

18. SÄHKÖMOOTTORIKÄYTÖT

18.1. Moottorikäytön valinta ja mitoitus

ABB:n vakioitujen moottorikäyttöjen valintamahdollisuudet näkyvät taulukosta 18.1a. Erikoistapauksissa käytetään muita moottorikäyttöratkaisuja.

Taulukko 18.1a. Vakioidut moottorikäytöt.

Moottorityyppi	Tehoalue kW	Nopeuksia	Syöttö
Oikosulkumoottori	0,1...1000	Yksi	Suora pienjännitelähtö
	200...8000	Yksi	Suora suurjännitelähtö
	0,4...500	Kaksi	Napavaihtolähtö pienjännitteellä
	0,4...1500	Säädettävä	Pienjännitetajuusmuuttaja
	1500...8000	Säädettävä	Suurjännitetajuusmuuttaja
Liukurengasmoottori	200...900	Yksi	Suora pienjännitelähtö
	200...4500	Yksi	Suora suurjännitelähtö
	1000...4000	Säädettävä	Suurjännitelähtö +kaskadi
Tahtimoottori	1000...20000	Yksi	Suora suurjännitelähtö
	1000...15000	Säädettävä	LCl suurjännitteellä
	1000...25000	Säädettävä	Syklokonvertteri suurjännitteellä

Teho, vääntömomentti ja pyörimisnopeus

Moottori teholla P ja pyörimisnopeudella n kehittää vääntömomentin T_m .

$$T_m = 9,55 \cdot 10^3 \frac{P \text{ [kW]}}{n \text{ [r} \cdot \text{min}^{-1}]} \text{ [Nm]}. \quad (1)$$

Moottorin koko riippuu tarvittavasta vääntömomentista eli tehon ja pyörimisnopeuden suhteesta. Tämä seikka on omiaan tekemään sellaiset ratkaisut edullisiksi, joissa moottorin pyörimisnopeus on suuri. Työkoneen pyörimisnopeuden poiketessa moottorien standardipyörimisnopeuksista on useimmiten edullista valita standardimoottori ja sopiva välitys.

Vastamomentti ja moottorin mitoitus

Moottori mitoitetaan työkoneen aiheuttaman vastamomentin eli kuormitusmomentin T_1 mukaan. Seuraavat vastamomentin riippuvuudet pyörimisnopeudesta ovat yleisiä

$T_1 = k n^2$. Vastamomentti kasvaa verrannollisena pyörimisnopeuden neliöön. Tällainen vastamomentti on esimerkiksi keskipakotuulettimilla ja -pumpuilla.

$T_1 = T_n$. Vastamomentti on vakio ja yhtä suuri kuin moottorin nimellismomentti. Tällainen vastamomentti on tyypillinen nostureille, kuljettimille ja lastuaville työstökoneille.

$T_1 = 0,2 \dots 0,5 T_n$ Vastamomentti on vakio, mutta pienempi kuin moottorin nimellismomentti. Tällainen vastamomentti esiintyy kompressoreilla, kun käynnistys on kevennetty tai työstökoneilla, kun käynnistys tapahtuu kuormittamattomana.

$T_1 = 1,0 \dots 2,5 T_n$, kun $n = 0$, mutta $T_1 < T_n$, kun $n > 0$. Usein esiintyy käyttötapauksia, joilla lepokitka on suuri, jolloin vaadittava irrotusmomentti on suuri. Esimerkkinä ovat erilaiset pyörivät uunit ja murskaimet.

$$T_1 = J \cdot \frac{\Delta n}{\Delta t}$$

Kun työkoneen hitausmomentti on suuri ja /tai vaadittava kiihdytysaika on lyhyt, voi hitauden aiheuttama vastamomentti nousta mitoitusta määrääväksi tekijäksi. Tällainen työkone on esimerkiksi paperikoneen kuivatusryhmä.

Käytännössä vastamomentti muodostuu usein edellisten yhdistelmistä ja on jaksollinen. Moottorin vastamomenttikäyrää konstruoitaessa on mahdollinen vaihteiston aiheuttama redusointi otettava huomioon.

Vastamomenttikäyrän perusteella voidaan laskea eri tilanteita vastaavat virrat ja näiden avulla edelleen moottorin terminen kuormitus. Moottoria valittaessa on lisäksi otettava huomioon, että:

- usein kannattaa jaksolliselle vastamomentille valita tälle käyttötavalle leimattu moottori ja että
- säädettävälle moottorille tuuletuksen heikkeneminen pienillä pyörimisnopeuksilla saattaa olla merkitsevä mitoitustekijä, mikäli ei käytetä erillistä jäähdytysilmapuhallinta.

Moottoria syöttävien laitteiden mitoitus

Moottorin syöttölaitteet mitoitetaan yleensä valitun moottorin nimellisvirran mukaan, usein niin, että moottorin vaihto seuraavaan vakiokokoon on mahdollista. Säädetyt moottorikäytön säätölaitteet perustuvat nykyisin useimmiten tehoelektroniikkaan. Yleensä tulee tarvittavien tehoelektronikkalaitteiden olla nimellisvirraltaan moottoria suurempia, koska niiden termiset aikavakiot ovat lyhyempiä kuin moottoreiden ja jaksollisen kuormituksen kuormitusvirtahuippu voi vahingoittaa niitä. Tehoelektronikkalaitteiden mitoituksen tulee siten perustua kuormitusvirran ajalliseen vaihteluun ottaen huomioon niiden termiset aikavakiot.

Suuritehoisen vaihtovirtamoottorin valintaperusteet

Prosessin tarpeet ovat moottorihankinnan ensisijainen syy, joten ne on täytettävä ensisijaisesti. Nämä tarpeet eivät aina ole yksiselitteisesti havaittavissa. Tästä johtuen niihin on tietoisesti kiinnitettävä huomiota.

Usein kannattaa hidasta työkoneetta käyttämään valita pyörimisnopeudeltaan hitaan moottorin sijasta nopea moottori esimerkiksi hammasvaihteen välityksellä kytkettynä. Tarkastelu on tehtävä tapauskohtaisesti. Suurten moottoreiden osalta rakenteet toisaalta vaikeutuvat pyörimisnopeuden kasvaessa. Tämä on omiaan tasoittamaan kustannuseroa. Edelleen on otettava huomioon nopeiden moottorien vaikeammat melu- ja laakerointiongelmien sekä suurempi huollon tarve. On myös muistettava, että suuret moottorit konstruoidaan usein vain yhteen suuntaan pyöriviksi, ellei työkone edellytä pyörimissuunnan vaihtoa.

