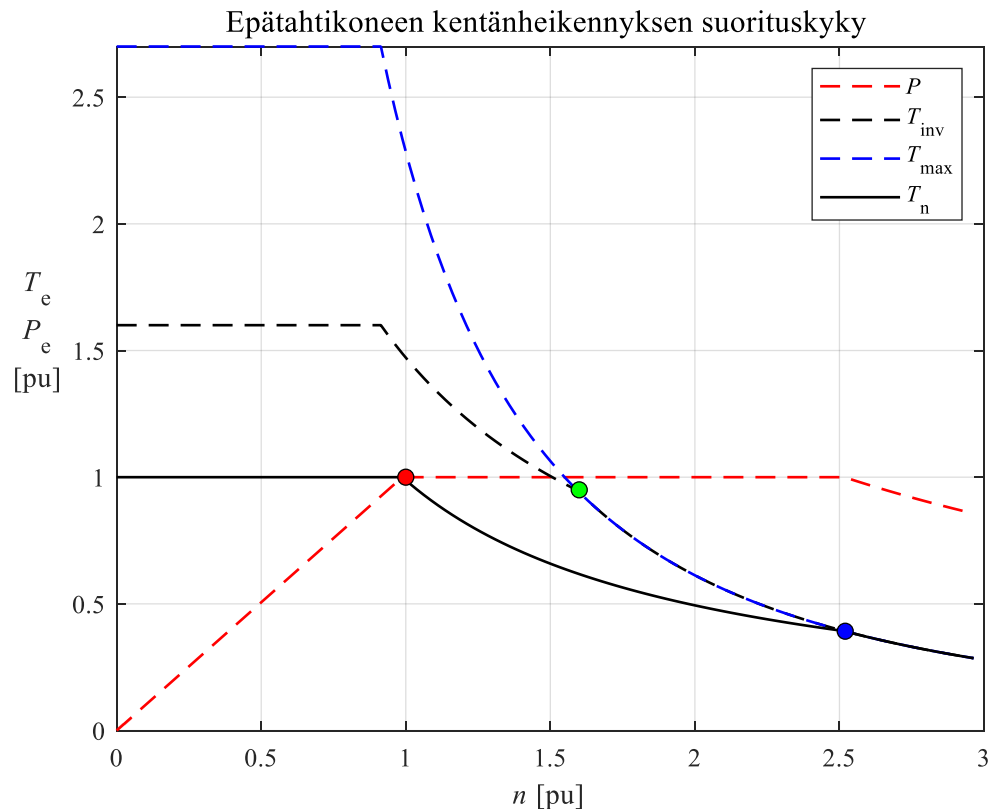
Koska kone toimii alle nimellisnopeudellaan likimain vakiovuontiheydellä, nimitetään tätä aluetta vakiovualueeksi. Moottorin käännavuota voidaan myös haluttaessa, esim. energiansäästösyistä, pienentää nimellisnopeutta alemmalla nopeudella toimittaessa. Mikäli koneesta kuitenkin halutaan täysi vääntömomentti pienillä nopeuksilla, on vuo pidettävä vähintään nimellisenä. Kun pyörimisnopeus kasvaa, indusoituu koneen napoihin yhä suurempi jännite.

Kun koneen nimellisnopeus on saavutettu, induktio on jo niin suuri, että koneen vastasähkömotorinen voima on likimain napajännitteen suuruinen. Mikäli koneen pyörimisnopeutta halutaan tästä kasvattaa, on koneen ilmapölvuontiheyttä pienennettävä, jotta staattorikäännavuo pysyisi syöttöjännitteen asettamissa rajoissa. Nimellisnopeutta suuremmilla nopeuksilla käännavuota pienennetään kääntäen verrannollisena nopeuteen. Aluetta kutsutaan kentänheikennysalueeksi.

Kentänheikennysalue jaetaan likimääräisesti vakiotehoalueeseen ja suurnopeusalueeseen. Vakiotehon alueella koneen jatkuva kuormitettavuus seuraa vakiotehokäyrää, jonka mukaisesti koneesta nimellisvirralla saatava vääntömomentti pienenee pyörimisnopeuden kasvaessa siihen kääntäen verrannollisesti.

Siirryttäessä vakiotehoalueelta suurnopeusalueelle, jatkuva kuormitettavuus alkaa heikentyä jyrkemmin, koska oikosulkumoottorin maksivääntömomentti on likimääräisesti tarkasteltuna kääntäen verrannollinen magneettivuon neliöön.

Kuvassa 3.3 on analyttiseen laskentaan perustuva suhteellisarvoesitys epätahtikoneen suorituskyvystä kentänheikennysalueella kun sähkökoneen nopeusalue $\omega_s = 0..3$ pu



Kuva 3.3. Epätahtikoneen suorituskyky suhteellisarvoesityksenä nopeusalueella $\omega_s = 0..3$ pu. Koneen vakiovoalue päättyy ja siirrytään vakioehtoalueelle, kun nopeus ja vääntömomentti ovat nimellisarvoissaan punaisen pisteen kohdalla. Musta katkoviivakäyrä esittää invertterin maksimivirralla $i_{smax} = 1,6$ pu saatavaa vääntömomenttia. Sininen katkoviiva indikoi koneen maksimivääntömomenttia $T_{max} = 2,7$ pu, joka alkaa rajoittaa koneen termistä ylikuormitettavuutta vihreän pisteen kohdalla, kun nopeus on $\omega_s = 1,6$ pu ja vääntömomentti $T_e = 0,94$ pu. Suurnopeusalueelle siirrytään sinisen pisteen kohdalla, kun nopeus $\omega_s = 2,52$ ja $T_e = 0,39$. Tästä eteenpäin jatkuva vääntömomentin tuottokyky määräytyy koneen maksimivääntömomentin mukaan ja teho alkaa pudota nopeammin. Maksimivääntömomentin nopea pieneneminen johtuu vuotiheyden pienemisestä, mikä näkyy mm. jättämätääjuuden suurenemisena. Staattori-resistanssin ja magneettipiirin kyllästyminen jätetään huomiotta tarkastelussa.

Kuvasta 3.3 voidaan todeta, että epätahtikone soveltuisi suorituskykynsä puolesta melko hyvin traktorin sähköiseksi ajomootoriksi, mikäli koneen maksimivääntömomentti on välillä 2.5..3,5 pu. Kuvan 3.3 koneella suorituskyky säilyy erinomaisena aina nopeuteen $\omega_s = 2,52$ asti, jolloin maksimivääntömomentti alkaa rajoittaa koneen suorituskykyä käänteisenä nopeuden neliöön. Suurempaa nopeutta voidaan sähkötekniisesti hyödyntää, mutta voimalinjan parempaan suorituskykyyn päästään vaihtamalla pienempi vaihde ja siirtymällä lähemmästä kentänheikennyspisteestä.

Mikäli kuvan 3.3 kaltainen suorituskyky ei ole riittävä, voidaan koneen suorituskykyä lisätä käyttämällä jännitereserviä tai yksinkertaisesti mitoittamalla kone hieman nimellistä suuremmalle teholle.

3.5 Kestomagneettitahtikoneen suorituskyky kentänheikennyksessä

Epätahtikoneelle kappaleessa 3.4 esitellyt yleiset kentänheikennyksen pääperiaatteet ovat sellaisenaan voimassa myös kestopagneettitahtikoneelle. Kestomagneettitahtikoneen tapauksessa invertterin jännite ei riitä kentänheikennyksessä toteuttamaan virtakomponentteja kestopagneettien generoiman vastasähkömotorisen voiman E_{PM} vuoksi. Invertterin jänniterajalla koneen vääntömomenttiohjetta on alettava pienentää.

Kiinteä kestopagneettien luoma käämivuo muodostaa ongelman koneen nopeuden noustessa. Kun kestopagneettikäämivuo ψ_{PM} tuottaa koneen magnetomotorista voimaa vastaavan virtasumman, sen synnyttämää lähdejännitettä E_{PM} ei voida kontrolloida, kuten ulkoisella napakäämivirralla magnetoiduissa tahtikoneissa.

Jättämällä staattori-resistanssi huomiotta ja sijoittamalla saadaan kestopagneettitahtikoneen staattorijännitteelle

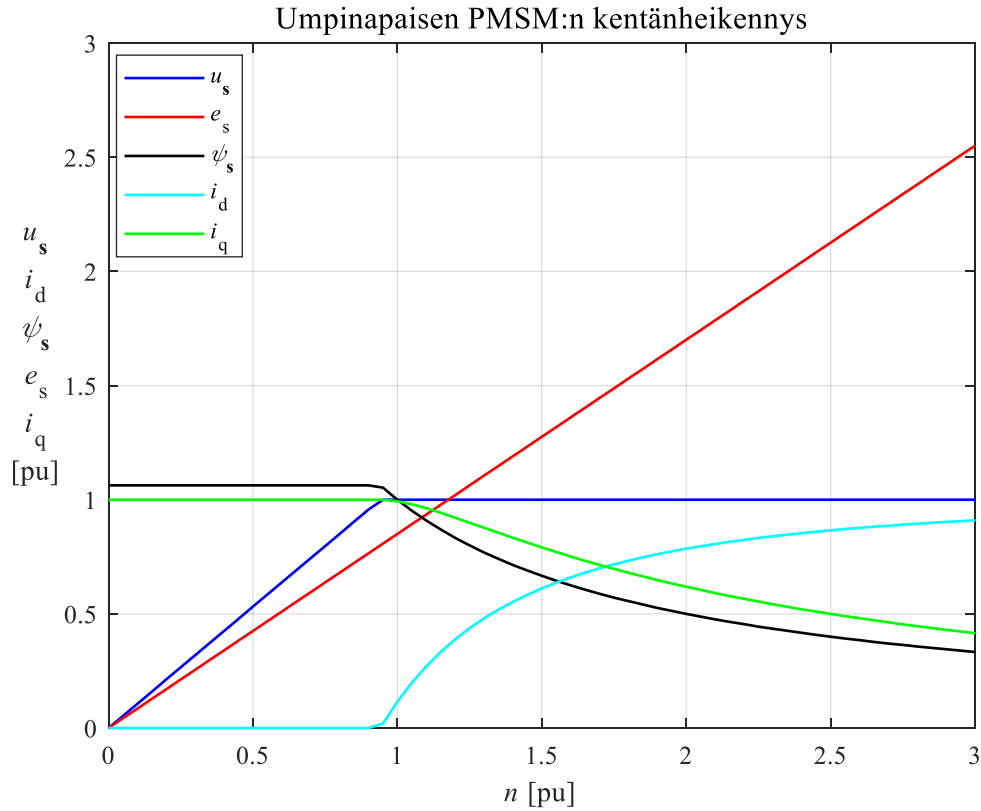
$$u_s = \frac{E_{PM}}{\psi_{PM}} = \omega_s \psi_s \quad (3.1)$$

yhtälöistä (2.14) ja (3.1) saadaan

$$u_s = \omega_s \sqrt{(\psi_{PM} + L_d i_d)^2 + (L_q i_q)^2} \quad (3.2)$$

Yhtälöstä (3.2) huomataan, että mikäli nopeutta halutaan nostaa kentänheikennyspisteen yli, on pitkittäisakselin i_d -komponentin etumerkki muutettava negatiiviseksi.

Kuva 3.4 havainnollistaa esimerkinomaisesti kestopagneettitahtikoneen ominaisuuksia kentänheikennyksessä, kun nopeus $\omega_s = 0.3$ pu.



Kuva 3.4. Kestomagneettitahtikoneen kentänheikennysalueen suhteellisarvoesitys kun $\omega_s = 0.3$ pu. Vakiovoalueella virtakomponentti i_d pidetään nollassa ja i_q vastaa koneen kuormitusväätömomenttia. Koneen jännite u_s nousee lineaarisesti nopeuteen $\omega_s = 0.94$ pu ja vastasähkömotorinen voima e_s kasvaa suhteellisen tyhjäkäyntijännitteen mukaisesti loivemmalla kulmakertoimella ja ylittää staattorin jännitteen nopeudella $\omega_s = 1.18$ pu, jolloin koneen vastasähkömotorinen voima on yhtä suuri invertterin välipiirin jännitettä vastaavan jännitteen kanssa. Mikäli d-akselin demagnetoiva virta poistuisi kentänheikennysalueella kun $\omega_s > 1.18$, moottori muuttuisi generaattoriksi ja teho alkaisi virrata taajuusmuuttajan välipiiriin päin. Generaattoriksi muuttuneen sähkökoneen lähdejännite on tarkastelussa maksimissaan $e_s = 2.55$ pu koneen nopeudella $\omega_s = 3$ pu. Mikäli välipiirin maksimijännite vastaa likimäärin moottorin pääjännitteen huippuarvoa, välipiiriin päin virtaava teho olisi tehokulmayhtälön suhteellistarkastelun mukaan olisi $P_e = (e_s - u_s) / L_s = 2.21$ pu. Koneen parametrit ovat $\psi_{PM} = 0.8$, $L_s = 0.7$, $i_s = 1$ ja $u_s = 1$. Staattoriresistanssia ja magneettiin kyllästymistä ei oteta huomioon.

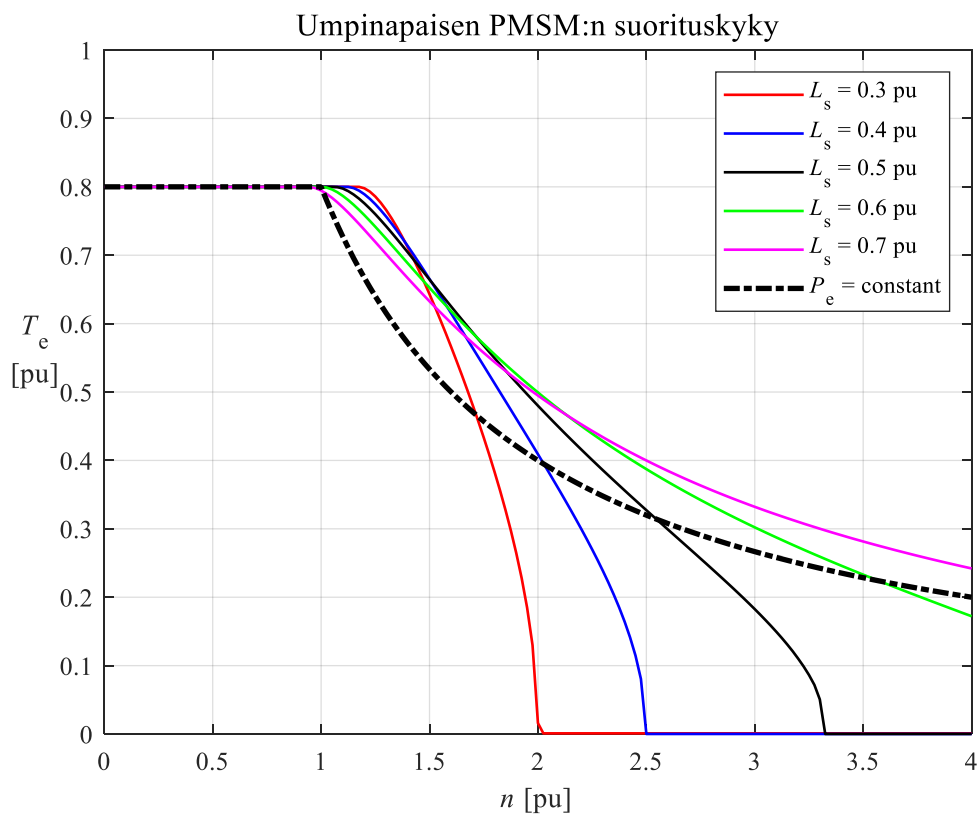
Kestomagneettitahtikoneen tapauksessa kentänheikennyksen suorituskyky määräytyy ensisijaisesti koneen kestopäiväntahtikoneen tahti-induktanssin perusteella. Ominaisuutta on luonnollista tarkastella esimerkiksi tahtikoneen tehokulmayhtälön (2.18) kautta.

$$T = 3p \left(\frac{U_{\text{sph}} E_{\text{PM}}}{\omega_s^2 L_d} \sin \delta_s + U_{\text{sph}}^2 \frac{L_d - L_q}{\omega_s^2 2L_d L_q} \sin 2\delta_s \right)$$

Kappaleessa 2.5.3 tehtyjä havaintoja täydentäen yhtälöstä (2.18) huomataan, kuinka kestopagneettikämmivuon luoma lähdejännite E_{PM} ja tahti-induktanssi L_d dominoivat kestopagneettitahtikoneen vääntömomentintuottokykyä.

Tahti-induktanssi syntyy koneen rakenteellisten hajaannuksien perusteella, mutta kestopagneettien tuottama kämmivuon ψ_{PM} arvo mitoitetaan suhteellisarvona yleensä välille 0,7..1 pu, jotta koneella pystytään tuottamaan kohtuullisesti vääntömomenttia syöttöjännitteen u_s ollessa 1 pu.

Kuvassa 3.5 esitetään koneen tahti-induktanssin vaikutusta koneen suorituskykyyn kentänheikennyksessä.

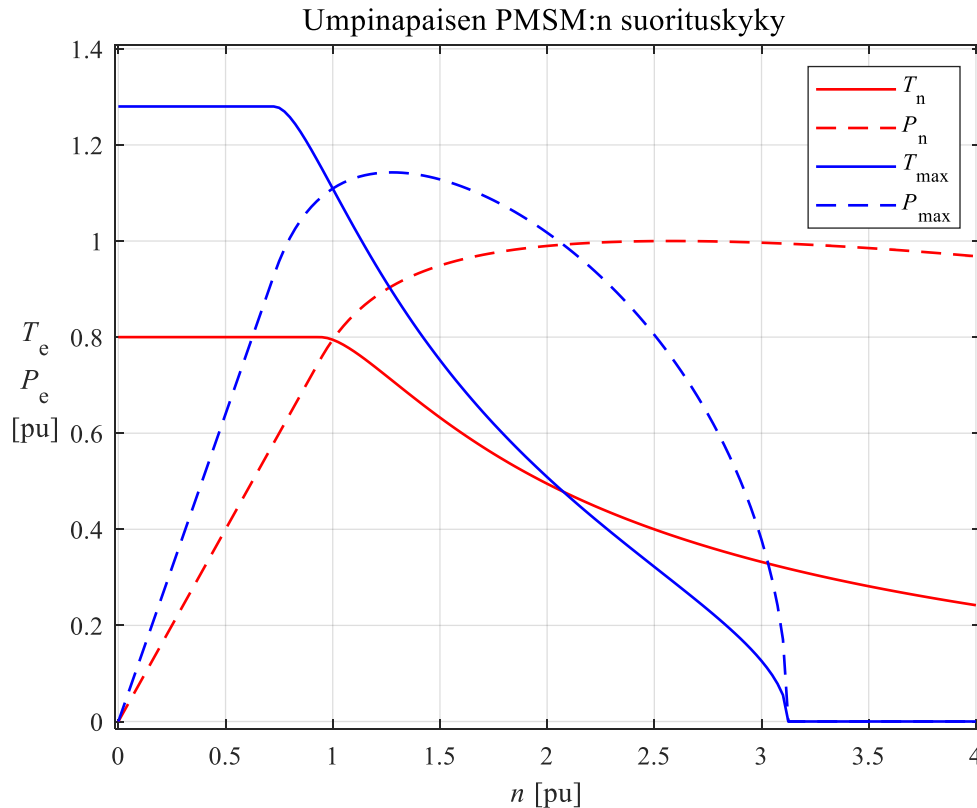


Kuva 3.5. Umpinapaisen kestopagneettitahtikoneen tahti-induktanssin rajoittama suorituskyky kun nopeus $\omega_s = 0.4$ pu. Tahti-induktanssin arvo vaikuttaa kentänheikennyksen alkupisteeseen, joka tarkastelussa vaihtelee arvosta $\omega_s = 0,94 \dots 1,17$ pu kun tahti-induktanssi $L_s = 0,7 \dots 0,3$ pu. Musta katkoviiva esittää liikeyhtälön perusteella laskettua vakiotehokäyrää. Koneen muut parametrit $\psi_{PM} = 0,8$ ja $u_s = 1$, $i_s = 1$. Staattori-resistanssin ja magneettipiirin kyllästyminen jätetään huomiotta tarkastelussa.