Tehon määrittämisessä tulee ottaa huomioon prosessin vaatima jatkuva teho ja kuormitustapa sekä kuormitusmomentin luonne, esimerkiksi sen mahdollinen nykivyys.

Koneen kotelointiluokkaa valittaessa on pienitehoisista moottoreista tuttu ripajäähdytteinen täysin suljettu rakenne edullinen n. 1000 kW tehoille asti. Moottorit voidaan valmistaa täysin suljettuiksi myös asentamalla moottoriin vesi- ilma tai ilma- ilma lämmönvaihdin. Toisaalta on huomattava, että nykyaikaiset eristysaineet kestävät hyvin kosteutta ja erilaisia syövyttäviäkin kaasuja, joten myös läpituuletetun moottorin valitseminen on mahdollista. Varustamalla tuuletusilma-aukot sopivilla suodattimilla estetään pölyn ja lian pääseminen moottorin sisään. Läpituuletettu moottori on suurilla tehoilla suljettua rakennetta halvempi ja kevyempi.

Suuritehoisen moottorin häviöt ovat n. 3...5 %. Tällaisen lämpötehon johtaminen ympäröivään huonetilaan saattaa vaikuttaa ilmastointijärjestelyihin tai johtaa esim. vesijäähdytteisen moottorin valintaan.

Ympäristötekijät on tarkoin otettava huomioon:

- lämpötila (alin lämpötila määritettäessä lämmitysvastusta),
- kosteus, värinä ja melu,
- käyttöpaikalla mahdollisesti esiintyvät syövyttävät kaasut ja höyryt ja
- vientitoimituksissa on tarkistettava moottoreille asetettavat lisävaatimukset, kuten asennuspaikan korkeus merenpinnasta, tropiikin vaatimukset, jne.

Prosessin moottorin ohjaukselle asettamat rajoitukset ja vaatimukset ovat tärkeä perustekijä.

Käyttäjän kannalta suuren moottorin hankinta ei ole irrallinen tapahtuma, vaan moottorin on sovittava entisiin järjestelmiin mahdollisimman hyvin. Seuraavat näkökohdat on otettava huomioon:

- moottorin jännite ja kytkentä valitaan syöttöverkon ja sen jännitteen mukaan ottaen huomioon käynnistykset,
- tarkastetaan muut samansuuruiset tai lähes samansuuruiset koneet, jolloin pieni ylimeritys voi tulla kysymykseen, jos siten säästytään uuden tyyppin tuomilta varaosilta ja samalla lisätään moottoreiden vaihtokelpoisuutta,
- määritetään moottorin rakenteeseen vaikuttavat suojalaitteet (Pt 100- elementit, differentiaalisuoja),
- moottorin asennusmitat ja -tapa valitaan, jotta vaihdettavuus saadaan käytettyä hyväksi,
- tarkistetaan käytössä esiintyvät, rakennevalintaan vaikuttavat aksiaalivoimat, esimerkiksi liukulaakerikoneessa voidaan toiseen päähän sijoittaa yksirivinen kuulalaakeri, menettelystä on aina ennakolta sovittava,
- sovitaan noudatettavat standardit,
- tarkistetaan moottorin korjausmahdollisuudet ja
- arvioidaan prosessin käyttötavat nyt ja tulevaisuudessa.

Moottorityypin valintaan ei ole mitään yksiselitteistä kaavaa, vaan se tapahtuu työkoneen asettamien vaatimusten ja aikaisempien kokemusten perusteella usein työkoneen valmistajan toimesta. Nopeat pumput ja puhaltimet (1500 ja 3000 r / min) ovat tyyppillisesti aluetta, jossa käytetään oikosulkumoottoria.

On monia käyttötapauksia, joissa tahtimoottori on totuttua oikosulkumoottoria edullisempi, joskus jopa ainoa ratkaisu. Nykyaikainen harjaton tahtimoottori apulaitteineen on käynnistämisen yksinkertaisuuden ja huollon kannalta verrattavissa oikosulkumoottoriin. Tahtimoottorin nopeus on vakio. Magnetoinnin pisyessä vakiona tahtimomentti pienenee jännitteeseen verrannollisesti. Täten tahtimoottori selviää oikosulkumoottoria paremmin jännitteenalenuksesta. Iskumagnetoinnin (hetkellisen ylimagnetoinnin) avulla moottori pidetään tahdissa, kun varaudutaan maksimimomenttia suurempiin kuormitushuippuihin.

Eräissä maissa käytetään suurina moottoreina vain ylimagnetoituja tahtimoottoreita, koska niillä voidaan kompensoida loistehoa huomattavastikin ilman, että moottorin kokoa joudutaan suurentamaan. Magnetoidessa moottoria siten, että $\cos \varphi \approx 1$, minimoidaan häviöt. Samalla vältetään oikosulkumoottoritapauksen vaatimat kondensaattoriparistot. Tasavermaisessa tilanteessa voidaan laskea, riittääkö tahtimoottorin parempi hyötysuhde korvaamaan suuremmat hankintakustannukset. Hyötysuhteen kasvaminen yhdellä prosenttiyksiköllä perustelee 20...25 % kalliimman hankintahinnan varsin laajalla tehoalueella.

Hitaat (alle 500 r/min), suuritehoiset tahtimoottorit ovat harjallisina yleisiä paperitehtaiden hiomoissa. Petrokemian teollisuuden megawattiluokkaiset kompressorikäytöt ovat vastavasti harjattoman tahtimoottorin ominaisia käyttöjä räjähdysvaarallisen ympäristön takia.

Suuritehoisimmat moottorit, yli 10 MW, ovat lähes aina tahtimoottoreita. Syynä on loisteho sekä se, että oikosulkumoottorin konstruointi näin suurelle teholle on vaikeampaa häkikäämitykseen tulevan suuren tehon takia. Tahtimoottoria käyttämällä voidaan mekaanisesti ratkaista helpommin eräät raskaat käyttötapaukset, kuten puuhakut ja suuret jauhimet.

Syöttöjännite.

Rakenneseikat rajoittavat pienjännitemoottorien tehon ylärajaksi n.1500 kW. Vaikka suurjännitemoottori sinänsä on pienjännitemoottoria kalliimpi, on otettava huomioon tarvittavan muuntajatehon, kojeistojen ja kaapeloinnin aiheuttamat kustannukset. Käytännössä ei yleensä esiinny alle 200 kW tehoisia moottoreita 6 kV jännitteellä, eikä alle 500 kW tehoisia moottoreita 10 kV jännitteellä. IEC-standardit suosittelevat alarajoiksi 200 kW 6 kV:lla ja 1000 kW 10 kV:lla. 10 kV on suurin käytössä oleva moottoreiden standardijännite.

Suurimpia moottoreita lukuun ottamatta moottori on sitä kalliimpi mitä suuremmalle jännitteelle se on tehty. Tämä johtuu vaikeammasta eristystekniikasta ja eristysten edellyttämästä suuremmasta tilasta. Tästä syystä myös pienitehoisen suurjännitemoottorin tehokerroin ja hyötysuhde tulevat suhteellisen alhaisiksi

Blokkimuuntajan käyttö saattaa olla edullista, kun on kyse yhdestä suuresta moottorista, jonka jännite on tällöin vapaasti valittavissa riippumatta laitoksen jännitteestä.

18.2. Pienjännitemoottorin liittäminen verkkoon

Sähkölaitoksella on oikeus määrätä yläraja verkkoonsa liitettävien moottoreiden teholle sekä antaa muita tarpeellisiksi katsomiaan ohjeita. On huomattava, ettei ole syytä soveltaa näitä pienjänniteverkkoja koskevia ohjeita, kun kyseessä ovat oman muuntajan kautta yleiseen suurjänniteverkkoon liitetyt (teollisuus) verkot. Tällaisissa verkoissa on suuretkin oikosulkumoottorit käynnistettävä ensisijaisesti suoraan verkkoon.

Rakennusten sähköasennuksia koskevat tekniset urakoitsijamääräykset suosittelevat pienjännitekuluttajille seuraavia ohjeita.

Pienjännitekuluttajien moottoreiden käynnistysvirta ei saa saavuttaa niin suuria arvoja, että ne vaikuttavat häiritsevästi valaistukseen tai muihin pienjännitekuluttajien verkkoon liitettyihin kojeisiin. Tämä ehto katsotaan yleisesti täytetyksi, mikäli pienjännitemoottoria suojaavan hitaan sulakkeen nimellisvirta ei ylitä taulukon 18.2a arvoja.

Taulukko 18.2a. Pienjännitemoottoria suojaavan hitaan sulakkeen suurimmat sallitut nimellisvirta-arvot.

Pienjänniteverkon laatu	Moottorin vaiheluku	Moottoria suojaavan hitaan sulakkeen nimellisvirta A.	
		Usein käynnistettävät moottorit	Harvoin käynnistettävät moottorit
Avojohtoverkko	1 – vaihe	10	10
	3 – vaihe	10	25
Riippukierrejohtoverkko	1 – vaihe	16	25
	3 – vaihe	25	63
Kaapeliverkko	1 – vaihe	25	63
	3 – vaihe	63	125

Mikäli sähkölaitos sallii suurempien moottoreiden liittämisen verkkoon, se antaa tästä tietoja kysyttäessä. Samoin sähkölaitos ilmoittaa, mille verkon osille rajoitukset ovat yllä mainittua ankarammat. Poikkeuksista sähkölaitoksen määräyksistä on sovittava sähkölaitoksen kanssa tapauskohtaisesti.

Pienjännitemoottori liitetään verkkoon tarkoitukseen sopivilla liitäntälaitteilla, kuten moottorinsuojakytkimet, moottorinsuojakontaktorit, suunnanvaihtokytkimet, tähtikolmio-kytkimet, napaluvunvaihto-kytkimet jne.

18.3. Moottoreiden käynnistys

Moottorin käynnistys riippuu moottorin kehittämästä vääntömomentista T_m , kuormituksen aiheuttamasta vastamomentista T_1 , moottorin akselille redusoidusta hitausmomentista J_{tot} ja pyörimisnopeuden muutoksesta aikayksikössä eli kiihtyvyydestä dn/dt

$$T_m - T_1 = J_{tot} \cdot \frac{dn}{dt} \quad (2)$$

18.3.1. Oikosulkumoottorin käynnistysajan laskeminen

Kuormittamattoman moottorin käynnistysaika on moottorille ominainen vain verkkojännitteestä riippuva suure. Kun moottori, jonka vääntömomentin riippuvuus pyörimisnopeudesta tunnetaan on yhdistetty työkoneeseen, jonka vastamomentti ja hitausmomentti tunnetaan, voidaan käynnistysaika likimääräisesti laskea jakamalla käynnistysaika osiin, joilla voidaan olettaa momenttierotuksen $T_m - T_1$ pysyvän vakiona. Tänä aikana pysyy myös kiihtyvyyden vakiona. Edellä oleva yhtälö muunnetaan muotoon

$$\Delta t = 0,105 \cdot \frac{J_{tot} [\text{kgm}^2] \cdot \Delta n [\text{r} \cdot \text{min}^{-1}]}{T_m [\text{Nm}] - T_1 [\text{Nm}]} [\text{s}] \quad (3)$$

Esimerkki: Oikosulkumoottori, jonka nimellisteho on 75 kW ja pyörimisnopeus 1475 r/min käynnistää kompressorin, jolla on kuvan 18.3a mukainen vastamomenttikäyrä. Kompressorin pyörimisnopeus on 300 r/min ja hitausmomentti $J_1 = 32 \text{ kgm}^2$. Moottorin hitausmomentti on $J_m = 0,92 \text{ kgm}^2$.