Kuvasta 3.5 voidaan todeta, että hyvä kentänheikennysalueen suorituskyky edellyttää koneelta suurta tahti-induktanssia, tai vastaavasti tahti-induktanssin mitoittamista optimaalisesti koneen kestopagneettikämmivuohon nähden, kappaleessa 2.7 esitellyn nk. kestopagneettitahtikoneen karakteristisen virran kautta. Kun $i_x < 1$ pu, voidaan koneella periaatteessa saavuttaa ääretön pyörimisnopeus.

Suuri tahti-induktanssi on edellytys hyvälle kentänheikennysalueen suorituskyvyille nimellisvirralla, kun koneen kestopagneettikäymivuon $\psi_{PM} = 0,7..1$ pu. Toisaalta tahti-induktanssin kasvattamisen seurauksena koneen ylikuormituskyky heikkenee melko nopeasti nopeuden kasvaessa.

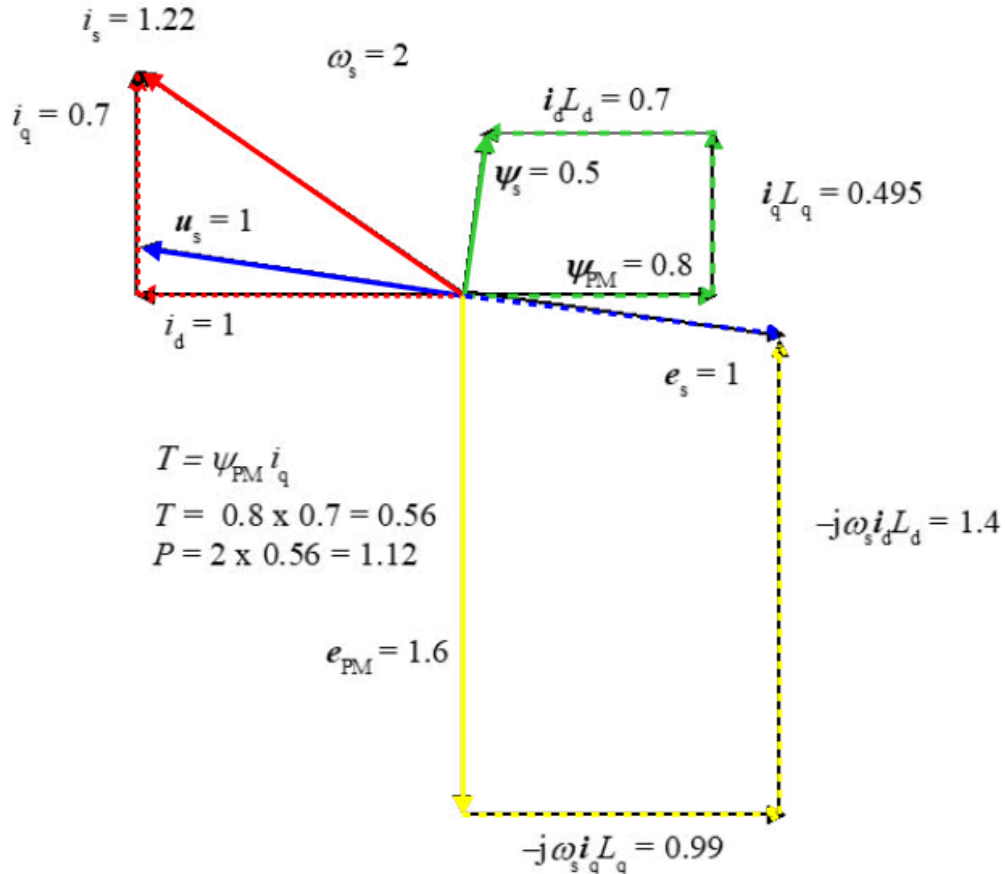
Kuva 3.6 havainnollistaa umpinapaisen kestopagneettitahtikoneen ylikuormitettavuutta sekä nimellisellä että 1,6 kertaisella virralla nopeusalueella $\omega_s = 0..4$ pu. Ylikuormitettuna kone siirtyy kentänheikennykseen aiemmin invertterin jänniterajan vuoksi.



Kuva 3.6. Umpinapaisen kestopagneettitahtikoneen rakenteellinen suorituskyky nopeusalueella $\omega_s = 0..4$ pu. Koneen kentänheikennyspiste on nimelliskuormituksella $\omega_s = 0,94$ pu ja ylikuormitettuna $\omega_s = 0,73$ pu. Suuren tahti-induktanssin vuoksi koneen virtaa on rajoitettava yli $\omega_s = 2$ pu nopeuksilla, jotta koneen suorituskyky säilyy pidemmälle kentänheikennykseen edettäessä. $L_s = 0,7$, $\psi_{PM} = 0,8$, $i_s = 1$, $u_s = 1$ ja $i_{smax} = 1,6$. Staattori-resistanssia ja magneettipiirin kyllästymistä ei oteta huomioon tarkastelussa.

Kuvasta 3.6 havaitaan, että hyvä kentänheikennysalueen suorituskyky on osittain pois sulkeva parametri koneen maksimomomentin kannalta, koska umpinapaisen tahtikoneen maksivääntömomentti on suoraan verrannollinen tahti-induktanssin käännteislukuun.

Kuvassa 3.6 esiteltyä konetta havainnollistetaan kuvan 3.7 vektoripiirroksella kentänheikennyksen toimintapisteessä $\omega_s = 2$ pu.



Kuva 3.7. Umpinapaisen kestomagneettitahtikoneen teoreettinen vektoriesitys ylikuormitettuna kentänheikennysalueella, kun jännite $u_s = 1$, nopeus $\omega_s = 2$ pu ja staattorivirta $i_s = 1,22$. Koneen demagnetointivirta $i_d = 1$. Koneen suuren tahti-induktanssin $L_s = 0,7$ vuoksi q-akselin käämivuo ψ_q pienenee nopeasti nopeuden kasvaessa ja koneen vääntömomentintuottokyky heikkenee. Koneen generoima lähdejännite $e_s = 1,6$ pu määräytyy koneen tyhjäkäyntijännitteen $\psi_{PM} = 0,8$ perusteella. Vihreällä indikoidaan ilmavälikäämivuota. Keltainen väri indikoi koneen vastasähkömotorista voimaa. Jännitekomponentit on merkitty sinisellä ja virtakomponentit vastaavasti punaisella. Staattoriresistanssia ei oteta huomioon.

Kuvista 3.5 ja 3.6 voidaan todeta, että mikäli halutaan sekä verrattain hyvä suorituskyky kentänheikennyksessä ja kohtuullinen ylikuormitettavuus vakiovualueella, tahti-induktanssin arvoksi voidaan valita esimerkiksi $L_s = 0.5..0,6$ pu.

Toisaalta kuvia 3.5 ja 3.6 tarkastellessa on syytä huomata vakiotehon ja koneen induktanssisuhteen mukaan lasketun suorituskyvyn perusteet. Yleisesti voidaan tulkita, että sähkökoneesta on kentänheikennykseen mentäessä saatavilla vähintään vakiotehokäyrän mukainen suorituskyky, kunhan sen parametrit on oikein valittu.

Kestomagneettitahtikoneen tapauksessa tulkinta on monimutkaisempi, koska tehokertoimen vuoksi koneen huipputeho ajoittuu kentänheikennysalueelle. Esimerkiksi kuvassa

3.6 tarkasteltavan koneen huipputeho on vasta nopeudella $\omega_s = 2,5$, jolloin koneen tehokerroin on likimain $\cos \varphi = 1$. Näin kestopagneettitahtikoneella on vakiotehokäyrään nähden verrattuna enemmän rakenteellista vääntömomentintuottoa.

Toisaalta analyttisesti induktanssisuhteen perusteella laskettua suorituskykyä tarkastellessa on syytä huomata sähkökoneen fyysisen rakenteen muodostamat rajoitteet, jotka riippuvat ensisijaisesti koneen jäähtymisestä.

Sähkökoneen suunnittelussa sen suorituskykyä tarkastellaan aina materiaaleille sallittujen maksimilämpötilojen suhteen. Mikäli jäähtymys on laskennan mukaan mitoitettua tarkastelupistettä tehokkaampi, voidaan konetta kuormittaa suuremmalla teholla.

Näin kestopagneettitahtikoneesta voidaan hyvällä jäähtymisellä ottaa nopeuden suhteen pienenevää vääntömomentin vakiotehokäyrää enemmän tehoa läpi nopeusalueen aina tahti-induktanssin rajoittamaan arvoon asti.

On myös syytä huomata, että suhteellisarvot ovat sähkökoneen tapauksessa osittain harhaanjohtavia. Kun käytetään moottorin nimellisvirtaan ja -jännitteeseen kiinnitettynä perusarvoja, moottorin nimelliseksi vääntömomentiksi ei tule $T_e = 1$ pu, vaan jokin alempi luku, joka määräytyy moottorin muista ominaisuuksista. Kuorman kannalta ajateltuna olisi tietysti mukava ajatella, että nimellinen suhteellinen vääntömomentti on $T_e = 1$ pu. Käytännössä epätahtikoneen tai PM-koneen nimellinen vääntömomentti suhdearvoina ilmaistuna on luokkaa $T_e = 0.8$ pu.

Kestopagneettitahtikoneen tapauksessa on huomattava mahdollinen reluktanssivääntömomentti. Näiden yhdistelmänä saatu suhteellisarvo on etenkin moottoreissa usein yksiköstä pienempi, koska kestopagneetin käämivuo ψ_{PM} mitoitetaan sovelluksesta ja konerakenteesta riippuen tyypillisesti välille 0,5..0,8 pu. Kestopagneettitahtigeneraattoreilla käämivuo voidaan mitoittaa välille 1..1,05 pu.

Kestopagneettitahtikoneenkin tapauksessa suorituskykyä voidaan lisätä käyttämällä taajuusmuuttajan jännitereserviä sekä yksinkertaisesti mitoittamalla kone hieman nimellistä suuremmalle teholle. Tarkastellaan seuraavaksi jännitereservin käyttöä hieman tarkemmin.

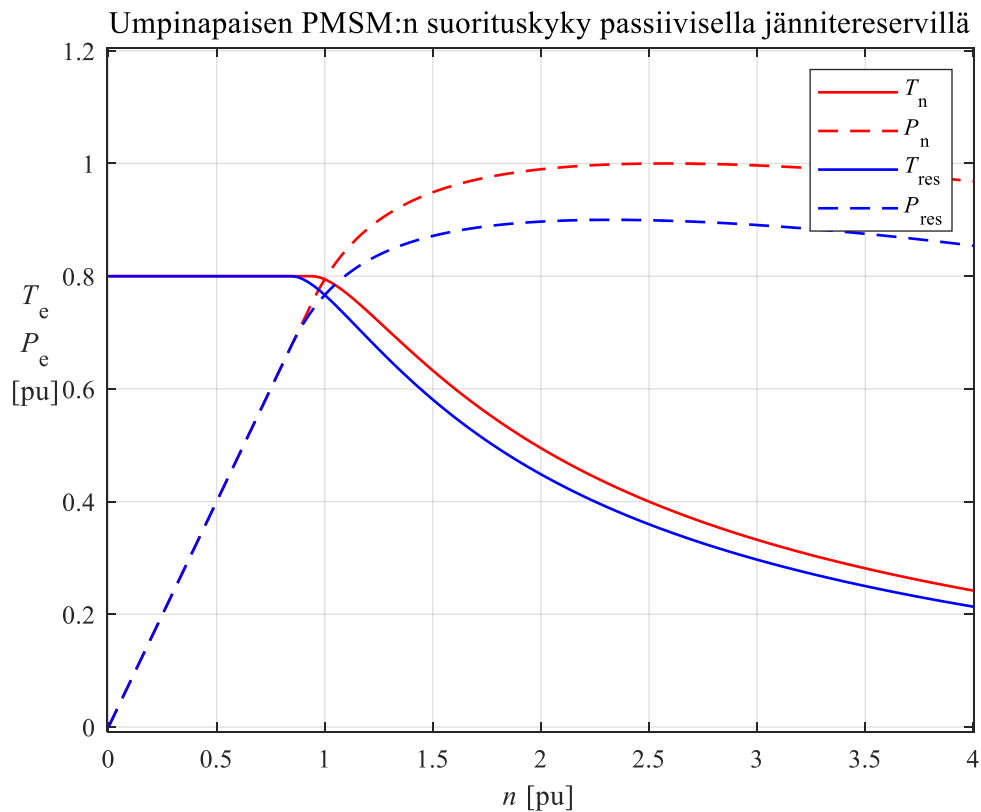
3.6 Jännitereservin käyttö

Staattorikäänivuon itseisarvo pidetään likimain vakiona moottorin pyörimisnopeuden ollessa alle nimellisen. Näin jännite kasvaa lineaarisesti taajuuden funktiona.

Kun moottoria ohjataan yli nimellisyörimisnopeuden, ei moottorin jännitettä voida enää kasvattaa pyörimisnopeuden noustessa. Tällöin jännite on pidettävä enintään nimellisarvossaan, jolloin säädön jännitereservi on nollassa.

Moottorisäädön dynaamista suorituskykyä kentänheikennysalueella voidaan parantaa lisäämällä invertterin jännitereserviä. Traktorikäytössä tämä tarkoittaisi esimerkiksi mahdollisuutta ylläpitää ajonopeus ajettaessa kohtuulliseen ylämäkeen raskaallakin kuormalla.

Passiivisessa jännitereservissä osa taajuusmuuttajan kyvystä tuottaa staattorijännitteen amplitudia jätetään käyttämättä vakiovoalueella, jolloin taajuusmuuttaja siirtyy kentänheikennysalueelle ennen moottorin nimellispistettä. Esimerkiksi 0,1 pu jännitereservi 400 V koneelle aloittaa kentänheikennyksen jo 360 V kohdalla. Koneen kohdatessa äkillisen kuormituksen, taajuusmuuttaja voi käyttää jännitereservinsä. Passiivisen jännitereservin vaikutusta on esitetty kuvassa 3.8.



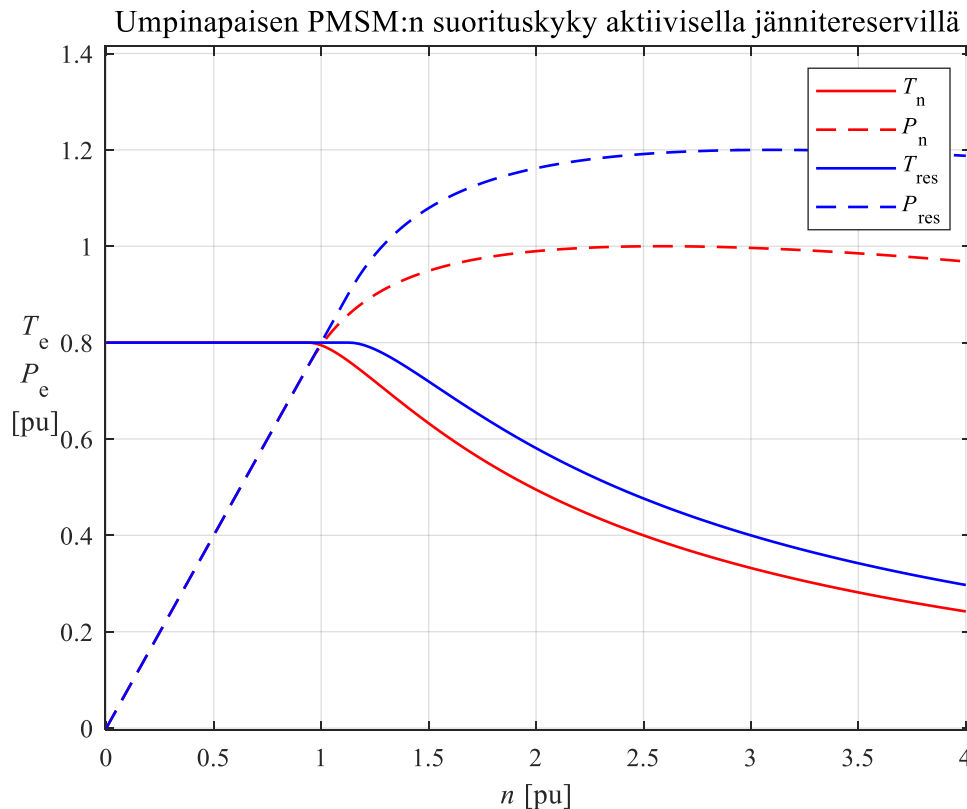
Kuva 3.8. Umpinapaisen kestopagneettitahtikoneen kentänheikennyksen suorituskyky passiivisella jännitereservillä, kun nopeus $\omega_s = 0.4$ pu. Punaiset käyrät merkitsevät koneen nimellistä

suorituskykyä. Sininen käyräpari edustaa 0,1 pu suuruisen jännitereservin suorituskykyä. Koneen teho säilyy nimellisenä, koska kentänheikennys aloitetaan nopeudella $\omega_s = 0,9$ pu. Koneen muut parametrit $\psi_{PM} = 0,8$ ja $u_s = 1$, $i_s = 1$. Staattori-resistanssia ja magneettipiirin kyllästymistä ei oteta huomioon tarkastelussa.

Tämä kaikki siis sillä edellytyksellä, että taajuusmuuttajan kykenisi tuottamaan 400 V ja moottori olisi mitoitettu 400 V:lle. Ajoneuvojen suunnittelussa pitää tietenkin sovittaa yhteen akun DC-jännite, siitä seuraava taajuusmuuttajan maksimianto-jännite ja moottorin nimellispiste niin, että dynaaminen suorituskyky varmistetaan sopivalla jännitereservillä. Tästä sovituksesta käytetään seuraavassa termiä aktiivinen jännitereservi.

Jännitereserviä voidaan hyödyntää jo konetta suunnitellessa. Aktiivisessa jännitereservissä moottorin käämikierroksia vähennetään ja taajuusmuuttajalta vaaditaan vastaavasti lisää virtaa kompensoimaan menetettyjen käämikierrosten virtasumma.

Kuvaa 3.9 tarkastelemalla selviää, että aktiivista jännitereserviä hyödynnettäessä koneen suorituskyky paranee ja kentänheikennyksen kulmapiste siirtyy. Samalla koneesta otettava teho kasvaa.



Kuva 3.9. Umpinapaisen kestopagneettitahtikoneen kentänheikennyksen suorituskyky aktiivisella jännitereservillä nopeusalueella $\omega_s = 0,4$ pu. Punainen käyräpari edustaa nimellistä suorituskykyä. Siniset käyrät edustavat 0,2 pu suuruisia jännitereserviä, jolla kentänheikennys alkaa vasta nopeudella $\omega_s = 1,2$ pu. Aktiivisella jännitereservillä koneen teho ja virta nousevat vastaavasti arvosta $i_s = 1$ pu arvoon $i_s = 1,2$ pu. Koneen $\psi_{PM} = 0,8$ pu. Staattori-resistanssia ja magneettipiirin kyllästymistä ei oteta huomioon tarkastelussa.

3.7 Konetyyppien vertailu

Syventävään tarkasteluun valittiin yhteensä seitsemän sähkömoottorivaihtoehtoa. Napakäämitty kestromagneettitahtikone on mukana hyvän hyötysuhteensa ja traktorin ajo-voimansiirrolle edullisen rakenteensa vuoksi. Tarkasteluun sisällytettiin vertailun vuoksi myös yksi kiertokenttäkäämeillä varustettu, ulkomitoiltaan epätahtikoneen kaltainen versio.

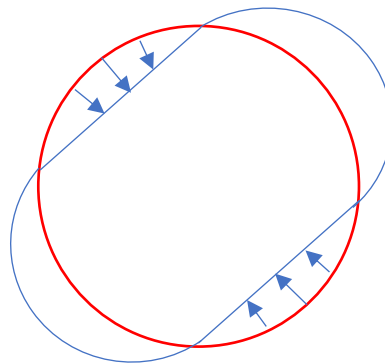
Napakäämikoneille valittiin peruskoneeksi ensin 12/10, jotta taajuus ei kasvaisi kohtuuttomaksi. Ensimmäisen kertaluvun peruskoneen vääntömomentintuottokyky ei alustavassa tarkastelussa kuitenkaan riittänyt hajavuon kasvaessa liian suureksi halkaisijaa pienennettäessä. Toisen kertaluvun koneella staattoriin tuli 24 uraa ja roottoriin 20 napaa. Vääntömomenttia saatiin riittävästi, mutta kaksinkertainen määrä napoja näkyy luonnollisesti korkeampana taajuutena.

Epätahtikone valittiin vaihtoehdoksi yksinkertaisen ja kestäväen konerakenteensa sekä enakkoon edullisempien raaka-ainekustannustensa vuoksi. Epätahtikone voitaisiin korvata synkronireluktanssikoneella, mutta sen epätahtikonetta heikompi kippivääntömomentintuottokyky ja huonompi tehokerroin pudottivat sen tarkastelun ulkopuolelle.

Koska kiertokenttäkoneiden magnetointi-induktanssi on kääntäen verrannollinen napapari-luvun neliöön, epätahtikoneille olisi syytä valita mahdollisimman alhainen napapari-luku. Napapari-luku $p = 1$ olisi optimaalinen valinta, jotta koneen tehokerroin pysyisi mahdollisimman korkeana.

Toisaalta kaksinapaisen sähkökoneen magneettiipiiri on alttiimpi nk. $2f$ -tärinälle, jonka johtuu staattoria ellipsin muotoon muovaavasta Maxwellin jännitystermin normaalikomponentista.

Kuva 3.10 havainnollistaa $2f$ -tärinää.



Kuva 3.10. Esimerkki kiertokenttäkoneen staattoriin kohdistuvista voimista, kun napapariluku $p = 1$. Maxwellin jännitystermin normaalikomponentin huippuarvot seuraavat koneen ilmaväli-
vuontiheyttä.

$2f$ -tärinää aiheuttavien magneettisten voimien suuruus riippuu koneen suunnittelusta, voimista aiheutuva vaste konerakenteen jäykkyydestä ja ominaistuuksista. $2f$ -tärinän välttämiseksi epätahtikoneiden napapariluvuksi valittiin $p = 2$. Ilmiö ei tietenkään poistu millään napapariluvulla, mutta kaksinapaisessa koneessa napajako on leveä, jolloin rakennetta muovaavat voimat saavat suuremman liikkeen aikaiseksi kuin moninapaisissa koneissa.

Yleisesti mobiilikäyttöjen ajomoottoreille ei ilmoiteta varsinaista nimellispistettä teollisuusmoottorien tapaan vaan valmistajat ilmoittavat yleensä koneiden maksimitehon. Traktorin ajomoottorin, teollisuuden S1-käyttöluokkaa muistuttavan peltotyön vuoksi, diplomityön tarkastelussa koneille ilmoitetaan nimellispisteet.

Koneiden kattava, analyyttisen laskennan pohjalta koottu parametritaulukko on esitetty liitteessä I. Koneille on fyysisten absoluuttiarvojen lisäksi laskettu suorituskykyä ja dimensioita vastaavat suhteellisarvot vertailun helpottamiseksi. Taulukon loppuun on sisällytetty julkisista lähteistä saatavilla olevien raaka-aineiden hintojen perusteella lasketut suuntaa antavat materiaalikustannukset.

Alustavassa vertailussa ei oteta huomioon koneen jäähdytystä. Epätahtikoneille ja kiertokenttäiselle kestopagneettitahtikoneelle luonnollinen tapa olisi joko staattorin vesivaippa tai vyyhdenpäiden öljykylpy. Napakäämitylle kestopagneettitahtikoneelle ihanteellinen vaihtoehto olisi staattorin suora öljyjäähdytys.

3.7.1 Lähtötiedot ja layout

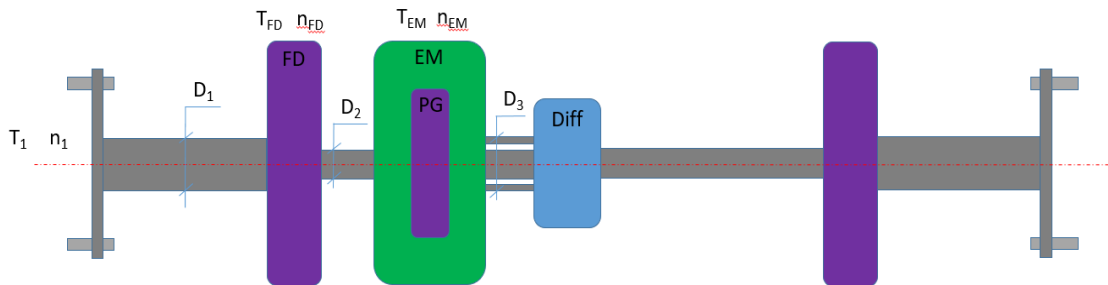
Tarkastelun reunaehdoiksi rajattiin taulukossa 3.1. esitetyt parametrit.

Taulukko 3.1. Sähkökonesuunnittelun suunnittelun tekniset lähtötiedot. Jäähdytystä ei haluttu määrittellä, koska se on lopulta vahvasti riippuvainen valitusta konetyypistä. Koneen nimellisko- peuttakaan ei anneta tässä, sillä se selviää vasta vertailujen tuloksena. Maksiminopeus sen sijaan tiedetään ja se perustuu tässä tapauksessa hammaspyörien ominaisuuksiin.

Suure	Arvo	Yksikkö	Huom
Välipiirijännite	550..700	VDC	
Nimellisteho	125	kW	
Maksiminopeus	6000	rpm	
Staattorin ulkohalkaisija	450	mm	
Kuparin tiheys	8960	kg/m ³	
Neodyymin tiheys	7500	kg/m ³	
Teräslevyn tiheys	7600	kg/m ³	
Teräslevyn tyyppi	M270-35A		

Vertailuun valittiin yhteensä kuusi erilaista konetta. Napakäämikoneita oli yhteensä neljä, koneet PM1..PM4. Koneiden keskinäinen periaaterakenne oli identtinen, mutta pyörimis- nopeus vaihteli välillä 1000..2600 1/min. Napakäämikoneita tarkasteltiin usealla eri pyö- rimisnopeudella, koska konetyyppi on erityisen kiinnostava traktorin taka-akselille ohuen roottorinsa vuoksi.

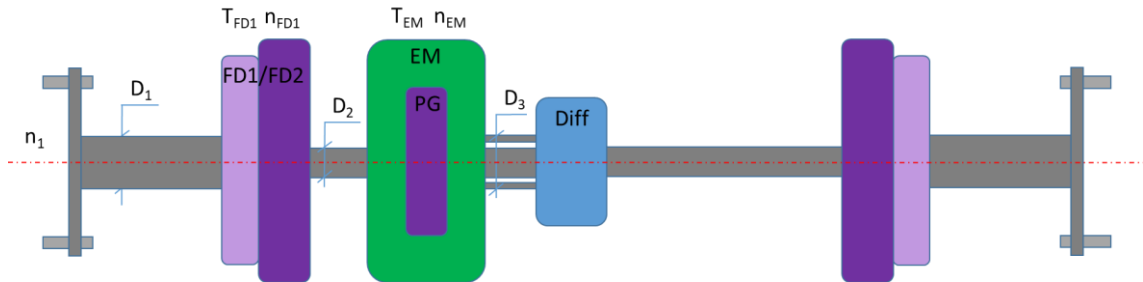
Kuva 3.10. esittää voimansiirron layoutin, kun ajomoottorina on napakäämitahtikone.



Kuva 3.11. Traktorin sähköisen taka-akselin layout, kun ajomoottorina on 1000 1/min pyörivä napakäämitahtikone. Vaihdeettava alennusvaihte sijaitsee roottorin sisällä, tasauspyörästä akseli läpäisee sähkökoneen. Voimansiirron pyörimisnopeus alennetaan vähennyspyörästä pyörän napaan. Sähkökoneen halkaisija $D_{se} = 425$ mm, staattorin pituus $l' = 200$ mm, kun tangentialinen jännitys on noin $\sigma_{tan} = 34,9$ kPa. Aktiiviosien massa noin 108 kg. Kuvassa ei esitetä apujärjestel- miä eikä jarrujen sijaintia. Komponentit eivät myöskään ole mittakaavassa. Kuvan merkinnät, EM sähkökone, PG planeettavaihte, FD alennusvaihte, Diff differentiaali, $D_1 \dots D_3$ akselihalkaisi- joita, T ja n vääntömomentteja ja pyörimisnopeuksia.

Kuvassa 3.11 esitetty napakäämitahtikoneen pyörimisnopeus on 1000 1/min, jolloin ko- neesta tulee kookas ja melko raskas. Staattorin ulkohalkaisija jäi kuitenkin tavoitellun maksimihalkaisijan alle.

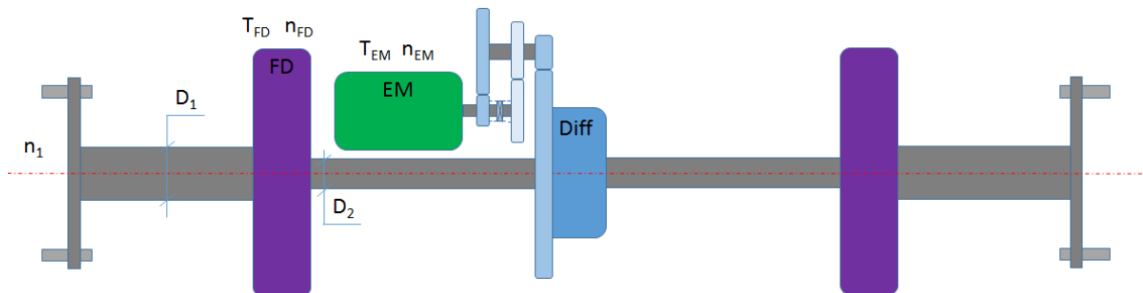
Nopeammin käyvällä koneella layout muuttuu kuva 3.12 mukaiseksi.



Kuva 3.12. Traktorin sähköisen taka-akselin layout, kun ajomoottorina on 2000 1/min pyörivä napakäämitahtikone. Vaihde vaihdettava alennusvaihte sijaitsee roottorin sisällä, tasauspyörästä akseli läpäisee sähkökoneen. Voimansiirron pyörimisnopeutta joudutaan nopeammin pyörivän sähkökoneen vuoksi alentamaan kahdella sarjassa olevalla vähennyspyörästäöllä pyörän napaan. Sähkökoneen halkaisija $D_{se} = 380$ mm, staattorin pituus $l' = 175$ mm kun tangentialinen jännitys on noin $\sigma_{tan} = 35$ kPA. Aktiiviosien massa noin 72 kg. Kuvassa ei esitetä apujärjestelmiä eikä jarrujen sijaintia. Komponentit eivät myöskään ole mittakaavassa. Kuvan merkinnät, EM sähkökone, PG planeettavaihte, FD alennusvaihte, Diff differentiaali, $D_1 \dots D_2$ akselihalkaisijoita, T ja n vääntömomentteja ja pyörimisnopeuksia.

Tarkasteluun valittiin kaksi kappaletta epätahtimoottoreita. IM1-kone on kahdella vaihdettavalla välityksellä, IM2-koneessa niitä on vain yksi. Molempien nimellinen pyörimisnopeus on 3000 1/min.

Kuvassa 3.13 esitetty layout voimansiirtolinjasta, kun ajomoottorina on epätahtikone.



Kuva 3.13. Traktorin sähköisen taka-akselin layout, kun ajomoottorina on 3000 1/min nimellistä nopeutta pyörivä epätahtikone. Epätahtikoneessa vaihdettavaa alennusvaihdetta ei voi asentaa roottorin sisälle. Siksi kone asemoidaan sivuakselin kautta tasauspyörästäölle. Voimansiirron pyörimisnopeus alennetaan vähennyspyörästäöllä pyörän napaan. Sähkökoneen halkaisija $D_{se} = 390$ mm, staattorin pituus $l' = 215$ mm kun tangentialinen jännitys on noin $\sigma_{tan} = 30$ kPA. Aktiiviosien massa noin 153 kg. Kuvassa ei esitetä apujärjestelmiä eikä jarrujen sijaintia. Komponentit eivät myöskään ole mittakaavassa. Kuvan merkinnät, EM sähkökone, PG planeettavaihte, FD alennusvaihte, Diff differentiaali, $D_1 \dots D_2$ akselihalkaisijoita, T ja n vääntömomentteja ja pyörimisnopeuksia.

Kuvasta 3.13 huomataan, että epätahtikone vaatii sivuakselirakenteen. Suorituskyvyltään hyvälaatuisessa epätahtikoneessa on oltava pieni määrä napoja, jolloin koneen sisään ei jää tilaa toteuttaa integroitua planeettavaihteratkaisuita, kuten kuvassa 3.12.

Mekaanisesti olisi mahdollista rakentaa ohutkehäinen erittäin moninapainen epätahtikone, jonka roottorin sisällä olisi alennusvaihde. Ratkaisussa koneen suorituskyky jäisi heikoksi erittäin huonon tehokertoimen takia. Epätahtikoneella staattorilla kulkeva magnetointivirta on suhteessa sitä suurempi mitä suurempi on koneen napaluku. Pieni napaluku edellyttää paksut selät sekä staattoriin että roottoriin.

Kuva 3.12 antaa harhaanjohtavan kuvan epätahtikoneen koosta. Molempien koneiden synkroninopeus on 3000 1/min, mutta halkaisija on noin 20 mm suurempi kuin esimerkiksi PM2-koneella, jonka pyörimisnopeus on 2000 1/min.

3.7.2 Nimellisarvot

Koneiden nimellistaajuudet määräytyvät roottorien napaparien ja halutun pyörimisnopeuden mukaan. Epätahtimoottoreiden IM1, IM2 sekä PM5-kestomagneettitahtikoneen napapari-luku $p = 2$. Totesimme jo edellisessä kappaleessa, että epätahtikoneita ei ole edullista valmistaa moninapaisena, koska yleisesti kiertokenttäkoneiden magnetointi-induktanssi on kääntäen verrannollinen napapari-luvun neliöön. Epätahtikoneilla nimellispisteen taajuudeksi tulee näin 100 Hz.

24/20-napakäämikoneilla PM1..PM4 napapari-luku $p = 10$, joka 1000, 2000 ja 2600 1/min pyörimisnopeuden arvoilla vastaa nimellistaajuuksia 167, 333 ja 433 Hz .

Koneiden maksiminopeuden määrittelyssä on otettu huomioon koneen pyörimisnopeus joko vaihtopisteessä tai siirtoajonopeudella. Napaluvun ja nimellipyörimisnopeuden lisäksi maksiminopeuteen vaikuttaa luonnollisesti vaihteiden lukumäärä.

Kaikkien kestromagneettitahtikoneiden sisäinen lähdejännite on mitoitettu arvoon $E_{PM} = 0,8$ pu.

Hyötysuhde on alustavassa tarkastelussa laskettu yhteen pisteeseen. Arvo ei sisällä puls-sinleveysmoduloinnista aiheutuvia häviöitä. Liitteen I taulukosta huomataan, että arvot ovat koneiden välillä hyvin lähellä toisiaan. Kuten kappaleissa 3.1 ja 3.2 todettiin, yksittäisen pisteen hyötysuhdetta ei niitä pidä tulkita liian yksioikoisesti, koska ajomoottorin kuormitusolosuhteet vaihtelevat rajusti. Syventävään jatkotarkasteluun luotiinkin hyötysuhdekartat koneen n/ T -tasossa.

Koneiden nimellisvääntömomentit korreloivat pyörimisnopeuden mukaan. PM1-koneella nimellinen vääntömomentti on alhaisimman pyörimisnopeuden vuoksi kaksinkertainen muihin kestomagneettitahtikoneisiin nähden.

3.7.3 Mitat

Kaikki vertailun koneet mahtuvat tavoitellun 450 mm halkaisijan sisään. Koneet PM2 ja PM4 ovat joukon pienimmät 0,358 m halkaisijallaan. Pituutta ei tarkastelussa rajattu sitovasti, koska traktorin taka-akseli on joustavampi koneen pituuden suhteen. Laskennassa käytetty tangentialinen jännitys oli epätahtikoneilla $\sigma_{\text{tan}} = 30$ kPA ja kestomagneettitahtikoneille $\sigma_{\text{tan}} = 34..35$ kPA. Epätahtikoneella tangentialisen jännityksen arvoa rajoitti tarkastelussa roottorin lämpeneminen, kun roottorin johdinmateriaalina oli alumiini.

Kestomagneettitahtikone on sähkökoneista monipuolisin layoutin suhteen ja ulkoiset dimensiot voidaan valita melko vapaasti hyötysuhteen kärsimättä liiaksi. Radiaalivuokoneen matala roottoriselkä jättää sisäpuolelleen tilaa hammaspyörille, jolloin se on joustavasti integroitavissa osaksi voimansiirtoa.

Epätahtikoneella vyyhdenpäiden suhteellinen ylitys on napakäämikoneeseen verrattuna merkittävästi suurempi. IM2-konetta suurennettiin hieman IM1-koneeseen verrattuna, koska koneella tavoiteltiin suurempaa maksimivääntömomenttia. IM2-koneella on vain yksi vaihdettava välitys.

Staattorin sisähalkaisijassa on syytä huomata, että kaikki tarkastelussa olevat koneet tarvitsevat mekaanisen roottorirungon.

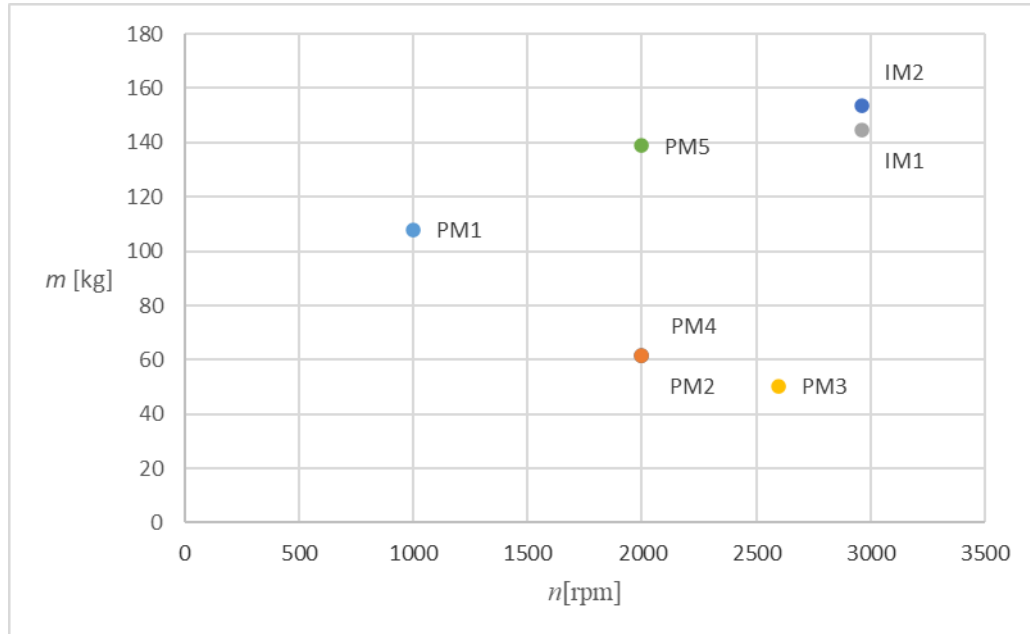
3.7.4 Massat

Epätahtikoneet ovat massoiltaan selkeästi suurimpia. Koneen pieni napapariluku näyttäytyy paksuna ja painavana roottori- ja staattoriselkänä. Erityisesti IM2 koneen vääntömomentintuottovaatimus näkyy koneen massassa.

Moninapaisella napakäämikoneella staattorin selästä tulee ohut ja suhteellinen massa jää verrattain pieneksi. Myös roottori jää ohuen selän ja pintamagneettien ansiosta ohueksi. 2600 1/min pyörivä PM3 on massaltaan joukon kevein. Kestomagneettimateriaalin massa korreloi roottorin koon kanssa. Kestomagneettimateriaalien tiheys on lähellä teräksen tiheyttä, ollen tyypillisesti luokkaa 7500..7700 kg/m³.