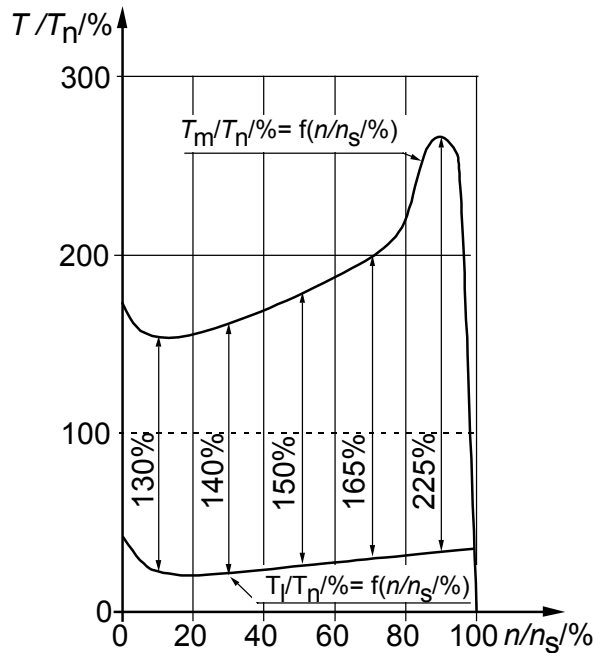
Mekaanisen välityksen hitausmomentti jätetään huomioon ottamatta. Moottorin nimellismomentti on

$$T_n = 9,55 \cdot 10^3 \cdot \frac{75}{1475} [\text{Nm}] = 485 [\text{Nm}]$$

Kompressorin hitausmomentti redusoidaan moottorin akselille ja lisätään moottorin hitausmomenttiin.

$$\left(\frac{n_1}{n_m} \right)^2 \cdot J_1 = \left(\frac{300}{1475} \right)^2 \cdot 32 [\text{kgm}^2] = 1,30 [\text{kgm}^2]$$

$$J_{tot} = J_m + J = 0,92 [\text{kgm}^2] + 1,30 [\text{kgm}^2] = 2,22 [\text{kgm}^2]$$



KUVA 18.3a. Momenttierotuksen $T_m - T_1$ riippuvuus pyörimisnopeudesta.

Kiihdytystapahtuma jaetaan viiteen 300 r/min käsittävään osa alueeseen ja kuvasta 18.3a voidaan lukea kiihdyttävä momenttierotus suhteessa nimellismomenttiin. Eri osa-alueiden kiihdytysajat ovat.

$$0 \dots 300 \text{ r/min} \quad \Delta t_1 = 0,105 \cdot \frac{2,22 \cdot 300}{1,3 \cdot 485} = 0,11 \text{ s}$$

$$300 \dots 600 \text{ r/min} \quad \Delta t_1 = 0,105 \cdot \frac{2,22 \cdot 300}{1,4 \cdot 485} = 0,10 \text{ s}$$

$$600 \dots 900 \text{ r/min} \quad \Delta t_1 = 0,105 \cdot \frac{2,22 \cdot 300}{1,5 \cdot 485} = 0,10 \text{ s}$$

$$900 \dots 1200 \text{ r/min} \quad \Delta t_1 = 0,105 \cdot \frac{2,22 \cdot 300}{1,65 \cdot 485} = 0,09 \text{ s}$$

$$1200 \dots 1475 \text{ r/min} \quad \Delta t_1 = 0,105 \cdot \frac{2,22 \cdot 275}{2,25 \cdot 485} = 0,06 \text{ s}$$

$$\text{Kokonaiskäynnistysaika } \Delta t = 0,11 \text{ s} + 0,10 \text{ s} + 0,10 \text{ s} + 0,09 \text{ s} + 0,06 \text{ s} = 0,46 \text{ s}$$

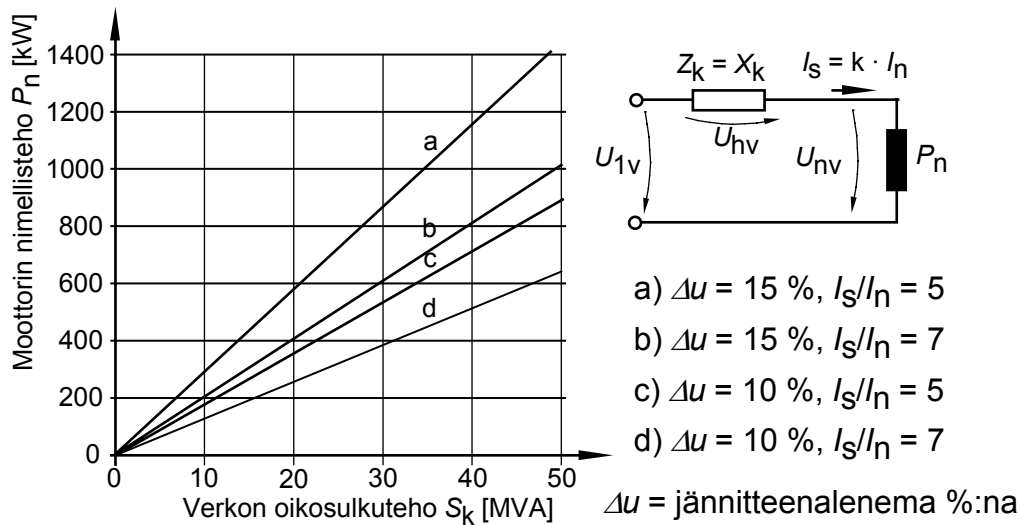
Useimmiten riittää käynnistysajan laskeminen esitetyllä tarkkuudella. Yleensä tarvitaan arvio käynnistysajan suuruusluokasta, jotta voitaisiin päätellä, onko vakimoottori tarkoitukseen sopiva ja onko ylivirtasuojausratkaisu oikea. Tavallisesti jäähtynyt vakimoottori kestää 6...8 s pituisen käynnistysajan. Suuri vastamomentti suuren hitausmomentin kanssa voi johtaa erikoisjärjestelyihin, erityisesti, jos moottoria on käynnistettävä usein.

18.3.2. Jännitteenalenema oikosulkumoottoria käynnistettäessä

Käynnistysvirta on moottorin käynnistysajan aikana ottama virta. Sen suuruus on jokaiselle oikosulkumoottorille ominainen arvo, joka on työkonesta riippumaton. Se pienentyy verkkojännitteen alentuessa, jolloin vastaavasti moottorin kehittämä vääntömomentti pienenee ja käynnistysaika pitenee. Käynnistysvirta on tavallisesti 5...7 kertaa moottorin nimellisvirta.

Käynnistys hetkellä saattaa käynnistysvirran ensimmäinen virtahuippu saavuttaa lähes $\sqrt{2} \cdot 2$ -kertaisen arvon. Käynnistysaikainen jännitteen alenema riippuu käynnistysvirrasta ja verkon oikosulkutehosta.

Jos halutaan rajoittaa käynnistyksessä syntyvä verkon jännitteen alenema ΔU , arvoon 10 % tai 15%, voidaan kuvasta 18.3b lukea suurin sallittu moottorin nimellisteho verkon oikosulkutehon funktiona, kun käynnistysvirran I_s suhde moottorin nimellisvirtaan I_n on 5 ja 7.