Koneen massojen tarkastelussa ei oteta huomioon akselia tai staattorin runkoa. Koneille on myös laskettu roottorin massan ja dimensioiden perusteella inertia, jota ei kuitenkaan ole otettu huomioon alustavassa analyysissä tarkemmin.

Kuva 3.14. esittää kootusti ajomoottorit nopeus-massa-koordinaatistossa.



Kuva 3.14. Traktorin ajomoottorierhdoikkaiden massat. PM1..PM4 koneilla on selkeästi nähtävissä pyörimisnopeuden ja massan keskinäinen korrelaatio, jonka mukaan sähkökoneen massa pienenee likimäärin kääntäen verrannollisesti koneen nopeuteen. IM-koneet erottaa staattorin selän ja roottorin ikeen massa. PM5 muistuttaa kiertokenttäisellä pyörölankakäämillä epätahtikonetta ja on selkeästi painavampi.

3.7.5 Suhteellisarvot ja raaka-aineiden hinnat

Koneiden mittojen, suorituskyvyn ja raaka-aineiden hintojen perusteella lasketuilla suhteellisarvoilla voidaan vertailla eri konetyyppien ominaisuuksia.

Raaka-ainehintojen ja koneen dimensioiden perusteella lasketuissa suorituskyvyn suhdeluissa kestopagneettikone on odotetusti edellä epätahtikoneeseen verrattuna. Toisaalta kallis neodyymi nostaa niiden raaka-ainekustannukset selkeästi epätahtikoneita kalliimmiksi. Halpa hinta onkin olennainen epätahtikoneen etu kestopagneettitahtikoneisiin nähden.

Tarkastelussa neodyymiseoksen laskentaan käytettiin alkuaineita taulukon 3.2 mukaan

Taulukko 3.2. Tarkastelussa käytetyn neodyymi-rauta-boori-kestomagneettiseoksen alkuaineet ja julkisista lähteistä saatavilla olleet hinnat. Kuparin hintana käytettiin 7,7 \$/kg. Valuuttakurssi tarkasteluhetkellä 0,822 \$ / €.

Alkuaine	SI	osuus[%]	hinta [\$/kg]	Huom
Neodyymi	Nd	30,5	450	Hintaa ei ollut saatavilla
Teräs	Fe	66	2,5	
Boori	B	0	0	
Alumiini	Al	0,4	2,1	
Niobium	Nb	1	30	
Dysprosium	Dy	1	250	

Neodyymi-rauta-boori on tunnetuista magneettimetalleista voimakkain ja hinnastaan huolimatta sen kysyntä on kovaa. Markkinahinta vaihtelee verrattain paljon verrattuna muihin sähkökoneiden materiaaleihin kysynnän kovasta heilunnasta johtuen. Sitä käytetään sähkökoneiden lisäksi esimerkiksi laadukkaissa äänentoistolaitteissa ja tietokoneiden kiintolevyissä. Vuonna 2019 suurimman yksittäisen Neodyymin käyttökohteen muodostivat tuulivoimaloiden generaattorit, jotka veivät 10 % osuuden globaalista tuotannosta (Industryresearch, 2019)..

Neodyymin markkinahinta vuosilta 2012-2020 on esitetty kuvassa 3.15.



Kuva 3.15. Neodyymin markkinahinta vuosilta 2012-2021. Hinta määritellään Kiinan renminbinä / tonni (CNY/T). Magneettimateriaaleista on niukkuutta ja niiden keskittyminen muutamille suurille maille näkyy hinnan verrattain suurena volatilitteettina. Kysynnän oletetaan kasvavan tasaisesti koko 2020-luvun (Trading Economics, 2020)

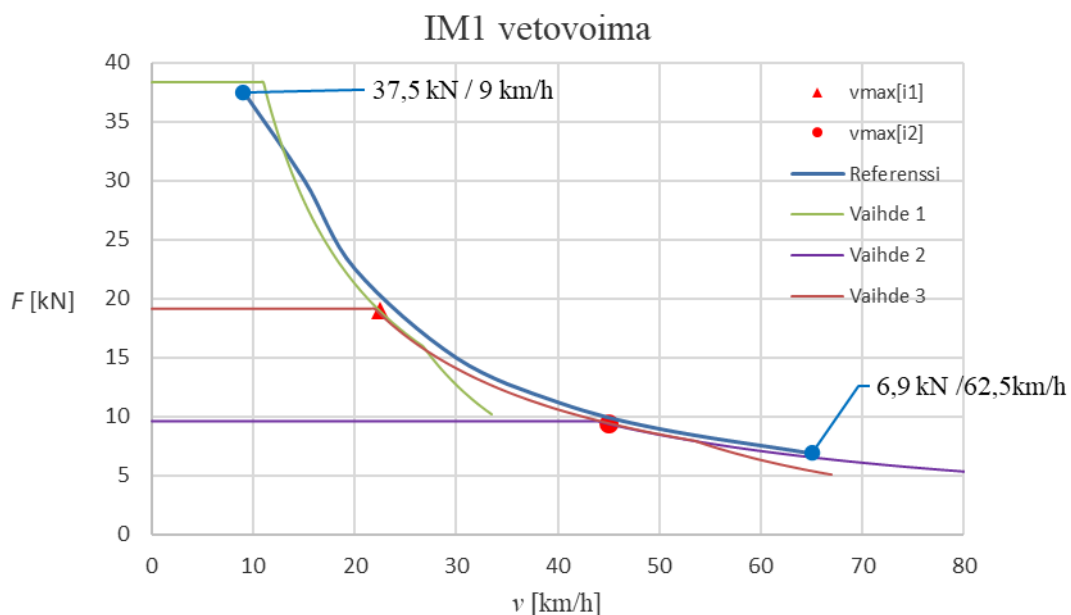
Neodyymi lukeutuu harvinaisiin maametalleihin, joiden rikkaimmat esiintymät ovat keskittyneet Kiinan, Australian ja Intian haltuun. Muita Neodyymin tuottajia ovat muun muassa Yhdysvallat, Brasilia ja Sri Lanka

3.7.6 Suorituskyky

Tarkastelussa huomattiin, että kaikki ehdokkaat pääsevät tavoitteeseen tai ainakin hyvin lähelle sitä. Tarkastelussa ei otettu huomioon ajomoottorien ylikuormitettavuutta, koska traktorin on usein kyettävä työskentelemään pitkään vakioteholla ja ylikuormitettavuudesta saatava etu ei varsinkaan peltotyössä ole merkittävä renkaiden rajallisen pidon vuoksi.

Kaikkien vertailun ehdokkaiden suorituskykyä tutkittiin nimellisvirralla ja -jännitteellä kuvassa 3.2 esitellyn vetovoimatavoitekuvaajan suhteen. Diplomityön suorituskykyvertailussa esitellään PM1 ja PM2 sekä IM1 ja IM2-koneet. Vetovoimakuvaajia ei esitetä PM4- ja PM5-koneesta. PM4-kone on sähköisesti identtinen PM2-koneen kanssa, mutta voimalinjassa on kartiohammaspyöräpari ennen vaihdettavaa välitystä. Kiertokentkäämillä varustetun PM5-koneen ennakkoon ainoana tarkoituksena oli tarjota hyötysuhteen vertailureferenssi napakäämikoneille.

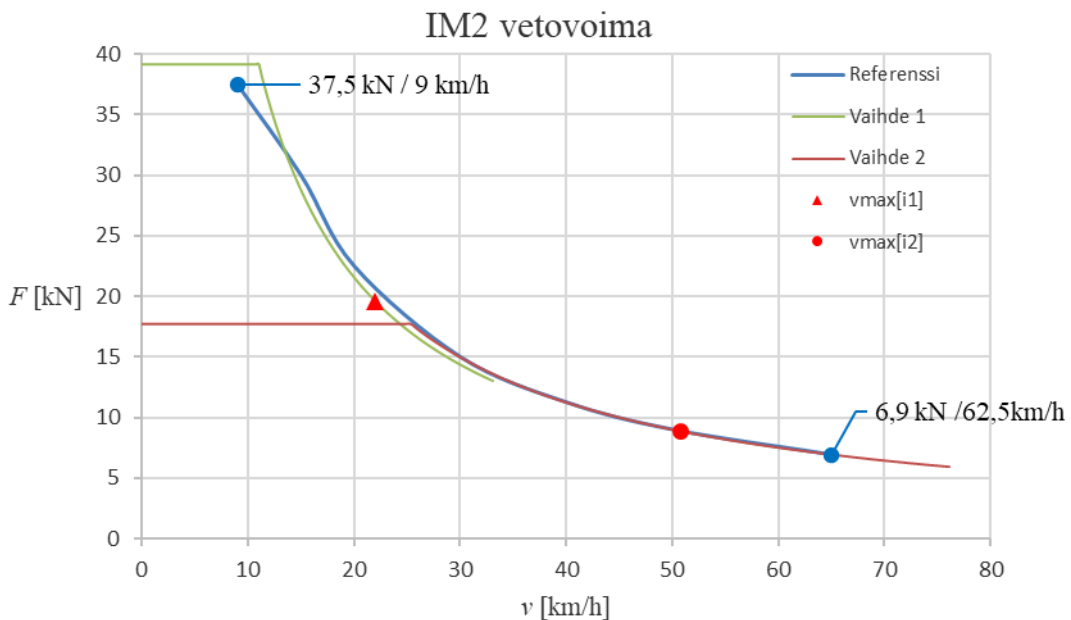
IM1 koneessa on sivuakseliratkaisuun perustuva alennusvaihte kahdella vaihdettavalla välityksellä. Kuva 3.16 havainnollistaa IM1-koneen suorituskykyä nopeusalueella 9..62,5 km/h.



Kuva 3.16 IM1 ajomoottorin vetovoima ajonopeuden funktiona. Sininen käyrä kuvaa traktorin vetovoimatavoitetta nopeusalueelle 9..62,5 km/h. Käyrän päissä ovat peltotyön ja siirtoajon toimintapisteet. Suoralla vaihteella suorituskyky on lähes tavoitekuvaajan mukainen. Vihreä käyrä kuvaa ykkösvaihteen, ruskea kakkosvaihteen ja violetti suoran alennuksen suorituskykyä, kun sähkökoneen esitetty nopeusalue on $n_s = 0.9000$ 1/min. Kone jää 1..1,5 kN vetovoimatavoitteesta 15..45 km/h nopeusalueella. Punainen kolmio kuvaa ykkösvaihteen ja ympyrä kakkosvaihteen pistettä sähkökoneen rajatulla maksiminopeudella $\omega_s = 6000$ 1/min. Koneen S1-käyttöluokkaa vastaava nimellisteho $P_e = 125$ kW, nimellinen vääntömomentti $T_e = 406$ Nm, maksimivääntömomentti nimellispyörimisnopeudessa $T_{max} = 975$ Nm, nimellispyörimisnopeus $n_n = 2954$, renkaan säde $r = 0,875$ m, alennusvaihteen muuntosuhte $i_{FD} = 11$, alennusvaihteen hyötysuhde $\eta_{i1} = 0,94$ sekä suoran vaihteen hyötysuhde $\eta_{i2} = 0,98$. Planeettavaihteiden muuntosuhteet $i_1 = 4$ ja $i_2 = 2$. Koneessa ei käytetä jännitereserviä.

Kuvasta 3.16 huomataan, kuinka IM1-koneen suorituskyky ei peltotyön 9 km/h jälkeen aivan yllä tavoitteeseen. Suurin ero on välillä 20..30 km/h, noin 1,2..1,5 kN. Sekä sähkökoneelle sallittu suurin 6000 1/min maksiminopeus että koneen verrattain korkea maksimivääntömomentti varmistavat vakiotehokäyrän mukaisen suorituskyvyn vaihteelta toiselle. Koneen maksimivääntömomentti alkaa rajoittaa vetovoiman tuottokykyä vasta ykkösvaihteella nopeudella 26 km/h ja kakkosvaihteella noin 54 km/h nopeudessa. Tarkastelun välityssuhteilla suoraa vaihdetta ei hyödynnetä maksimaalisesti.

IM2-koneessa maksimivääntömomenttivaade oli $T_{max} = 3,0$ pu, koska alennusvaihteena oli yksiportainen sivuakseli. Kuva 3.17 havainnollistaa IM1-koneen suorituskykyä nopeusalueella 9..62,5 km/h.



Kuva 3.17. IM2 ajomoottorin vetovoima ajonopeuden funktiona. Sininen käyrä kuvaa traktorin vetovoimatavoitetta nopeusalueelle 9..62,5 km/h. Käyrän päissä ovat peltotyön ja siirtoajon toimintapisteet. Vihreä käyrä kuvaa ykkösvaihteen, ruskea suoran alennuksen suorituskykyä kun sähkökoneen esitetty nopeusalue on $n_s = 0.9000$ 1/min. Kone ei selviä vetovoimatavoitteesta yhdellä vaihdettavalla välityksellä, vaan törmää maksiminopeusrajaan sekä alennetulla että suoralla vaihteella. Punainen kolmio kuvaa ykkösvaihteen ja ympyrä kakkosvaihteen pistettä sähkökoneen

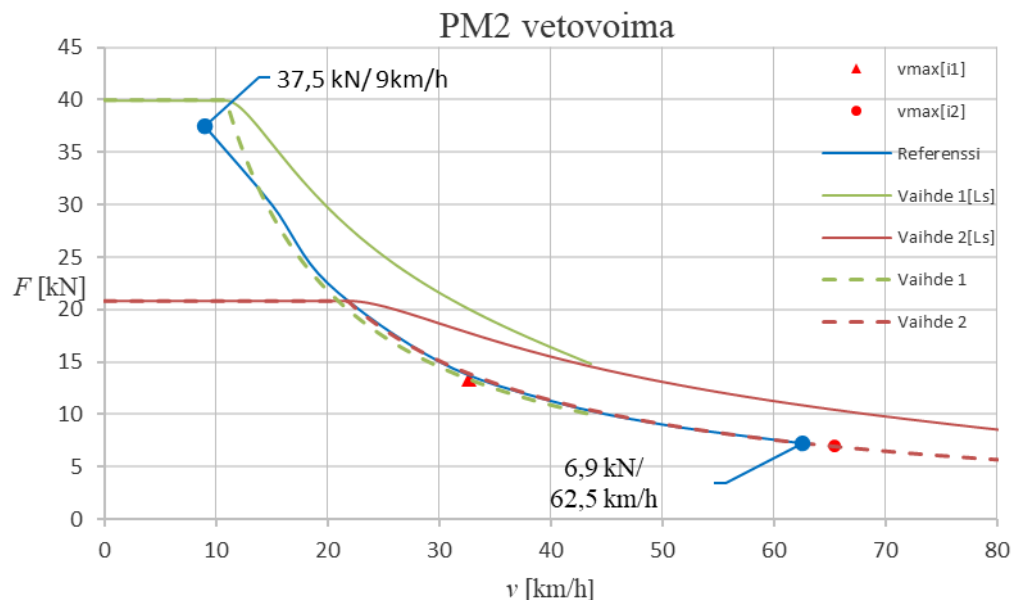
rajatulla maksiminopeudella $n_s = 6000$ 1/min. Koneen S1-käyttöluokkaa vastaava nimellisteho $P_e = 125$ kW, nimellinen vääntömomentti $T_e = 406$ Nm, maksimivääntömomentti nimellispiirteessä $T_{\max} = 1218$ Nm, nimellisyörimisnopeus $n_n = 2954$, renkaan säde $r = 0,875$ m, alennusvaihteen muuntosuhde $i_{FD} = 16$, alennettun vaihteen hyötysuhde $\eta_{i1} = 0,94$ sekä suoran vaihteen hyötysuhde $\eta_{i2} = 0,98$. Planeettavaihteen muuntosuhde $i_1 = 2,3$. Koneessa ei käytetä jännitereserviä.

Kuvasta 3.17 voidaan nähdä IM2-koneen olevan alennusvaihteen osalta likimain identtinen IM1 koneen kanssa. 25 km/h nopeudesta eteenpäin IM2 suoriutuu tehtävästä hieman IM1 konetta paremmin vaihteiston paremman hyötysuhteen ansiosta. Suoralla vaihteella planeettapyörästä pyörii yhtenä kokonaisuutena ja hammaskosketuksia on vähemmän.

IM2 koneen maksimivääntömomentti ei kuvan tarkastelussa rajoita kuormitettavuutta, mutta kone ei 6000 1/min pyörimisnopeusrajoituksen puitteissa selviä referenssikäyrästä. Maksiminopeuden mukainen vaihtopiste jää arvoon 22 km/h ja siirtoajon nopeus on noin 51 km/h.

IM2-konetta voitaisiin hyödyntää rajaamalla siirtoajon nopeus arvoon 50 km/h ja tinki-mällä hieman peltotyön vääntömomenttireservistä. Tavoitteeseen päästäisiin kasvatta-malla alennusvaihteen välitystä esimerkiksi arvoon $i_{FD} = 16,5$ ja pienentämällä planeetta-vaihteen vaihdettavaa välitystä arvoon $i_1 = 2,15$.

Kuva 3.18 esittää PM1-koneen suorituskykyä nopeusalueella 9..62,5 km/h.

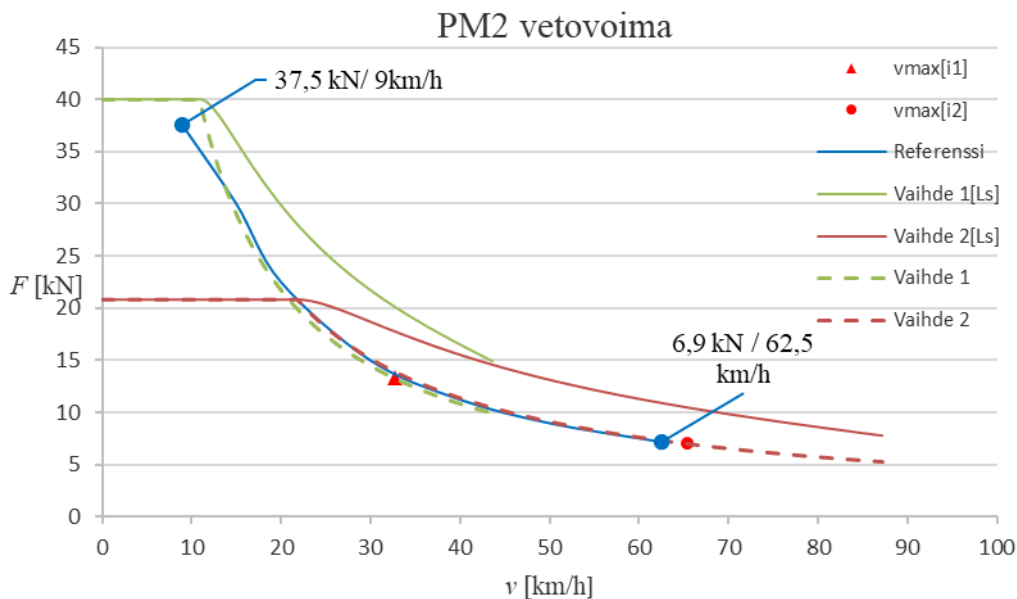


Kuva 3.18 PM1 ajomoottorin vetovoima ajonopeuden funktiona. Sininen käyrä kuvaa traktorin vetovoimatavoitetta nopeusalueelle 9..62,5 km/h. Käyrän päissä ovat peltotyön ja siirtoajon toimintapisteet. Vihreä ja ruskea käyrä kuvaavat sähkökoneen tahti-induktanssin $L_s = 0,7$ pu mukaan laskettua rakenteellista suorituskykyä nimellisvirralla. Vihreä ja ruskea katkoviivakäyrä kuvaavat sähkökoneen vakiotehokäyrän mukaista suorituskykyä. Sähkökoneen esitetty nopeusalue on $n_s = 0..5250$ 1/min. Vakiotehokäyrän mukaan kone ei selviä vetovoimatavoitteesta lukuun ottamatta nopeusalueetta 50..62,5 km/h. Koneen S1-käyttöluokkaa vastaava nimellisteho $P_e = 125$ kW,

nimellinen vääntömomentti $T_e = 1194 \text{ Nm}$, maksimivääntömomentti nimellisasteessa $T_{\max} = 1791 \text{ Nm}$, nimellispyörimisnopeus $n_n = 1000$, renkaan säde $r = 0,875 \text{ m}$, alennusvaihteen muuntosuhde $i_{FD} = 14$, alennetun vaihteen hyötysuhde $\eta_{i1} = 0,94$ sekä suoran vaihteen hyötysuhde $\eta_{i2} = 0,98$. Planeettavaihteen muuntosuhde $i_1 = 2,2$. Koneessa ei käytetä jännitereserviä. Kuvassa ei ole esitetty $n_s = 6000 \text{ 1/min}$ pyörimisnopeutta vastaavia toimintapisteitä koneen alhaisen nimellispyörimisnopeuden vuoksi.