KUVA 18.3b. Verkon jännitteen alenema oikosulkumoottoria käynnistettäessä.

Usein voidaan ensiöverkkoa pitää jäykkänä, jolloin jännitteen alenema määräytyy pelkästään syöttävän muuntajan impedanssin mukaan. Suurin sallittu jännitteenalenema riippuu muuntajaan liitetyistä muista kuluttajista. Erikoisesti on otettava huomioon moottoreiden liitäntälaitteiden tarvitsemat apujännitteet.

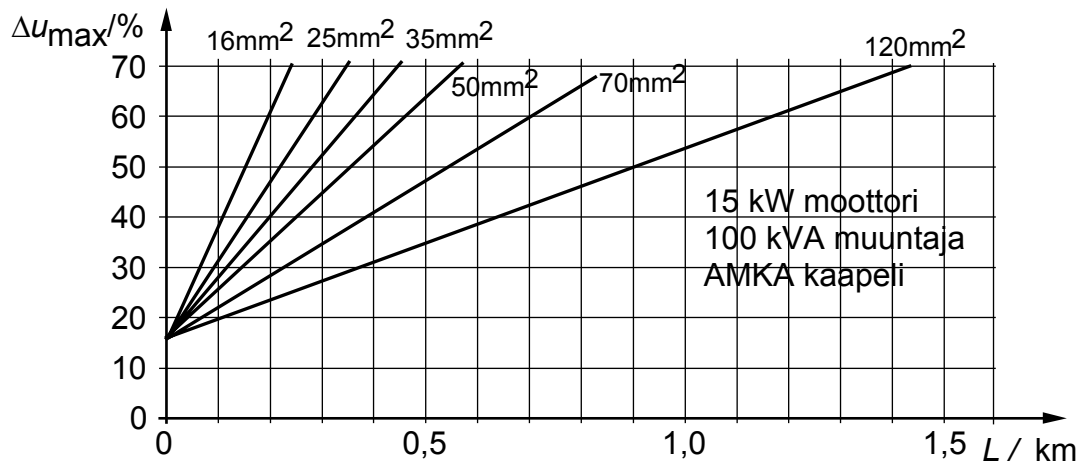
18.3.3. Tähti-kolmiokäynnistys

Käynnistysvirran aiheuttamaa jännitteen-alenemaa voidaan pienentää käyttämällä tähtikolmiokäynnistystä eli Y/D käynnistystä. Tällöin moottori käynnistetään käämien ollessa tähden kytkettynä ja kun nimellinen pyörimisnopeus saavutetaan, vaihdetaan kytkentä kolmioon.

Käynnistysvirta tähtikytkennässä on n. 30 % vastaavasta virrasta kolmiokytkennässä eli noin 1,5...2,1 kertaa kolmioon kytketyn moottorin nimellisvirta. Vastaavasti on käynnistysmomentti tähtikytkennässä 25 % siitä mitä se on kolmiokytkennässä, joten Y/D käynnistystä harkittaessa on vastamomentin suuruus käynnistettäessä tarkistettava.

Kun moottori irrotetaan verkosta tähtikytkennässä, ei käämien jännite häviä välittömästi moottorista, vaan se vaimenee aikavakiolla, joka on 0,1...0,3 s. Kun D-kontaktori jälleen kytkee moottorin verkkoon, saattavat pahimmassa tapauksessa verkkojännite ja moottorikäämien jännite olla vastakkaisvaiheisia ja suuri kytkentävirtapiikki esiintyy jakson parin aikana.

Jos D-kontaktorin kelajännite otetaan moottorin syötöstä, saattaa virtapiikki alentaa kelajännitettä niin paljon, että D-kontaktori päästää ja pumppaamista esiintyy. Tämä pumppaaminen on sopivilla vastatoimenpiteillä torjuttava. Verkkojännitteen kannalta tällä rnuutaman jakson kestäväällä ylimenoilmiöllä ei ole merkitystä siihen etuun verrattuna, mikä Y/D käynnistyksellä saavutetaan heikossa verkossa useita sekunteja kestävässä käynnistyksessä. Kuva 18.3c esittää moottoria käynnistettäessä syntyvät jännitteen alenemat verkossa, jota syöttää pieni muuntaja ja pitkäkö kaapeli.



KUVA 18.3c. Esimerkki heikossa verkossa syntyvistä jännitteen alenemista.

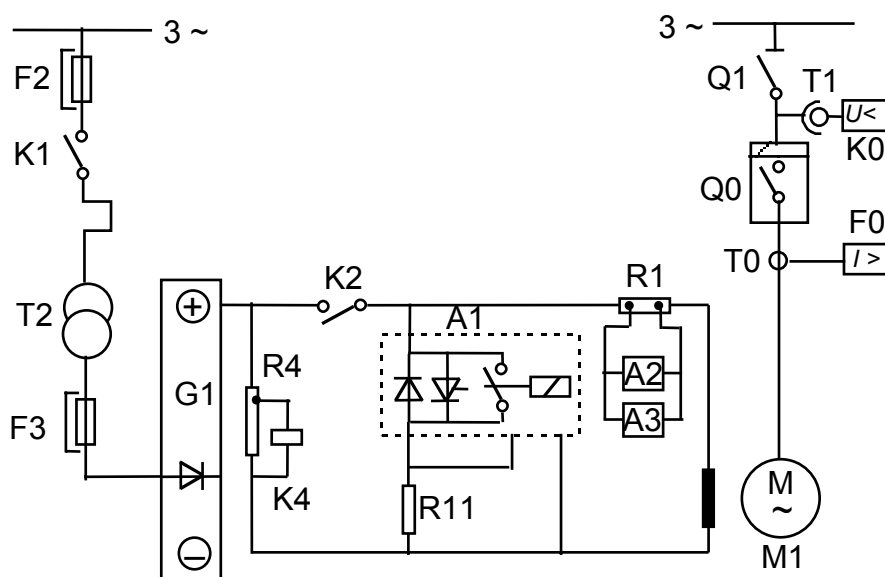
18.3.4. Tahtimoottorin käynnistys

Tahtimoottori käynnistetään periaatteessa oikosulkumoottorin tavoin napapyörän häkkikämmityksen tai massiivisten napojen antaessa käynnistysmomentin. Käynnistysvirta nimellijännitteellä on $3 \dots 6 \times I_n$ pienentyen suoraan verrannollisesti jännitteeseen.