Kuva 3.18 havainnollistaa erinomaisesti koneen tahti-induktanssin merkitystä kentänheikennyksen suorituskykyyn. Tahti-induktanssin arvolla $L_s = 0,7$ saavutetaan teoreettisesti noin $n_s = 10$ pu maksiminopeus, kun $i_d = 1$. Toisaalta suurella tahti-induktanssille invertterin jänniteraja tulee nopeammin vastaan ja kentänheikennykseen siirrytään jo nopeudella $\omega_s = 0,94 \text{ pu}$.

Kuva 3.19 havainnollistaa PM2-koneen suorituskykyä nopeusalueella 9..62,5 km/h.



Kuva 3.19. PM2 ajomoottorin vetovoima ajonopeuden funktiona. Sininen käyrä kuvaa traktorin vetovoimatavoitetta nopeusalueelle 9..62,5 km/h. Käyrän päissä ovat peltotyön ja siirtoajon toimintapisteet. Vihreä ja ruskea käyrä kuvaavat sähkökoneen tahti-induktanssin $L_s = 0,6$ pu mukaan laskettua rakenteellista suorituskykyä nimellisvirralla. Vihreä ja ruskea katkoviivakäyrä kuvaavat sähkökoneen vakiotehokäyrän mukaista suorituskykyä. Sähkökoneen esitetty nopeusalue on $n_s = 0..8000 \text{ 1/min}$. Vakiotehokäyrän mukaan kone selviää vetovoimatavoitteesta 15..20 km/h nopeusalueella lukuun ottamatta. Suoralla vaihteella nopeusalueen 20..62,5 km/h suorituskyky on identtinen referenssikuvajaan kanssa. Vakiotehokäyrän punainen kolmio kuvaa ykkösvaihteen ja ympyrä kakkosvaihteen pistettä sähkökoneen rajatulla maksiminopeudella $\omega_s = 6000 \text{ 1/min}$. Suoralla vaihteella sähkömoottorin suurin sallittu pyörimisnopeus vastaa 65,5 km/h. Koneen S1-käyttöluokkaa vastaava nimellisteho $P_e = 125 \text{ kW}$, nimellinen vääntömomentti $T_e = 615 \text{ Nm}$ (15 Nm reluktanssivääntömomenttia), maksimivääntömomentti nimellisasteessa $T_{\max} = 923 \text{ Nm}$, nimellispyörimisnopeus $n_n = 2000$, renkaan säde $r = 0,875 \text{ m}$, alennusvaihteen muuntosuhde $i_{FD} = 11$, alennetun vaihteen hyötysuhde $\eta_{i1} = 0,94$ sekä suoran vaihteen hyötysuhde $\eta_{i2} = 0,98$. Planeettavaihteen muuntosuhde $i_1 = 2$. Koneessa ei käytetä jännitereserviä.

Kuvasta 3.19 voidaan havaita, kuinka tahti-induktanssin pienentäminen parantaa vakiotehokäyrän mukaista suorituskykyä, kun kentänheikennykseen siirrytään vasta

nopeudella $\omega_s = 1$ pu. Vastineeksi tahti-induktanssin mukaan laskettu magneettiipiirin rakenteellinen suorituskyky laskee nopeammin kuin PM1-koneessa.

3.8 Johtopäätökset

Koneet asetettiin paremmuusjärjestykseen arvioimalla niitä taulukossa 1.3 esitettyjen parametrien suhteen. Vertailun tuloksista voidaan päätellä, että kaikkia tarkasteltuja koneita voitaisiin sähkötekniikan ominaisuuksiensa puolesta hyödyntää traktorin ajomoottorina.

Koneiden magneettiipiirin analyysi on alustavasti laskettu 500V (Y) pääjännitteen mukaan. Lopullinen jännite valitaan kuitenkin hieman alemmas, jotta invertterin mahdollisen moduloinnin menettämisen aiheuttama energiapiikki saadaan paremmin hallintaan. Tätä on avattu tarkemmin kappaleessa 4.4. AEF 032-julkaisun vaatimus välipiirin 550VDC minimijännitteestä vastaa pääjännitteeltään noin 400V koneita.

Sähkökoneen maksinopeutta vastaava taajuus oli valintakriteerinä, koska pienille ja keskisuurille OEM-asiakkaille kaupallisesti hyödynnettävissä olevien IGBT-invertterien mukavuusalue loppuu noin 1000 Hz paikkeille. Lisäksi IGBT-inverttereillä tyypillinen kytkentätaajuus on 8..12 KHz ja suurella taajuudella toimivan moottorin syöttöön ei välttämättä saada riittävän korkeaa kantoaaltotaajuutta. Maksiminopeudelle on myös jätettävä jonkin verran reserviä alamäkitilanteita varten.

Vertailun koneista PM2 ja PM3 ylittävät 1000 Hz rajan. Ylitys on kuitenkin osittain kompensoitavissa välityssuhteen optimoimisella. Yleisesti riittävän reservin varaamiseksi traktorin maantienopeus päätettiin rajata tässä tarkastelussa arvoon 50 km/h alkuperäisen 62,5 km/h sijaan. Tilanne helpottuu lähitulevaisuudessa SiC-invertterien lopullisen läpimurron myötä.

Koneiden maksivääntömomenttia ei arvioitu, koska traktorin ajomoottorin dramaattisella ylikuormitettavuudella ei saada merkittävää lisäetua. Havaitimme ensin kappaleessa 3.2, että vakiovoalueella vetovoimaa ei voi rajattomasti lisätä, jotta pyörien luisto ei kasva liiaksi. Lisäksi totesimme kappaleessa 3.5, että suuren tahti-induktanssin kestopagneetitahvikoneilla ylikuormitettavuus on rajallista kentänheikennyksen nopeusalueella $\omega_s = 2..4$ pu.

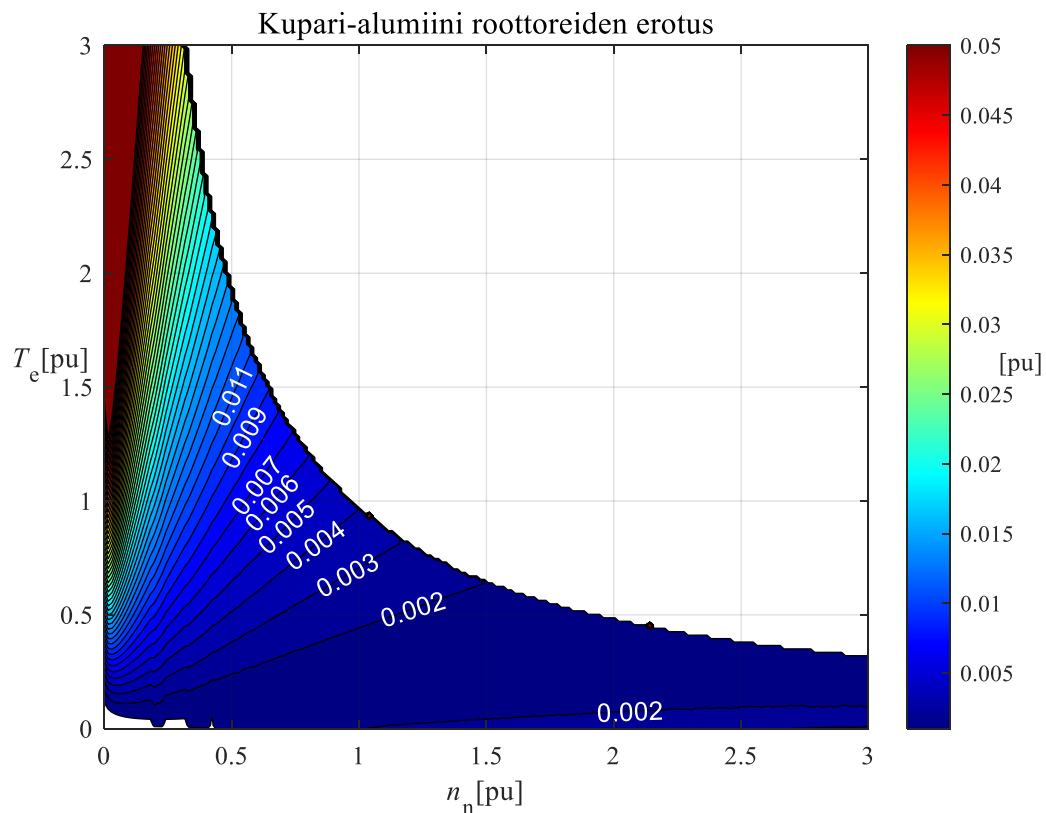
Tutkimuksessa tultiin johtopäätökseen, että traktorin ajomoottorille maksimivääntömomentin tuottokyvyksi riittää minimissään $T_{\max} \sim 1,5..1,8$ pu. Vastaavasti ajomoottorin invertterin ylikuormitettavuuden minimivaatimus on termisen kuormitettavuuden vuoksi

vähintään 1,3 pu, traktorin pienimmän mahdollisen ajonopeuden ollessa tyypillisesti luokkaa 0,3..0,5 km/h.

Kestomagneettitahtikoneiden maksimivääntömomentit koneen nimellisasteessa olivat $T_{\max} \sim 1,5..1,6$ pu. Vertailun epätahtikoneilta maksimivääntömomenttia edellytettiin enemmän, jotta kentänheikennyksen suorituskyky säilyisi yli $\omega_s = 2$ pu nopeuksilla vakiotehokäyrän mukaisena. IM1-koneella maksimivääntömomentti riitti kolmella vaihteella kattamaan koko alueen. IM2-koneen tapauksessa maksimivääntömomenttia edellytettiin vielä enemmän yhden vaihdettavan välityksen vuoksi. Kone ei kuitenkaan täyttänyt 6000 1/min maksimipyörimisnopeusvaatimusta.

Liitteessä I koneille ilmoitettiin ainoastaan yksittäisen pisteen hyötysuhde. Taulukosta huomataan, kuinka koneiden hyötysuhteet asettuivat hyvin lähelle toisiaan. Kestomagneettitahtikoneen hyötysuhde on vakiovoalueella parempi, mutta hyötysuhde heikkenee nopeammin epätahtikoneeseen verrattuna kentänheikennykseen siirryttäessä demagneetoinnin vuoksi.

Epätahtikoneen hyötysuhde jää roottorin virtalämpöhäviöiden vuoksi kauttaaltaan kestopomagneettitahtikonetta heikommaksi. Eron kompensoimiseksi epätahtikone voitaisiin varustaa kupariroottorilla, joka pienentäisi roottorin virtalämpöhäviöitä. Kupariroottorin vaikutukset epätahtikoneen hyötysuhteeseen on esitetty kuvassa 3.12



Kuva 3.12. Epätahtikoneen suuntaa antava hyötysuhteen erotus, kun roottorimateriaalina käytetään kuparia alumiiniin sijaan. Koneen nimellisarvot $P_n = 125 \text{ kW}$ / $n_n = 5954 \text{ rpm}$ ja tangentiaalinen jännitys $\sigma_{T_{an}} = 30 \text{ kPa}$ roottorin lämpenemä $\Theta = 80 \text{ °C}$.

Kuvasta 3.19 voimme todeta hyötysuhteen nousevan vakiovualueella 0,2..0,8 % kupariroottorin eduksi. Epätahtikoneen kupariroottori voisi olla perusteltu vaihtoehto akun toimiessa ajovoimansiirron energiavarastona. Diesel-generaattorin tai polttokennon tapauksessa etu saattaa jäädä marginaaliseksi kupariroottorin vaativien valmistusmenetelmien vuoksi.

Analyttisesti lasketut hyötysuhteet osoittautuivat optimistisiksi erityisesti koneen rauta-häviöiden osalta elementtimenelmällä laskettuun hyötysuhteeseen verrattuna. Hyötysuhteen laskennassa ei otettu huomioon PWM-häviöitä.

Koneille laskettiin aktiiviosien vaatima tila. Staattorin ulkohalkaisija oli varsinaisena arvostelukriteerinä, sillä traktorin taka-akselin layoutin kannalta on koneen suuri halkaisija epäedullisempi parametri kuin suuri pituus.

Jako sopisi sellaisenaan epätahtikoneelle, mutta sen roottoria ei voida hyödyntää voimansiirron mekaanisille osille. Napakäämitty kestopagneettitahtikone soveltuu joustavasti traktorin taka-akselille, kun planeettapyörästä voi integroida roottorin sisälle ja koneen rakenne on optimaalinen öljyjäähdytyksen hyödyntämiseen sekä kylpynä avoimissa staattoriurissa että roottorin sisäpinnan roiskejäähdytyksessä.

Koneen mittoja tarkastellessa on syytä huomata, että mikäli kestopagneettitahtikoneelle halutaan mahdollisimman hyvä hyötysuhde, koneen halkaisijaa ei voi pienentää epätahtikoneen tavoin. Kutistaminen kasvattaisi staattorin virrantiheyttä ja kestopagneettien hajaannuksen määrää. Seurauksena hyötysuhde ja vääntömomentintuotto kyky heikentyisivät.

Koneiden dimensioiden ja materiaalien mukaan laskettu konekohtainen raaka-ainekustannus valittiin vertailukriteeriksi. Epätahtikoneet IM1 ja IM2 ovat materiaalikustannuksiltaan vertailun edullisimmat. PM1..PM4-koneiden magneettiipiirin muiden osien hinta on linjassa IM-koneiden kanssa, mutta kestopagneettimateriaalin kallis hinta nostaa esimerkiksi PM2..PM4 koneiden kokonaiskustannukset kolminkertaisiksi IM-koneisiin verrattuna. PM1 kone on joukon suurimpana kaikkein kallein.

Vertailun alustavaksi voittajaksi valikoitui PM2, jolla on 24 uraa staattorissa ja 20 napaa roottorissa. Koneen maksimitaajuus nousee kuitenkin niin suureksi, että luotettavan vektorisäädön toteuttaminen nykyisillä IGBT-inverttereillä osoittautuu liian riskialttiiksi.

PM2 koneesta suunniteltiinkin 3/2-peruskoneen pohjalta kone, jonka staattorissa on 24 uraa ja roottorissa 16 napaa. 3/2-peruskoneen käämityskerroin on 12/10-konetta alhaisempi, mutta ratkaisulla koneen maksimitaajuus saadaan 800 Hz tuntumaan.

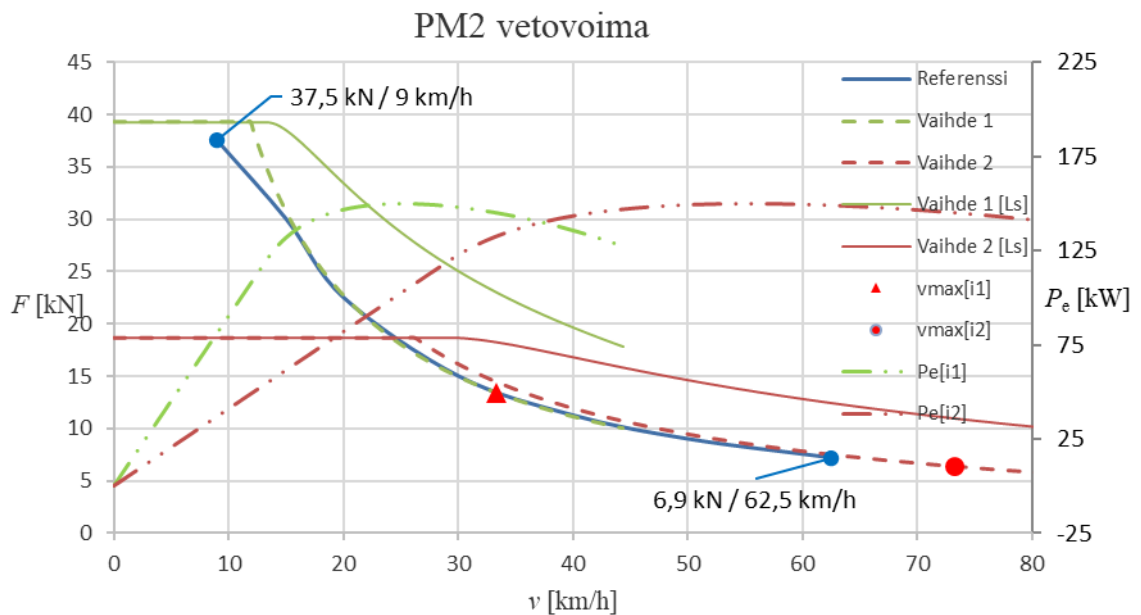
Suorituskyvyn ja koneiden dimensioiden perusteella lasketut suhdeluvut korreloivat koneiden pyörimisnopeuden mukaan. polarisoituvat PM- ja IM-koneiden välillä. Kestomagneettimateriaali tekee koneesta tehoon suhteutettuna kevyemmän kuin epätahtikone

Kuvaajiin PM1- ja PM2-koneiden tahti-induktanssit valittiin esimerkinomaisesti hieman toisistaan poikkeaviksi. Kaikki vertailun napakäämikoneet ovat huolellisella koneensuunnittelulla optimoitavissa tahti-induktanssin alueelle $L_d = 0,3..0,7$ pu.

Kuvien 3.5 ja 3.6 perusteella tahti-induktanssin arvoa voitaisiin pienentää esimerkiksi arvoon $L_d = 0,5..0,6$, jolloin kentänheikennyksen suorituskyky nimellisvirralla säilyy riittävänä ja kentänheikennykseen siirrytään pyörimisnopeuden arvolla $\omega_s = 1,03..1,06$ kun käämivuon arvo $\psi_{PM} = 0,8$ pu.

Voimansiirron alennuksessa hyödynnetyn planeettavaihteen hyötysuhteen arvioitiin konservatiivisesti olevan $\eta_{i1} = 0,94$ pu, joka heikentää vertailun kaikkien koneiden suorituskykyä nopeusalueella 15..25 km/h. Tarkennetun hyötysuhteen lisäksi suorituskykyä voitaisiin vakiotehokäyrän osalta parantaa käyttämällä maltillisesti jännitereserviä.

Kuva 3.21 esittää optimoidun vetovoimakuvaajan PM2-koneelle, jossa jännitereserviä on lisätty 0,2 pu.



Kuva 3.21. PM2 ajomoottorin vetovoima ajonopeuden funktiona, kun koneen jännite $u_s = 1,2$ pu. Sininen käyrä kuvaa traktorin vetovoimatavoitetta nopeusalueelle 9..62,5 km/h. Käyrän

molemmissa päissä ovat peltotyön ja siirtoajon toimintapisteet. Vihreä ja ruskea käyrä kuvaavat sähkökoneen tahti-induktanssin $L_s = 0,6$ pu mukaan laskettua rakenteellista suorituskykyä nimellisvirralla. Vihreä ja ruskea katkoviivakäyrä kuvaavat sähkökoneen vakiotehokäyrän mukaista suorituskykyä. Vihreä ja ruskea kaksoispistekatkoviiva esittävät koneen sähkötehoa välityksillä $i_1 = 2,2$ ja $i_1 = 1$. Sähkökoneen esitetty nopeusalue on $n_s = 0..8000$ 1/min (0..4 pu). Vakiotehokäyrän mukaan kone selviää vetovoimatavoitteesta koko nopeusalueella. Vakiotehokäyrän punainen kolmio kuvaa ykkösvaihteen ja ympyrä kakkosvaihteen pistettä sähkökoneen rajatulla maksiminopeudella $n_s = 6000$ 1/min. Jännitereservin mukaan korjattu kentänheikennyspiste nimellisvirralla $n_s = 2400$ 1/min. Suoralla vaihteella sähkömoottorin suurin sallittu pyörimisnopeus vastaa 73,2 km/h ajonopeutta. Jännitereservin myötä koneen S1-käyttöluokkaa vastaava nimellisteho nousee arvoon $P_e = 150$ kW, nimellinen vääntömomentti säilyy arvossa $T_e = 615$ Nm (15Nm reluktanssivääntömomenttia), maksimivääntömomentti nimellisasteessa $T_{max} = 923$ Nm, nimellispyörimisnopeus $n_n = 2000$, renkaan säde $r = 0,875$ m, alennusvaihteen muuntosuhde $i_{FD} = 10,4$, alennetun vaihteen hyötysuhde $\eta_{i1} = 0,94$ sekä suoran vaihteen hyötysuhde $\eta_{i2} = 0,98$. Planeettavaihteen muuntosuhde $i_1 = 2,2$. Koneessa ei käytetä jännitereserviä.

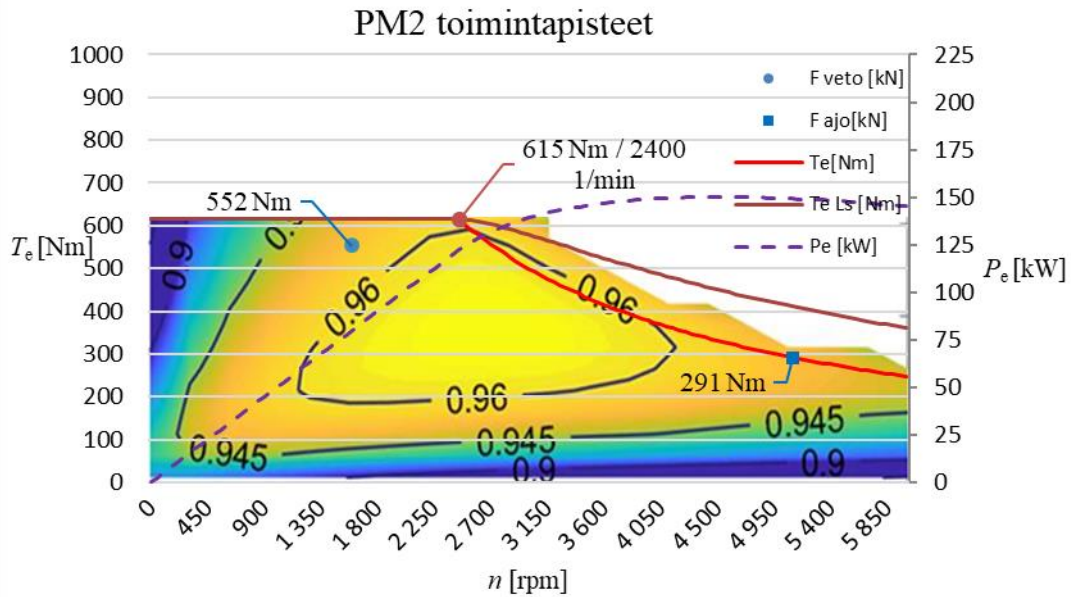
Kuvasta 3.21 huomataan, kuinka maltillisella jännitereservillä voidaan parantaa koneen suorituskykyä. Aktiivisessa jännitereservissä moottorin käämikierroksia vähennetään ja taajuusmuuttajalta vaaditaan vastaavasti lisää virtaa kompensoimaan menetettyjen käämikierrosten virtasumma.

Kuvasta 3.21 voidaan päätellä, että PM2-kone suoriutuu hyvin dieselkäyttöisen vertailutraktorin tavoitevetovoimaan nähden. Kuvassa 3.20 invertterin maksimivirtaa ei ole esitetty, mutta esimerkiksi arvolla $i_{smax} = 1,6$ pu traktori voisi lähteä suoralla vaihteella liikkeelle raskaallakin kuormalla ja tarkastelussa käytetyillä välityssuhteilla sähkömoottorin ylikuormitettavuus kompensoi suorituskyvyn hetkellisenä aina pyörien luistorajaan asti.

Kohtuullinen ylikuormitettavuus on eduksi myös kuorman dynaamisissa vaihteluissa. Veto säilyy katkeamatta, kun vaihdetta ei tarvitse vaihtaa pienemmälle vetovoiman kasvattamiseksi.

Kuvassa 3.21 ei ole esitetty dieselkäyttöisen vertailutraktorin suorituskykyä, joka havainnollistaisi erinomaisesti kappaleessa 1.4.4 esitetyn taulukon 1.2 sisällön. Dieselmoottorin tehokas käyttöalue on varsin kapea, mitä joudutaan kompensoimaan vaihdettavien välitysten määrällä. Taulukossa 1.22 dieseltraktorin voimansiirrossa on 0..62,5 km/h nopeusalueelle 20 välitystä. Sähkömoottorille vaihdettavia välityksiä tarvitaan ainoastaan yksi.

Vertailun voittaneelle PM2-koneelle arvioitiin elementtimenetelmällä hyötysuhdekartta n / T_e -koordinaatistossa. Kuva 3.22 esittelee koneelle arvioitua hyötysuhdetta, kun aktiivista jännitereserviä on käytössä 0,2 pu.



Kuva 3.22. PM2 ajomoottorin toimintapisteet n / T_e -koordinaatistossa, kun nopeusalue $n_s = 0..6000$ 1/min (0..3 pu). Sininen ympyrä indikoi peltotyö toimintapistettä ja sininen neliö siirtäjänopeudella 62,5 km/h. Punainen käyrä indikoi vakiotehokäyrää ja ruskea tahti-induktanssin mukaan laskettua magneettipiirin rakenteellista suorituskykyä. Kuvaajan taustalla on elementtimenetelmällä laskettu hyötysuhdekartta 3/2-napakäämikoneesta. 0,2 pu jännitereservin ansiosta kone siirtyy kentänheikennykseen vasta nopeudella $n_s = 2400$ 1/min. Koneen jännite $u_s = 1,2$ ja tahti-induktanssi $L_s = 0,6$ pu. Jännitereservin myötä koneen S1-käyttöluokkaa vastaava nimellisteho nousee arvoon $P_e = 150$ kW, nimellinen vääntömomentti säilyy arvossa $T_e = 615$ Nm (15Nm reluktanssivääntömomenttia), maksimivääntömomentti nimellispisteessä $T_{max} = 923$ Nm, nimellisyörimisnopeus $n_n = 2000$, renkaan säde $r = 0,875$ m, alennusvaihteen muuntosuhde $i_{FD} = 10,4$, alennetun vaihteen hyötysuhde $\eta_{i1} = 0,94$ sekä suoran vaihteen hyötysuhde $\eta_{i2} = 0,98$. Planeetta-vaihteen muuntosuhde $i_1 = 2,2$.

Kuvasta 3.22 huomataan kestromagneettitahtikoneen hyvän hyötysuhteen ($\eta \approx 0,945$) kattavan noin 80 prosenttia vakiovo- ja vakiotehokäyrän toiminta-alueesta. Kuvan 3.22 koneella hyötysuhde heikkenee konetta kuormitettaessa alle 200 rpm nopeuksilla sekä kentänheikennyksessä hyvin kevyellä kuormituksella.

Kuvassa 3.22 esitetty maantieajon toimintapiste vastaa nopeutta 62,5 km/h. Nopeuden rajaaminen arvoon 50 km/h siirtää toimintapisteen erinomaisen hyötysuhteen ($\eta \approx 0,96$) tuntumaan. Jos molemmat toimintapisteet haluttaisiin erinomaisen hyötysuhteen alueelle, tulisi alennusvaihteen välitystä suurentaa ja voimansiirron kokonaisvälitystä pienentää. Vaihtoehtoisesti voitaisiin käyttää kahta vaihdettavaa välitystä. Alennetun vaihteen välityksen suurentaminen kasvattaisi vääntömomentin tuottokyvyn tarpeettoman suureksi ja mahdollinen vaihtopisteen nopeusalue pienenesi. Toisaalta toinen vaihdettava välitys monimutkaistaisi vaihteistoa.

Ajoneuvoihin liittyvien sähköjärjestelmien terminologia on vakiintumatonta eikä noudata EU:n pienjännitedirektiivin terminologiaa. Pienjännitedirektiivissä (Low voltage directive) alle 50 VAC tai 125 VDC puhutaan pienoisjännitteestä, alle 1000 VAC ja 1500 VDC pienjännitteestä ja niitä suuremmilla jännitteillä suurjännitteestä (High voltage). Kun ollaan yli pienoisjännitteen, käytetään tässä työssä termiä korkeajännite, vaikka toimitaan pienjännitealueella. Pitää muistaa, että korkeajännite ei ole suurjännitteen synonyymi, vaikka englanniksi useimmiten esim. 700 VDC akkua nimitetään high voltage battery -nimityksellä.

Traktoreiden korkeajännitteiset hybridi- ja sähköistysratkaisut ovat verrattain uusia ja alan standardointi on vielä osittain kehittymässä. Alan kattojärjestö AEF on julkaissut teknisiä ohjeistuksia traktorin ja työkoneiden sähköistyksestä.

AEF (Agricultural Industry Electronics Foundation) on vuonna 2008, alan suurimpien laitevalmistajien yhdessä perustama riippumaton järjestö. Järjestön tavoitteena on edistää maataloustyökoneiden elektroniikan ja sähköistyksen kehitystä, korkeajännitteisten komponenttien yhteensopivuutta ja teknologiaa. AEF ottaa myös kantaa sähköistyksen turvallisuuteen sekä omistaa, hallinnoi ja ylläpitää koneiden digitaalisen tiedonsiirron ISOBUS-standardia. Juuri ISOBUS-väylän tiedonsiirron tulkinnanvaraisuus ja laitteiden yhteensopivuusongelmat olivat organisaation järjestäytymisen juurisyy. Järjestön ydinjäseninä on kahdeksan suurta laitevalmistajaa ja kolme maatalousjärjestöä. Kaikkiaan jäseniä on yli 240. Suomesta jäseninä ovat muun muassa Dometal Oy, EPEC Oy sekä Luonnonvarakeskus (AEF, 2021). Valtra kuuluu AGCO-konsernin kautta järjestön ydinryhmään.

AEF 030 RIG 1.0 High Voltage - Electric Power Interface esittää tekniset suuntaviivat työkoneen liittämiseksi osaksi traktorin korkeajännitejärjestelmää. AEF 031 RIG 1.0 High Voltage - Safety Requirements määrittelee työkoneen korkeajännitelitännän sähköturvallisuusvaatimukset. AEF 032 RIG 1_0 High Voltage - Logical and Operational Interface määrittää traktorin korkeajännitejärjestelmän sähköteknisen yksityiskohdat, mahdolliset toimintatilat ja kommunikointiprotokollan korkeajännitteisen energiavaras-ton jo kuluttajan välillä. AEF:n julkaisut 030..032 eivät ole virallisia standardeja, mutta niiden sisältö nojaa pääpiirteittäin ISO 6469 ja EN ISO 16230-standardisarjoihin.

Kansainvälinen ISO 6469-3 määrittelee B-jänniteluokan tiellä liikkuvien ajoneuvojen korkeajännitteisten sähköjärjestelmien vaatimukset suojaukseen sähköiskulta.

Yhdysvaltalainen SAE J 1766 esittää vaatimukset korkeajännitteisen hybridi- täyssähkö- sekä polttokennoajoneuvon sähköturvallisuuden säilymiseksi kolaritilanteessa.

Eurooppalaista EN ISO 16230 -standardia sovelletaan traktoreihin, kokonaan tai avustaan omatoimisesti liikkuviin koneisiin sekä traktoriin kiinteästi tai tilapäisesti asennettaviin sekä hinattaviin työkoneisiin. Standardi koskee sähkölaitteita ja tällaisten koneiden sähkölaitteiden osia, joiden sähköjärjestelmien jännite on 50..1000 VAC tai 75.. 1500 VDC.

Traktorien korkeajännitteinen jakelujärjestelmä on koneen johtavasta rungosta erotettu IT-järjestelmä (AEF 032). Traktoreissa välipiirin jännitteen normaali vaihteluväli on 550...800VDC välillä (AEF 032). Nimellisen jännitteen on toistaiseksi sovittu olevan 700VDC.

Taulukko 4.1 tiivistää traktoreissa ja maataloustyökoneissa sovellettavat jänniteluokat.

Taulukko 4.1. NRMM-koneiden sähköjärjestelmien jännitetasot. Suurjännitejärjestelmän nimellisjännite 700VDC ja asettuu luokkaan VC-B2. Vaihtovirtapiirien jännite on valmistajan vapaasti valittavissa kuitenkin niin, että välipiiri sallii 400VAC standardikoneen hyödyntämisen työko-
neissa (ISO 6469-3, AEF 032)

Jänniteluokka	Jännitealue	
	VDC [V]	VAC [V]
A	$0 < U_n \leq 60$	$0 < U_n \leq 30$
B	$60 < U_n \leq 1500$	$30 < U_n \leq 1000$
B1	$60 < U_n \leq 75$	$30 < U_n \leq 50$
B2	$75 < U_n \leq 1500$	$50 < U_n \leq 1000$

4.1 Kapasitanssi

Tehopuolijohdekytkimien jännitteen ja virran suuret nousunopeudet aiheuttavat korkea-
taajuisia komponentteja, jotka leviävät galvaanisesti virtapiiriin eri osiin sekä säteilevät
ympäristöön. Häiriöiden vaimentamiseksi hyväksyttävälle tasolle tehoelektronikassa
joudutaan käyttämään kondensaattoreita lyhytaikaisina energiavarastoina, jotka suodat-
tavat korkean kytkentätaajuuden aiheuttamia jännitepiikkejä pois.

Tehon virtaussuuntaan etenevän yhteismuotoisten häiriöiden vaimentamiseksi äärijohti-
men ja maan välille asennettua kondensaattoria kutsutaan Y-kondensaattoriksi. Vastaa-
vasti äärijohtimien välillä eri suuntiin etenevän differentiaalimuotoisen häiriön vaimen-
tamiseksi johtimien väliin asennetaan X-kondensaattori.

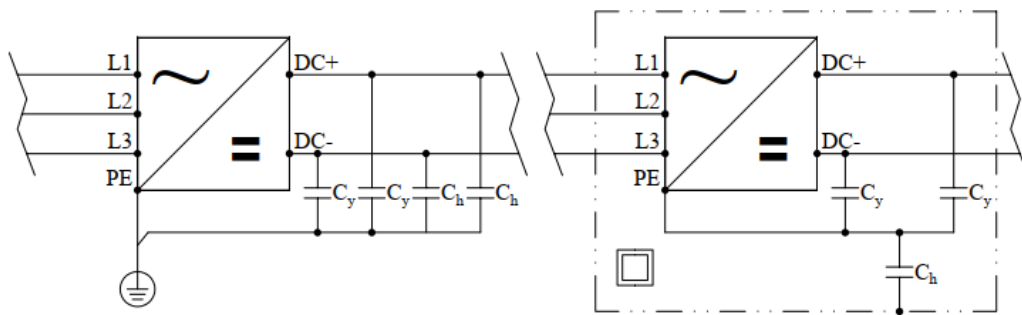
Y-kondensaattori voi rikkoutuessaan tai poikkeusolosuhteissa purkautuessaan aiheuttaa
sähköiskun vaaran koneen käyttäjälle. X-kondensaattorin vikaantuminen aiheuttaa oiko-
sulun äärijohtimien välille, mutta riski on hallittavissa asianmukaisella suojauksella.

Y-kondensaattorien vuoksi koneen maapotentiaalista erotetun korkeajännitejärjestelmän kokonaiskapasitanssia tulee rajoittaa siten, ettei se aiheuta vaaraa koneen käyttäjälle missään tilanteessa.

V2-B -jänniteluokan traktoreiden sähköasennuksia ohjaava tekninen julkaisu AEF 032 High Voltage - Logical and Operational Interface, tarkastelee järjestelmän turvallisuutta hajakapasitanssiin varatun kokonaisenergian kautta.

Julkaisun mukaan korkeajännitteinen sähköjärjestelmä tulisi maakapasitanssien minimoimiseksi ensisijaisesti rakentaa kaksoiseristetyin komponentein suojausluokkaan II. Kaksoiseristetyn laitteen Y-kondensaattorit kytkeytyvät sarjaan laitteiston, kaksoiseristykseen vuoksi pienenevän, hajamaakapasitanssin kanssa ja asennuksen kokonaiskapasitanssi jää siten merkittävästi pienemmäksi kuin käyttöeristetyissä laitteistoissa.

Kuva 4.1 havainnollista suojausluokkien I ja II eroa komponenttitasolla.



Kuva 4.1. AEF 032-standardiluonnoksen, ISO 6469-3 standardia mukaileva näkemys traktorin korkeajännitejärjestelmän komponenttirakenteesta järjestelmään varautuneen kapasitanssin minimoimiseksi. Vasemmalla suojausluokan I invertteri, jossa Y-kondensaattorit C_y kytkeytyvät potentiaalintasaukseen rinnan rakenteen hajakapasitanssien C_h kanssa. Oikealla suojausluokkaan II rakennettu laite, joka on rakenteeltaan kaksoiseristetty. Rakenteen hajakapasitanssi C_h pienenee merkittävästi kapasitanssien sarjakytkenän vuoksi.

Mikäli suojausluokan II rakenne ei ole kaikilta osin mahdollista, esikuvastandardeihin ISO 6469-3, SAE J 1766 sekä ISO 16230-1 nojaten, AEF 032 rajoittaa sähköjärjestelmän galvaanisesti yhteen kytketyn piirin maakapasitanssien maksimienergiamäärän arvoon 0,2J. 800 VDC välipiirijännitteellä laskettuna energiamäärä vastaa 625 nF kapasitanssia. Energiämäärää tarkastellessa on huomattava kaikki korkeajännitejärjestelmään liitetyt apulaitteet sekä traktorin mahdolliset työkonet.

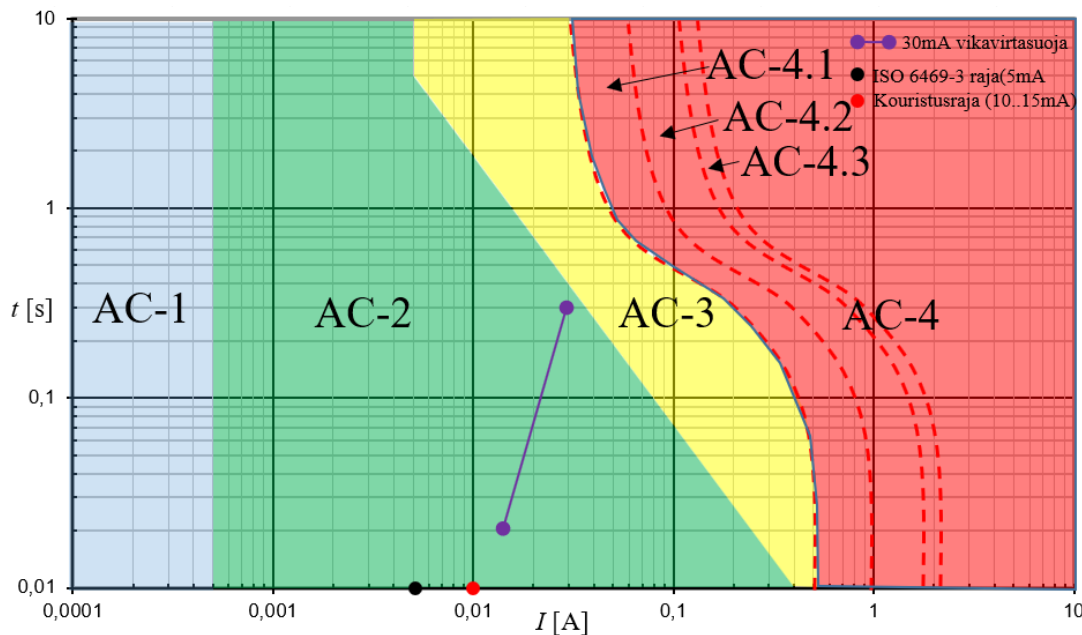
4.2 Eristystaso

Traktorin korkeajännitejärjestelmän eristystasovaatimus käytettävien nimellisjännitteiden mukaan on $500 \Omega / VAC$ ja $100 \Omega / VDC$. Mikäli järjestelmässä on galvaanisesti yhteen kytkettynä sekä VAC- että VDC-piirejä, eristystaso jännitteisten osien ja rungon välillä on kauttaaltaan $500 \Omega / V$.