Moottorin suora käynnistys verkkoon on laitteistoltaan yksinkertainen. Moottorin vääntömomentti on tällä käynnistystavalla suuri, mutta haittana on suuri käynnistysvirta. Kuva 18.3d on esimerkki suorasta käynnistyksestä vakioamagnetoinnilla.

Moottori M1 liitetään kiskoerottimen ja pääkatkaisijan kautta verkkoon. Ylivirtareleet F0 toimivat suojina ja katkaisijan nolajännitelaukaisu tai alijänniterele K0 estää käynnistykseen ja moottorin käytön alijännitteisessä verkossa. Magnetoimisteho otetaan omakäyttöverkosta diodisillalla G1, kontaktorin, muuntajan ja varokkeiden kautta. Valvontarele K4 laukaisee pääkatkaisijan Q0, kun asetettu magnetoimisjännite alitetaan.

Kenttäkatkaisijan K2 lisäksi magnetoimispiirissä on tyristorikytkin A1. Käynnistykseen ajaksi ohjataan diodin ja tyristorin rinnalla oleva kontaktori kiinni, jolloin magnetoimiskäämi muodostaa suojavastuksen R11 kanssa suljetun virtapiirin. Vastus R11 rajoittaa magnetoimispiirin jännitettä käynnistykseen aikana ja lisää käynnistysmomenttia lähellä tahtinopeutta.

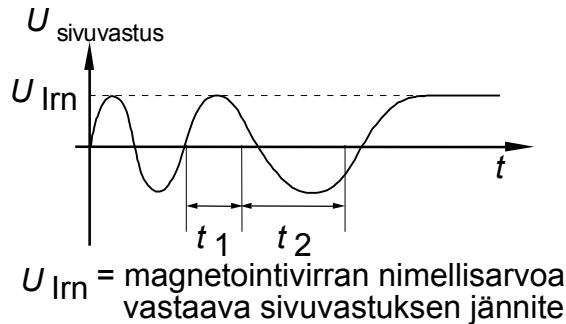


KUVA 18.3d. Tahtimoottorin suora käynnistys vakioamagnetoinnilla.

Normaalissa käyttötilanteessa tyristorikytkin ja vastus R11 toimivat magnetoimiskäämin ylijännitesuojana moottorin pudotessa tahdistusta tai kenttäkatkaisijan auetessa. Tällöin

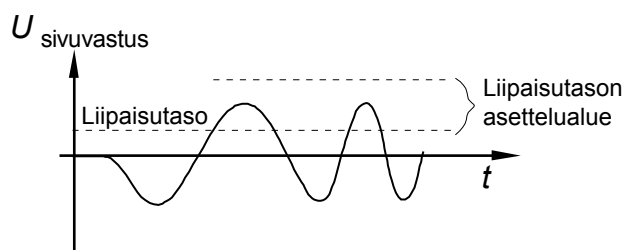
diodi sulkee virtapiiriin roottoriin indusoituneen jännitteen negatiivisella ja tyristori positiivisella puolilla.

Moottorin automaattinen käynnistys saa tapahtua, jos alijänniterele K0 on vetäenä ja suojalaitteilla on apujännite. Kontaktin K1 sulkeuduttua valvontarele K4 toteaa magnetointijännitteen riittävyyden ja ohjaa pääkatkaisijan Q0 kiinni. Käynnistysaikana tahdistus- ja tahdistaputoamisrele A2 tuntee roottorivirran taajuuden. Kun taajuus on pienentynyt alle viiveaikaa t_1 vastaavan taajuuden (kuva 18.3e), on nopeus riittävän lähellä tahtinopeutta ja tahdistus tapahtuu viiveajan t_2 kuluttua. Ajat t_1 ja t_2 on asetettu siten, että moottori saa kenttäkatkaisijan kytkiessä magnetoinnin suurimman tahtiin vetävän momentin, koska magnetoinnin kytkentähetki on oikea.



KUVA 18.3e. Tahdistus ja tahdistaputoamisreleen viiveajat.

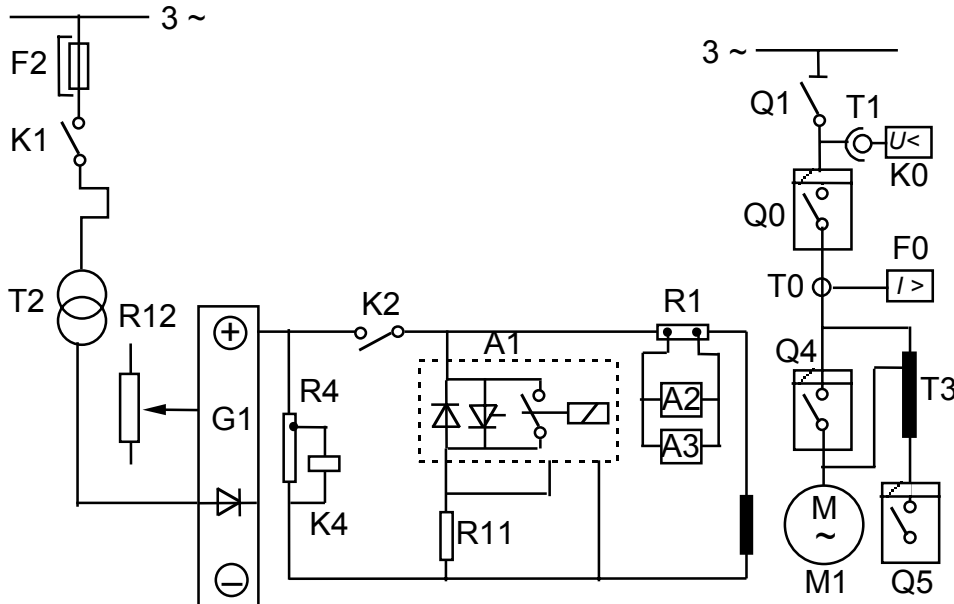
Tahdistus- ja tahdistaputoamisrele toteaa tahdistumisen. Jos moottori putoaa tahdistusta, toteaa tahdistus- ja tahdistaputoamisrele sivuvastuksen jännitteeseen ilmestyneen vaihtokomponentin. Tämän hetkellisarvon ylittäessä asetellun liipaisutason (kuva 18.3f) rele toteaa tahdistaputoamisen ja ylityksen toistuessa asetetun kertamäärän tapahtuu laukaisu. Moottori voi taten tahdistua uudelleen ennen laukaisua.