Mikäli korkeajännitteisen vaihtovirtapiirin komponentti on varustettu joko vahvennetulla tai kaksoiseristetyllä rakenteella tai vaihtoehtoisesti mekaanisella, komponentin teknisen käyttöiän kestäväällä lisäsuojalla, riittää eristysvastukseksi vähintään $100 \Omega / V$.

Vaatimukset perustuvat IEC 60479-1:2018 standardiin, jonka mukaan 5 mA vaihtovirta tai 25 mA tasavirta eivät tavallisesti ole vaarallisia ihmiskehölle. Kehon läpi kulkiessaan sähkövirta häiritsee ihmisen hermojärjestelmän toimintaa ja aiheuttaa palovammoja. Vaihtuvirran voimakkuus määräytyy virran suuruuden ja kestoajan perusteella. Vaihtovirralla vaaratekijäksi muodostuu myös tahdosta riippumaton kouristelu, jonka seurauksena sähköiskun uhri saattaa jäädä kiinni jännitteiseen osaan.

Vaihtovirran vaikutuksia on havainnollistettu kuvassa 4.2



Kuva 4.2. ISO 6469-3 standardin määritelmä vaihtovirran vaikutuksista keskimääräiseen ihmiskehon. Sinisellä AC-1 alueella $100..500 \mu A$ virta on niin pieni, että sitä ei tavallisesti tunne. Vihreän AC-2 alueen virta-alue on $500 \mu A..500 mA$ välillä ei tavallisesti aiheudu haitallisia fysiologisia vaikutuksia, kun noudatetaan kuvan aikarajaa. Alueen musta piste indikoi ISO 6469-3 standardin sallimaa, 5 mA suuruista jatkuvaa vuotovirtaa. Punaisen pisteen $10..15 mA$ suuruinen virta aiheuttaa jo tahdosta riippumaton kouristelu. Violetti viiva indikoi 30 mA vikavirtasuojan toimintaa. Keltaisella AC-3 alueella ei tavallisesti orgaanisia vaurioita mutta suurempi kouristelu ja hengitysvaikeudet todennäköisiä. AC-4 alueella kammiovärinän todennäköisyys virran

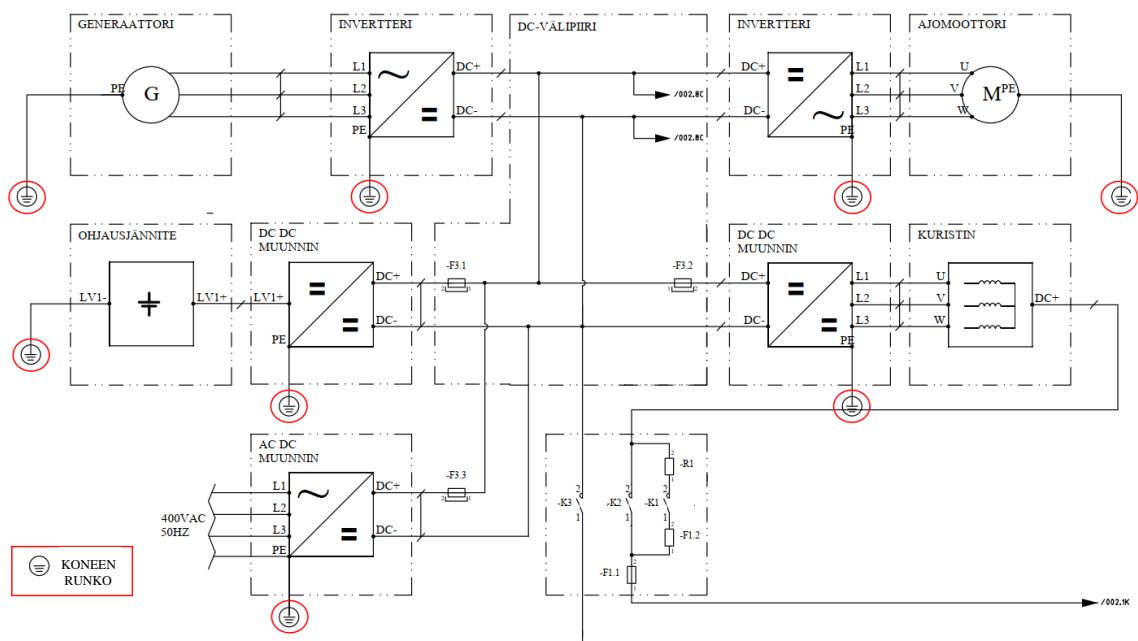
kasvaessa yli 500 mA siten, että AC-4.3 luokassa se on jo yli 50 %. Suuremmalla virralla ja pidemmällä kestoajalla tavallisesti vakavia palovammoja sekä sydämen ja hengityksen pysähdys. Standardi EN ISO16230-1 velvoittaa traktorivalmistajan seuraamaan eristystason eheyttä joko säännöllisten huoltotoimenpiteiden yhteydessä tai automaattisella valvontamenetelmällä.

4.3 Potentiaalintasaus

Kaikki traktori- työkoneyhdistelmän olevat johtavat osat liitetään potentiaalintasausjohtimilla yhteen siten, että kahden kosketeltavissa olevan, johtavan osan vastus on alle 0,1 Ω . Potentiaalintasaukseen voidaan hyödyntää erillisten potentiaalintasauskaapelien ja johtimen lisäksi traktorin ja työkoneen hitsattuja tai pultilla kiinnitettyjä johtavia rakenteita kuitenkin niin, että potentiaalintasausreitit kaikki osat mitoitetaan kestävästi korkeajännitejärjestelmän suurin mahdollinen vikavirta (AEF 032)

Traktoriin liitettävä työkone tulee galvaanisesti osaksi yhtenäistä potentiaalintasausjärjestelmää. Pistokkeen potentiaalintasausjohtimen poikkipinta-ala on 10 mm² (AEF 030) ja johdinliittimen ylimenoresistanssi enintään 0,2 m Ω siten, että resistanssin arvo saa kolminkertaistua pistokkeen vaatimustenmukaisuustestissä. Työkoneen pistoketta kiinnitettäessä potentiaalintasausjohtimen liitin kytkeytyy ensimmäiseksi. Vastaavasti pistoketta irrotettaessa liitin kytkeytyy irti viimeisenä.

Kuva 4.3 havainnollistaa korkeajännitejärjestelmän potentiaalintasauksen toteuttamista.



Kuva 4.3. AEF 032-standardiluonnoksen, EN ISO 16230-1 standardia mukaileva näkemys traktorin korkeajännitejärjestelmän potentiaalintasauksesta. Punaisella ympyrällä on merkitty

laitekohtainen potentiaalintasausliityntä traktori- työkoneyhdistelmän johtavan rungon potentiaaliin. Korkeajännitejärjestelmän pääpiirin kaapelointia ei oteta huomioon potentiaalintasausreitoin osana. Kaaviossa ei esitetä työkoneita ja akustoa.

Potentiaalintasausjärjestelmän vaatimustenmukaisuus on testattava vähintään 0,2 A testivirralla 5 sekunnin ajan jännitteen ollessa enintään 60 VDC. Enintään 2,5 metrin etäisyydellä, kahden kosketeltavissa olevan johtavan osan välinen jännitehäviö mitataan ja potentiaalintasausreitoin resistanssi lasketaan mittaustuloksista Ohmin lain mukaan.

4.4 Ajomoottorin invertterin moduloinnin menetys

Kestomagneettitahtikoneen turvallinen kentänheikennysalue määräytyy kestomagneettien käänmivuon, eli tyhjäkäyntijännitteen mitoituksen suhteesta invertterin nimellisjännitteeseen. Jos tyhjäkäyntijännite mitoitetaan lähelle invertterin nimellisjännitettä, turvallinen kentänheikennysalue voi päättyä jo alle $\omega_s = 1,5$ pu nopeudella. Mikäli kentänheikennyksessä toimivan koneen demagnetoiva virta jostain syystä poistuisi, koneen sisäinen lähdejännite nousisi yhtälön (43) mukaisesti pyörimisnopeuden mukaiseen arvoon.

Moduloinnin katketessa invertterin lähtösilta muuttuu hetkellisesti diodisillaksi, joka taa-sasuuntaa moottorista generaattoriksi muuttuneen sähkökoneen tuottaman jännitteen taajuusmuuttajan välipiiriin. Pitkällä kentänheikennyksessä toimittaessa tällä voi olla kohta-
lokkaat seuraukset, mikäli taajuusmuuttajan tulosillalla ei ole aktiivista ohjausta tai välipiiriin ole kytkettynä energiavarastoa tai jarruvastusta.

Moduloinnin menettämisen seurauksena välipiiriin generoituva teho on ladattava energiavarastoon, hukattava lämmöksi jarruvastukseen tai kulutettava muissa korkeajännitejärjestelmän laitteissa. Potentiaalisia kulutuspisteitä voisivat olla esimerkiksi nestejäähdytyskiertojen jäähdyttimien puhaltimet, ja kompressorit sekä lämmitysvastus.

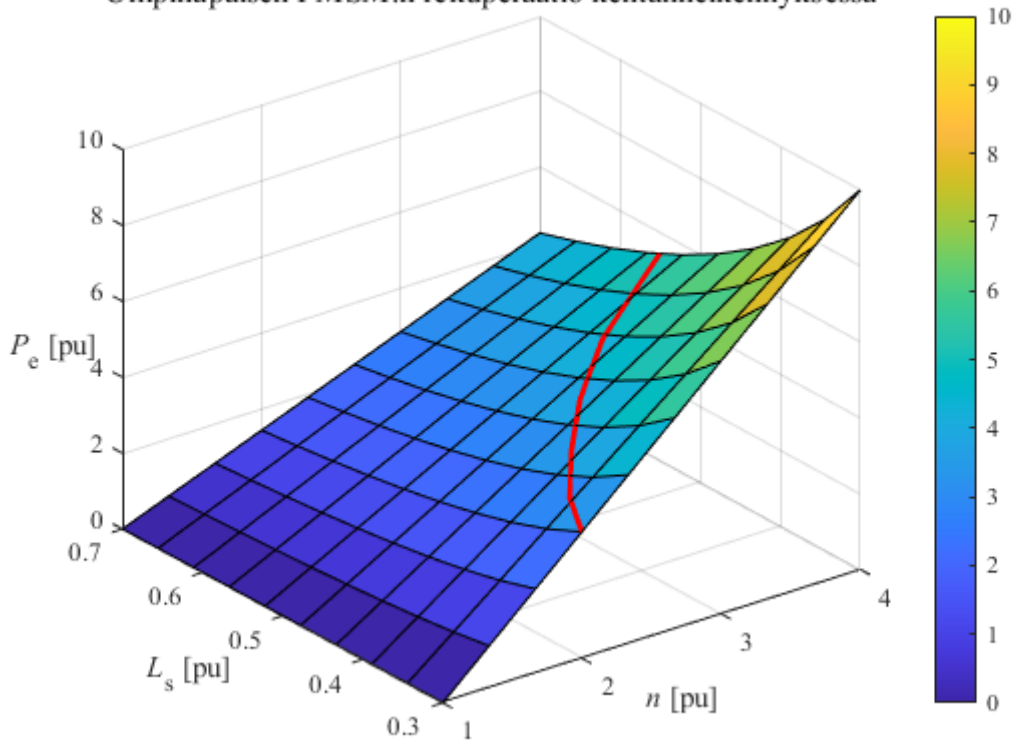
Kestomagneettitahtikoneen välipiiriin generoimaa tehoa voidaan tarkastella esimerkiksi tehokulmayhtälön avulla, joka poikkileikkaustasossa magneettisesti isotrooppiselle roottorille määritellään.

$$P = 3 \left(\frac{U_{\text{sph}} E_{\text{PM}}}{\omega_s L_s} \sin \delta_s \right) \quad (4.1)$$

Yhtälöstä (4.1) voidaan todeta, että koneen tahti-induktanssi L_s on dominoiva tekijä invertterin mahdollisessa virhetilanteessa.

Kuvassa 4.4 on havainnollistettu kestomagneettitahtikoneen välipiiriin generoimaa tehoa invertterin moduloinnin kadotessa.

Umpinapaisen PMSM:n regeneraatio kentänheikennyksessä



Kuva 4.4. Umpinapaisen kestopäätitehtokoneen välipiiriin regeneroitu teho tahti-induktanssin ja nopeuden funktiona, kun $\psi_{PM} = 0,8$ ja $i_s = 1$. Koneen magneettipiiriin rajoittama maksiminopeus rajoittuu punaiseen käyrään, jolloin invertterin virta kuluu kokonaisuudessaan d-akselin magnetointiin. Tällöin kone ei kykene tuottamaan enää vääntömomenttia. x-akselilla on koneen suhteellinen nopeus 0..4 pu ja y-akselilla tahti-induktanssi välillä $L_s = 0,3 \dots 0,7$ pu. Kestomagneetikäämivuon ollessa $\psi_{PM} = 0,8$ pu, koneen vastasähkömotorinen voima kasvaa loivemmalla kulmakertoimella kuin invertterin syöttämä jännite. Z-akselilta voidaan todeta, että syvällä kentänheikennyksessä tahti-induktanssi rajoittaa välipiiriin regeneroitua tehoa. Pienen tahti-induktanssin kone pystyisi teoreettisesti tuottamaan suuremman oikosulkutehon. Z-akselin tasoa mukaileva punainen käyrä esittää tahti-induktanssin vaikutusta kentänheikennysalueen pituuteen. Esimerkiksi koneella, jonka $L_s = 0,3$, suurin mahdollinen nopeus on noin $\omega_s = 2$ pu, jolloin kaikki invertterin virta kuluu demagnetointiin. Tarkastelussa tahti-induktanssi on rajattu arvoon $L_s = 0,7$ pu, jolla kone tuottaa negatiivisen magnetointivirran kadotessa $\omega_s = 4$ pu nopeudessa tehoa $P_e = 4,25$ pu välipiiriin päin.

AEF 032 ohjeistaa regeneraation talteenoton minimivaatimukseksi 15 prosentin jaksollista (10 s) sekä 3 prosentin jatkuvaa tehoa. Referenssiarvo lasketaan traktorin energiavaran nimellistehosta.

Tässä diplomityössä käsiteltiin ajomoottorin valintaa ja alustavaa sähkötekniistä mitoitusta sähkövetoisen traktorin taka-akselille. Järjestelmän etuakselistoa ei ole tarkasteltu, joten kahden eri moottorityypin välinen yhteensovittaminen ei sisältynyt työhön. Tarkastelussa huomattiin, että sekä epätahtikone että kestopagneettitahtikone ovat sähköisesti optimoitavissa traktorin ajomoottoriksi.

Taka-akselin ajomoottoriksi valikoitui lähinnä voimansiirron tiiviin integraatiotavoitteen johdosta kestopagneettitahtikone, joka sietää hyvin laajan varioinnin geometrisissa suhteissaan. Ohutkehäinen, varsin moninapainen PMSM mahdollistaa sisäänsä integroitavan vaihteiston, jollaista järjestelmää halutaan edelleen kehittää.

Ajomoottorin määrittelyn lisäksi vaihteiston välityssuhteen valinnalla on suuri merkitys, kun halutaan sovittaa yhteen kestopagneetikoneen kentänheikennysominaisuuksia ja traktorin vetovoiman keskeisiä toimintapisteitä. Tämä tarkastelu on vienyt suuren osan tähän työhön käytetystä ajasta.

Epätahtikone ei edullisesta kustannusrakenteestaan huolimatta ollut tarkastelussa asetettujen reunaehtojen puitteissa kilpailukykyinen. Vaikka traktorin taka-akselin topologiassa painotettiin koneen halkaisijaa pituuden sijaan, epätahtikoneen epäedullinen halkaisijan ja pituuden suhde yhdistettynä roottorin rajoituksiin sekä heikkoon hyötysuhteeseen matalilla pyörimisnopeuksilla pudottivat koneen valintaprosessista.

Nykyinen 6000 1/min pyörimisnopeusrajoite ei myöskään ollut eduksi epätahtikoneelle, jonka voisi puristaa pienempään kokoon lisäämällä koneen maksimipyörimisnopeutta esimerkiksi arvoon 15000..20000 1/min. Epätahtikone sietää hyvin korkeita pyörimisnopeuksia eikä sillä ole kestopagneettitahtikoneen tavoin kiinteä käännyvuota.

Suorituskyvyltään lähes vertailukelpoinen ja hinnaltaan edullinen epätahtikone voisikin olla oiva ratkaisu traktorin sähköiselle etuakselille. Myös traktorin nykyinen voimansiirron layout tukisi epätahtikoneelle tyypillistä konstruktiota.

Konetyyppejä valittaessa voidaankin nelivetoratkaisun kompromissiratkaisuna päätyä kahteen eri konetyypin. Markkinoilla on joitain edistyneitä propulsiojärjestelmiä, joissa on yhdistetty joko kestopagneettitahtikone tai kestopagneettiavusteinen synkronireluktanssikone ja epätahtikone eri akseleille. Näin voidaan hyödyntää kummankin moottorityypin parhaita puolia kuormituksen ja ajonopeuden mukaan.

Tällaista ratkaisua on hyödynnetty muun muassa Teslan 3- sekä uusimmassa S-mallissa. Nelivetoisen version ajomoottoreina toimivat integroitu kestopagneettivusteinen synkronireluktanssikone ja epätahtikone.

Työssä huomattiin, että mikäli sähkökoneen vakiovoalueen jatkuvasta vetovoimatavoitteesta tingittäisiin hieman ja traktorin siirtoajon maksiminopeutta laskettaisiin 40..50 km/h välille, olisi voimalinja olisi mahdollista rakentaa vektorisäädetyin SiC-invertterin kanssa ilman vaihdettavaa välitystä. Kiinteävälitteiseen voimansiirron ajomoottoriksi soveltuisi joko epätahtikone tai kestopagneettivusteinen synkronireluktanssikone (PMaSynRM).

Voimansiirtolinjan kokonaishyötysuhteen tarkastelu ei sisällynyt työhön. Mielekäs jatkotutkimuskohde olisi analysoida nelivetotraktorin suorituskykyä ja energiataloudellisuutta DLG-sykleissä, kun propulsiojärjestelmänä on epätahtikoneen ja kestopagneettitahtikoneen yhdistelmä.

SiC-invertterien kaupallisen läpimurron myötä toinen mielenkiintoinen jatkotutkimusaihe liittyy napakäämityn kestopagneettitahtikoneen tehotiheyden optimointiin. Sähkökoneen fyysistä kokoa voidaan pienentää lisäämällä napoja, mutta lisääntynyt napamäärä heijastuu korkeampana taajuutena. PM2-koneen 400 mm halkaisijaa olisi taka-akselin voimansiirron layoutin kannalta edullista pienentää esimerkiksi arvoon 360mm.

LÄHTEET

Aarniovuori, Lassi & Rasilo, Paavo & Niemela, Markku & Pyrhonen, Juha. 2016. Analysis of 37 kW Converter-Fed Induction Motor Losses. IEEE Transactions on Industrial Electronics. Issue 99. 9. ISSN 0278-0046 [Viitattu 12.03.2021].

ABB, Tekninen opas nro 1, Suora momentinsäätö. [Viitattu 06.02.2021]. Saatavissa: https://library.e.abb.com/public/fdba0b31a34b89d1c1256d280040b4ae/Tekninen_nopasnro1.pdf

AEF 030 RIG 1.0 High Voltage - Electric Power Interface. Tekninen ohje.

AEF 031 RIG 1.0 High Voltage - Safety Requirements. Tekninen ohje.

AEF 032 RIG 1_0 High Voltage - Logical and Operational Interface. Tekninen ohje.