KUVA 18.3f. Tahdistus- ja tahdistaputoamisreleen liipaisutason asettelualue.

Erikoistapauksissa, kuten hakkumoottoreilla voidaan käyttää häkkikäymityksen suoja A3, joka suorittaa laukaisun, jos moottori lähtee käyntiin liian hitaasti, sen kokonaiskäynnistymisaika on liian pitkä tai moottoria on käynnistetty liian tiheästi. Muuntajakäynnistyksessä käynnistysvirta ja käynnistysmomentti pienenevät moottorin saaman jännitteen suhteessa. Tätä käynnistystapaa käytetään suurilla moottoreilla ja/ tai heikoissa verkoissa. Kuvassa 18.3g on esimerkki muuntajakäynnistyksestä, kun magnetoimisvirta on tyristoriohjattu.

Käynnistysmuuntajan T3 tähtipistekatkaisija Q5 on käynnistysalussa kiinni. Moottori saa pääkatkaisijan sulkeutuessa muuntajan muuntosuhteen edellyttämän jännitteen. Pyörimisnopeuden saavutettua lähes tahtinopeuden aukeaa tähtipistekatkaisija ja muuntajan käämit toimivat kuristimina. Moottori saa edellistä suuremman jännitteen. Lopuksi sulkeutuu katkaisija Q4 ja moottori saa täyden kiskojännitteen.



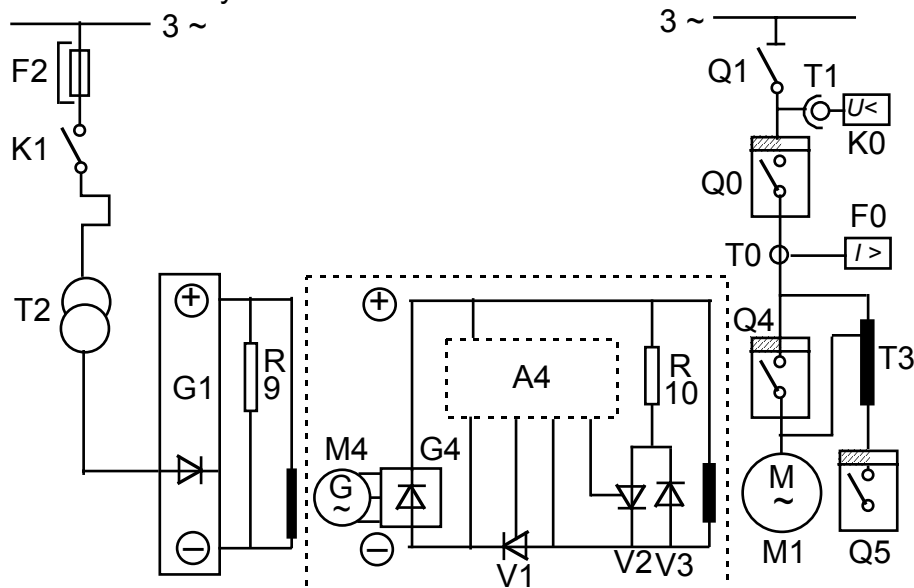
KUVA 18.3g. Tahtimoottorin muuntajakäynnistys, jossa on aseteltava magnetointi.

Magnetoimisvirta on aseteltavissa tyristoriohjauksen avulla. Magnetoimisvirran suuruus asetellaan vastuksella R 12. Kuvan 18.3d tapauksen käynnistysehtojen lisäksi tulee nyt vastuksen R 12 olla maksimimagnetoimisvirtaa edellyttävässä asennossa sekä tähtipistekatkaisijan Q5 kiinni. Muuntaja on kytketty vain käynnistysajan, eikä se heikennä hyötysuhdetta käyttötilanteessa. Magnetoinnin järjestely on staattorin syötöstä riippumaton ja magnetointi voi muuntajakäynnistyksessäkin olla vakio kuten kuvassa 18.3d.

Käynnistyskuristimen käyttö on eräs tapa pienentää käynnistysvirtaa pienentämällä moottorin napajännitettä. Verkon virta pienentyy jännitteen suhteessa ja käynnistysmomentti jännitteen neliöön verrannollisena.

Blokkimuuntaja, jota käytetään sovittamassa jännitettä, voidaan mitoittaa käynnistysajan asettamien vaatimusten mukaan.

Harjattoman tahtimoottorin kytkennästä on esimerkki kuvassa 18.3h.



KUVA 18.3h. Harjattoman tahtimoottorin muuntajakäynnistys vakiomagnetoinnilla.

Erona harjalliseen moottoriin ovat magnetointikone M4 ja moottorin mukana pyörivät diodisilta G4, suojavastus R10 sekä kenttäkatkaisijaa vastaava kytkintyristori V1 ohjauspiireineen A4. Kun roottorivirran taajuus on riittävän pieni, sytytetään tyristori V1.

Magnetoimisjännite on kuvassa 18.3h vakio, mutta säädettävyyden järjestäminen tyristorisillan avulla on halvempaa kuin harjallisella moottorilla, koska tarvittavan tyristorisillan teho on pieni.

18.4. Säädettävät vaihtosähkömoottorikäytöt

18.4.1. Oikosulkumoottorin nopeudensäätö, taajuusohjattu oikosulkumoottorikäyttö ja standardimoottorin ominaisuudet

Oikosulkumoottori on yleisin teollisuudessa käytetty sähkömoottori. Tämän valta-aseman saavuttamiseen ovat vaikuttaneet moottorityypin erinomaiset ominaisuudet, joista tärkeimmät ovat:

- Yksinkertainen ja vankka rakenne. Käyttäjän kannalta tämä merkitsee halpaa hankintahintaa ja korkeaa luotettavuutta.
- Hyvä hyötysuhde ja pienet huoltokustannukset. Käyttökustannukset muodostuvat alhaisiksi.
- Soveltuvuus vaativiin ympäristöolosuhteisiin.