AEF, 2021. Companies / institutions members of the AEF. [Viitattu 20.05.2020]. Saatavissa: <https://www.aef-online.org/membership/memberlist.html>

AGCO. Fendt X-Concept. [Viitattu 20.21.2020]. Saatavissa: <https://www.fendt.com/fi/3116>

AGCO. e100 Vario. [Viitattu 20.21.2020]. Saatavissa: <https://www.fendt.com/fi/e100-vario>

Amistat, 2020. 2nd Annual Hybridization and Electrification Forum 2020. Luentomateriaali.

Arkansaslivingmagazine, 2018. Meet the electric John Deere. [Viitattu 20.12.2020]. Saatavissa: <http://arkansaslivingmagazine.com/article/meet-the-electric-john-deere/>

Awan, Hafiz Asad Ali et al. "Optimal Torque Control of Saturated Synchronous Motors: Plug-and-Play Method." IEEE transactions on industry applications 54.6 (2018): 6110–6120. Web. [Viitattu 25.04.2021].

BBC, 2015. Volkswagen: The scandal explained [Viitattu 01.06.2021]. Saatavissa: <https://www.bbc.com/news/business-34324772>

BMW. The_new_BMW_iX3_Specifications [Viitattu 01.05.2021]. Saatavissa: <https://www.press.bmwgroup.com/global/article/attachment/T0314265EN/457881>

Boldea, I. & Nasar, S. A. (2002b), "Losses In Induction Machines". In I. Boldea, & S. A. Nasar, The Induction Machine Handbook. Boca Raton, FL: CRC Press. ISBN 0-8493-0004-5.

DieselNet, Nonroad Diesel Engines Emission Standards. [Viitattu 20.04.2021]. Saatavissa: <http://www.dieselnets.com/>. [Viitattu 02.01.2021]

DLG, 2019. DLG test report database. [Viitattu 24.05.2021]. Saatavissa

DOE, 2021. Timeline: The History of the Electric Car. [Viitattu 15.12.2020]. Saatavissa: <https://www.energy.gov/timeline/timeline-history-electric-car>

Elonen et al 1995. Elonen E., Alakukku L. & Koskinen P. Renkaiden vaikutus traktorin vetokykyyn ja maan tiivistymiseen. Vakolan tiedote 69/95. Maatalouden tutkimuskeskus, Maatalousteknologian tutkimuslaitos. Vihti 1995.

Fukami, T et al. "Steady-State Analysis of a Dual-Winding Reluctance Generator With a Multiple-Barrier Rotor." IEEE transactions on energy conversion 23.2 (2008): 492–498. [Viitattu 16.03.2021]

Goss, J - Motor Design Ltd. CWIEME Berlin 2018. [Viitattu 01.05.2021]. Saatavissa: <https://www.slideshare.net/cwiemeexpo/james-goss-motor-design-ltd>

Haapaniemi, M. 2016. " Traktorin sähköistysanalyysi virtuaalisimulaatiomallilla". Diplomityö. Lappeenrannan-Lahden Teknillinen yliopisto [Viitattu 10.5.2021]

Hinkkanen, M. 2018 Lecture material in course ELEC-E8402 Control of electrical drives and power converters

Industryresearch, 2019. GLOBAL NEODYMIUM MAGNET MARKET 2019 [Viitattu 10.05.2020]. Saatavissa: <https://www.industryresearch.co/global-neodymium-magnet-market-14112894>

Ilioudis, V. C., Margaritis, N. I., 2010, "Flux Weakening Method for Sensorless PMSM Control Using Torque Decoupling Technique", Conf. Rec. IEEE, Thessaloniki, Greece, July 9-10, p. 32-39 [Viitattu 20.04.2021].

Immonen, P. 2008. " Hybridikäytön mitoitus liikkuvan työkoneen energian talteenottojärjestelmäksi". Diplomityö. Lappeenrannan-Lahden Teknillinen yliopisto [Viitattu 15.1.2021].

Immonen, Paula. 2013. Energy Efficiency of a Diesel-Electric Mobile Working Machine. Doctoral thesis. Lappeenranta-Lahti University of Technology. Department of Electrical Engineering [Viitattu 15.1.2021].

ISEA, 2019. Institute for Power Electronics and Electrical Drives (ISEA), RWTH Aachen 2019. Lecture Notes etc.

- iVT, 2019. John Deere develops fully electric autonomous tractor. [Viitattu 05.02.2020]. Saatavissa: <https://www.ivtinternational.com/news/agriculture/john-deere-develops-fully-electric-autonomous-tractor.html>
- Jahns et al. 1986. Interior permanent-magnet synchronous motors for adjustable-speed drives. IEEE Transactions on Industry Application, vol. IA-22, Issue 4. pp. 738–747 [Viitattu 16.03.2021]
- Jokinen, T. (1988). High-speed electrical machines. Conference on high speed technology, Lappeenranta, Finland, 1988, pp. 175-185 [Viitattu 04.03.2021]
- Jung, C. “Power Up with 800-V Systems: The benefits of upgrading voltage power for battery-electric passenger vehicles,” IEEE Electr. Mag., vol. 5, no. 1, pp. 53–58, Mar. 2017. [Viitattu 11.03.2021]
- Jussila, Hanne. Napakäämityn murtovakokestomagneettitahtikoneen suunnittelu. N.p., 2005. [Viitattu 10.02.2021]
- Kim J.-M. ja Sul S.-K. 1997a. Speed control of interior permanent magnet synchronous motor drive for the flux weakening operation. IEEE Transactions on Industry Applications, vol. IA-33, Issue 1. pp. 43–48. [Viitattu 25.04.2021].
- Kim J.-S. ja Sul S.-K. 1997b. New approach for high-performance PMSM drives without rotational position sensors. IEEE Transactions on Power Electronics, vol. PE-12, Issue 5. pp. 904–911. [Viitattu 16.03.2021]
- Koneviesti, 2021. Koneviestin Traktorivertailu 2021: Seitsemän 120-hevosvoimaista etukuormaintraktoria tarkassa syynissä [Viitattu 24.15.2021]. Saatavissa: <https://www.koneviesti.fi/traktorit/artikkeli-1.1345662>
- Käytännön Maamies. Tehoilla isottelua. [Viitattu 20.12.2020]. Saatavissa: <https://kaytanonmaamies.fi/wp-content/uploads/2014/04/Isottelua.pdf>
- Lajunen, Antti et al. “Overview of Powertrain Electrification and Future Scenarios for Non-Road Mobile Machinery.” Energies (Basel) 11.5 (2018): 1184–. Web [Viitattu 19.04.2021]
- Luk et al., 2020. Low-cost high-performance ferrite permanent magnet machines in EV applications: A comprehensive review. eTransportation. 6. [Viitattu 19.04.2021]

Maaseudun Tulevaisuus. Traktorien tehot nousevat. [Viitattu 20.12.2020]. Saatavissa: <https://www.maaseuduntulevaisuus.fi/maatalous/traktorien-tehot-nousevat-kun-maatilojen-koko-kasvaa-1.71396>

Maaseudun Tulevaisuus. Ensimmäinen sähköllä vetävä maataloustraktori näki päivänvalon. [Viitattu 10.05.2021]. Saatavissa: <https://www.maaseuduntulevaisuus.fi/maatalous/artikkeli-1.511730>

Mohammad Gerami Tehrani. 2019. Mechanical design guideline of an electric vehicle powertrain. Doctoral thesis. Lappeenranta-Lahti University of Technology. Department of Electrical Engineering [Viitattu 10.4.2021]

Montonen, Juho. 2017. Integrated hub gear motor for heavy-duty off-road working machines - interdisciplinary design. Doctoral thesis. Lappeenranta-Lahti University of Technology. Department of Electrical Engineering [Viitattu 20.12.2020]

Moreda, G.P, M.A Muñoz-García, and P Barreiro, 2016. “High Voltage Electrification of Tractor and Agricultural Machinery – A Review.” Energy conversion and management 115 (2016): 117–131. Web. [Viitattu 20.04.2021]

Nerg, J. 2020 Lecture notes in course Numerical methods in electromagnetism.

NH, 2009. New Holland NH2 Hydrogen-Powered Tractor. [Viitattu 01.06.2021]. Saatavissa: https://www.tractordata.com/news/2009/02/new_holland_nh2_hydrogen_tractor.html

Nobili, 2020. Nobili E-sprayer. [Viitattu 26.02.2021]. Saatavissa: https://www.nobili.com/userfiles/News/files/Nobili_Electric_2020.pdf

Pyrhönen, J. 1999 Sähkökäytöt luentomoniste. LTKK

Pyrhönen, J. 2019 Lecture notes in course Electrical drives.

Pyrhönen, J. 2020 Lecture notes in course Design of an Electrical Machine.

Pyrhönen, J., Jokinen, T. & Hrabovcovà, V. 2008. Design of Rotating Electrical Machines. Chichester: John Wiley & Sons, ISBN: 978-0-470-69516-6.

Pyrhönen, J., Jokinen, T. & Hrabovcovà, V. 2014. Design of Rotating Electrical Machines. Second Edition. Chichester: John Wiley & Sons, ISBN: 978-0-470-69516-6.



- Pyrhönen, J., Hrabovcová, V., Semken, S. 2016. Electrical Drives. Chichester: John Wiley & Sons, ISBN: 9781119260455
- Pyrhönen, J., Jokinen T., Hrabovcová V., Alexandrova, J. and Montonen, J., an analytical model for three-phase permanent magnet motor with rotor surface magnets, a two-phase integral slot winding and open-circuit cooling, published on the course “Design of an Electrical Machine”, 2019
- Pyrhönen, J., Jokinen T., Hrabovcová V., an analytical model for three-phase squirrel cage motor with a two-layer integral slot winding and totally enclosed fan cooling, published on the course “Design of an Electrical Machine”, 2019
- Pyökäri, Tauno. Sähkökoneoppi. 1971. Hki: Sininen kirja
- Rautiainen, M. 2018. " Tutkimus traktorin sähköisen etuakselin konstruktioista ja eduista". Opinnäytetyö. Jyväskylän Ammattikorkeakoulu [Viitattu 10.5.2021].
- Renius K.T. 1999 Renius K.T. Tractors: Two axle tractors. In Stout and Cheze, CIGR Handbook of Agricultural Engineering, Vol 3, p. 115 - 184. ASAE 1999. [Viitattu 11.03.2021]
- Renault Zoe, 2021. [Viitattu 18.02.2021]. Saatavissa: <https://www.greencarcongress.com/2015/03/20150304-zoe.html>
- Salminen, Pia. 2004. Fractional slot permanent magnet synchronous motors for low speed applications. Doctoral thesis. Lappeenranta-Lahti University of Technology. Department of Electrical Engineering [Viitattu 10.12.2020].
- Saren, H. 2001. "DTC-ohjatun tahtikonekäytön pyörimisnopeussäädön analyysi integroidun simulointimallin avulla". Diplomityö. Lappeenrannan-Lahden Teknillinen yliopisto [Viitattu 15.1.2021].
- SFS-EN ISO 16230-1:en Agricultural machinery and tractors. Safety of higher voltage electrical and electronic components and systems. Part 1: General requirements (ISO 16230-1:2015).
- Sekerak, P, V. Hrabovcova, J. Pyrhonen, S. Kalamen, P. Rafajdus, and M. Onufer, “Comparison of synchronous motors with different permanent magnet and winding types,” IEEE Trans. Magn., vol. 49, pp. 1256–1263, March 2013. [Viitattu 16.03.2021]

- Seufert et al 2002. Seufert H., Bernhardt H., Müller R, Klimek K. & Weise G. Running properties of different trailer tyres. Landtechnik 6/2002, p. 356 - 358. [Viitattu 12.04.2021]
- Sirviö, A. 2021. Stator winding topologies of permanent magnet traction motors. Master's thesis. Lappeenranta-Lahti University of Technology. Department of Electrical Engineering [Viitattu 10.12.2020].
- Soong W. L. and T. J. E. Miller, "Field-weakening performance of brushless synchronous AC motor drives," IEE Proc. Electr. Power Appl., vol. 141, no. 6, pp. 331–340, Nov. 1994. [Viitattu 20.04.2021].
- Soong W. L., "Design and modelling of axially laminated interior permanent magnet motor drives for field-weakening applications," Ph.D. dissertation, University of Glasgow, 1993. [Viitattu 16.03.2021]
- Thomas, R. L. Garbuio, L. Gerbaud and H. Chazal, "Modeling and design analysis of the Tesla Model S induction motor," 2020 International Conference on Electrical Machines (ICEM), 2020, pp. 495-501 [Viitattu 13.04.2021]
- Teinilä, T. 2009. "Hybridikäytön mitoitus liikkuvan työkoneen energian talteenottojärjestelmäksi". Pro gradu -tutkielma. Helsingin yliopisto [Viitattu 10.2.2021].
- Trading economics, 2020. Commodity prices. [Viitattu 6.12.2020]. Saatavissa: <https://tradingeconomics.com/commodity/neodymium>
- Troncon, Diego, and Luigi Alberti. "Case of Study of the Electrification of a Tractor: Electric Motor Performance Requirements and Design." Energies (Basel) 13.9 (2020): 2197–. Web. [Viitattu 18.04.2021]
- Valtra, 2018. Traktori on monipuolinen, tehokas ja taloudellinen työkone. [Viitattu 20.12.2020]. Saatavissa: <https://valtrateam.valtra.com/traktorit/traktori-on-monipuolinen-tehokas-ja-taloudellinen-tyokone/>
- VDI-MEG, LAND. TECHNIK 77th international conference on Agricultural Engineering. Conference material ISBN 978-3-18-0926361-1.
- Volkswagen. The electric drive in the Volkswagen ID.3 [Viitattu 10.05.2021]. Saatavissa: <https://www.volkswagen-newsroom.com/en/press-releases/in-brief-more-than-200-horres-in-a-sports-bag-the-electric-drive-in-the-volkswagen-id3-5541/download>

Vartanian, R., Deshpande, Y and H. A. Toliyat, "Performance analysis of a ferrite based fractional horsepower permanent magnet assisted SynRM for fan and pump applications," 2013 International Electric Machines & Drives Conference, 2013, pp. 1405-1410 [Viitattu 01.05.2021]

Wilson, D. 2011. Texas Instruments. TI Motor control compendium, 2011. [Viitattu 10.01.2021]

Özçelik, N. G., Doğru, U. E., Gedik, H., İmeryüz, M. and L. T. Ergene, "A multi-parameter analysis for rotor design of synchronous reluctance motors," 2016 XXII International Conference on Electrical Machines (ICEM), 2016, pp. 664-670 [Viitattu 01.03.2021]

	LUT Energia Sähkönkäyttötekniikan laboratorio Moottoriluettelo										
	Projekti Integrated electric machine								Pvm 22.12.2020		
	Asiakas Valtra Inc.								Rev		
									Status Alustava		
Nimellisarvo	PM1	PM2	IM1	PM3	PM4	IM2	PM5	Yksikkö	Huom		
Nimellisteho	125	125	125	125	125	125	125	kW			
Nimellisjännite	480	480	500	480	480	500	480	V (Y)	Tähtikytkentä		
Nimellistaajuus	167	333	100	433	333	100	100	Hz			
Maksimitaajuus	668 ⁽²⁾	1007 ⁽¹⁾	152 ⁽²⁾	916 ⁽²⁾	866 ^(1/2)	213 ⁽²⁾	298 ⁽¹⁾	Hz	(1) tie (2) vaihteenvaihto		
Nimellinopeus	1000	2000	2962	2600	2000	2962	2000	r/min			
Maksinopeus	4000 ⁽²⁾	6050 ⁽¹⁾	4500 ⁽²⁾	5500 ⁽²⁾	5200 ^(1/2)	6300 ⁽²⁾	5950 ⁽¹⁾	r/min	(1) tie (2) vaihteenvaihto		
Nimellisvirta	196,8	196,8	181,8	196,6	196,8	181,8	196,2	A			
Tyhjäkäyntijännite	222	222		222	222		222	V	Lähdejännite = 0.8 pu		
Tyhjäkäyntivirta	0	0	0	0	0	0	0	A			
Tehokerroin	0,79	0,79	0,82	0,79	0,79	0,82	0,79	pu			
Hyötysuhde	0,963	0,964	0,961	0,963	0,964	0,961	0,966	pu	Alustava nimellispisteen arvo		
Nimellinen tehokulma	43,7	43,4		43,4	44,5		42,9	deg			
Nimellisvääntömomentti	1194	598	401	459	598	404	598	Nm	Lähdejännite = 0.8 pu		
Maksimimomentti	1,51	1,48	2,4	1,51	1,48	3,0	1,6	pu	Nimellispisteessä		
Mitat											
Staattorin ulkohalkaisija	0,425	0,358	0,381	0,338	0,358	0,390	0,420	m			
Staattorin sisähalkaisija	0,335	0,275	0,206	0,255	0,275	0,222	0,274	m	Vaatii lisäksi roottorirungon		
Roottorin ulkohalkaisija	0,33	0,27	0,204	0,25	0,27	0,22	0,27	m			
Roottorin sisähalkaisija	0,285	0,231	0,068	0,209	0,231	0,093	0,188	m			
Staattorin pituus	0,2	0,15	0,202	0,13	0,15	0,215	0,140	m			
Vyyhdenpään pituus	0,03	0,025	0,080	0,02	0,025	0,080	0,075	m			
Kokonaistilavuus	0,0179	0,0103	0,0311	0,0083	0,0103	0,0332	0,0238	m ³	Akselia ei huomioida		
Massat											
Staattorin selkä	23,09	11,62	67,69	8,87	11,62	76,95	37,35	kg			
Staattorin hammas	29,47	17,51	24,99	14,61	17,51	25,30	17,93	kg			
Staattorikäämi	24,30	15,73	16,34	13,33	15,73	15,58	55,21	kg	Sisältää vyyhdenpäät		
Roottorin ies	18,62	9,19	14,16	6,92	9,19	18,85	24,25	kg			
Kestomagneetti	12,43	7,34		6,70	7,34		4,08	kg			
Roottorin hammas			9,30			6,02		kg			
Roottorikäämi			11,84			10,64		kg			
Roottorin inertia	0,763	0,267	0,19	0,18	0,267	0,29	0,489	kgm ²			
Koneen kokonaismassa	107,9	61,39	144,5	50,45	61,39	153,6	138,82	kg	Akselia ei huomioida		
Subteellisarvot											
kW/kg	1,2	2,0	0,9	2,5	2,0	0,8	0,9	kW/kg			
kW/l	6,97	12,14	4,02	15,02	12,14	3,76	5,25	kW/l			
€/kW	13,6	8,0	2,7	7,2	8,0	2,9	7,8	€/kW			
€/kg	15,7	16,4	2,4	17,9	16,4	2,3	7,0	€/kg			
kNm/m	2,81	1,67	1,05	1,36	1,67	1,04	1,42	kNm/m			
Raaka-ainekustannukset											
Staattorin selkä	58	29	169	22	29	192	93	USD	Cu	7,7	USD/kg ----->
Staattorin hammas	74	44	62	37	44	63	45	USD	Al	2,1	USD/kg ----->
Staattorikäämi	187	121	126	103	121	120	425	USD	Fe	2,5	USD/kg ----->
Roottorin ies	47	23	35	17	23	47	61	USD	Nd	450	USD/kg ----->
Kestomagneetti	1702	1006	0	917	1006	0	559	USD	B	0	USD/kg ----->
Roottorin hammas	0	0	23	0	0	15	0	USD	Nb	30	USD/kg ----->
Roottorikäämi	0	0	25	0	0	22	0	USD	Dy	250	USD/kg ----->
Kokonaiskustannus	1 699 €	1 005 €	342 €	901 €	1 005 €	360 €	972 €	EUR	Exc.	0,822	USD/EUR ----->
Huom											
1*Koneen rakenteellinen ylikuormitettavuus nimellispisteessä. Invertterin ylikuormitettavuutta ei huomioida											
2*Laskettu magneettipiirin ulkomittojen mukaan											
3*Arvio koneen maksiminopeudesta joko siirtoajossa tai vaihteenvaihdon yhteydessä											
4*Arvio koneen maksimitaajuudesta joko siirtoajossa tai vaihteenvaihdon yhteydessä											
5*Öljyjäähdytyksen suuttimet vaativat lisätilaa											

Taulukossa esitetty data on luonteeltaan alustavaa ja muuttuu määrittelyjen tarkentuessa.