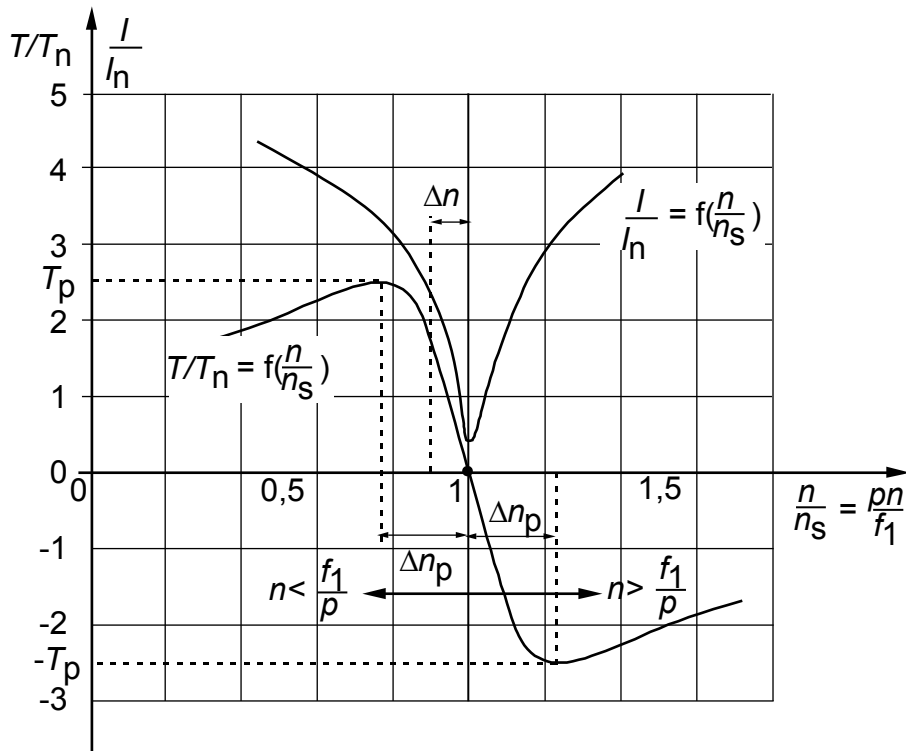
Oikosulkumoottorit ovat epätahtikoneita, joiden pyörimisnopeus riippuu kuormittavasta vääntömomentista. Pyörimisnopeudelle n voidaan kirjoittaa yhtälö

$$n = \frac{f_1}{p} - \Delta n = n_s - \Delta n \quad , \quad (1)$$

jossa f_1 = syöttötaajuus,
 p = moottorin napapariluku,
 Δn = absoluuttinen jättämä,
 $n_s = f_1/p$ = tahtinopeus.

Kun moottoria syötetään vakiona pysyvällä jännitteellä ja taajuudella, eikä lämpötilan vaihteluita oteta huomioon, riippuu syntyvä vääntömomentti vain jättämästä Δn (kuva 18.4a). Positiivisella jättämällä oikosulkukone toimii moottorina ja negatiivisella jättämällä generaattorina. Pyörimissuunta vaihdetaan muuttamalla syöttävän jännitteen vaihejärjestystä.

Myös oikosulkumoottorin ottama vaihevirta riippuu samojen oletusten ollessa voimassa pelkästään jättämästä. Tahtinopeudella pyörivä moottori ottaa verkosta vain magnetointivirran. Kun jättämä kasvaa nolasta kumpaankin suuntaan tahansa, virta alkaa kasvaa voimakkaasti.



KUVA 18.4a. Tyypilliset oikosulkumoottorin vääntömomentit T ja virta I , kun syöttöjännite ja taajuus f_1 ovat vakioita.

Standardioikosulkumoottoreiden huippumomentti on 2...3-kertainen jatkuvasti sallittavaan vääntömomenttiin eli nimellisvääntömomenttiin verrattuna. Positiivinen ja negatiivinen huippumomentti syntyvät moottorin sähköisistä arvoista riippuvilla jättämällä $\pm \Delta n_h$. Oikosulkumoottorin tehokas käyttö edellyttää jättämän pitämistä pienenä kapealla alueella $-\Delta n_h \dots + \Delta n_h$.

Tästä syystä oikosulkumoottorin pyörimisnopeuden ohjaus toteutetaan parhaiten taajuutta portaattomasti muuttamalla. Nimellisjättämä on tavallisesti 1... 4 % nimellinopeudesta ja riippuu lähinnä moottorin koosta (taulukko 18.4a).

Taulukko 18.4a. Tyypillisiä arvoja eri tehoisille 4-napaisille 400 V oikosulkumoottoreille.

Nimellisteho kW	5,5	37	90	200
Nimellinopeus r/min	1450	1480	1483	1486
Nimellisjättämä %	3,3	1,3	1,1	0,9
Jännitehäviö staattoriresistanssissa V	13,0	4,6	3,3	2,2
Vääntömomentin muutoksen aikavakio ms	14	41	59	89

18.4.2. Oikosulkumoottori taajuusohjattuna

Taajuusmuuttajakäytöissä käytetään oikosulkumoottoria tavallisesti huippumomenttien välisellä alueella.

Moottorin yksivaiheisesta sijaiskytkennästä (kuva18.4b) voidaan laskea momentille T , huippumomentille T_h ja sitä vastaavalle jättämälle Δn_h lausekkeet. Seuraavassa oletetaan, ettei vaihevirran I_1 , suuruus vaikuta jännitteeseen U_δ .

$$T = 3pU_{\delta v}^2 \cdot \frac{R'_2}{\omega_1 \cdot \left[\left(\frac{R'_2}{s} \right)^2 + X'_{2\sigma 0}{}^2 \right]} \cdot \frac{1}{s} = U_1^2 p \cdot \frac{R'_2}{\omega_1 \cdot \left[\left(\frac{R'_2}{s} \right)^2 + X'_{2\sigma 0}{}^2 \right]} \cdot \frac{1}{s}, \quad (2)$$

jossa $U_{\delta v}$ = ilmapäälivaihejännite,
 U_1 = syöttöjännitteen pääjännite,
 ω_1 = syöttöjännitteen kulmanopeus,
 p = napapariluku,
 s = suhteellinen jättämä,
 R'_2 = roottoriin redusoitu vaiheresistanssi ja
 $X'_{2\sigma 0}$ = roottoriin redusoitu vaihereaktanssi suhteellisen jättämän s arvolla 1.

Moottorin huippuvääntömomentti T_h ja sitä vastaava jättämä s_h voidaan laskea yhtälöstä.

$$T_h = \frac{pU_1^2}{2\omega_1 X'_{2\sigma 0}}, \quad (3)$$

$$s_h = \frac{R_2}{X_{2\sigma 0}}. \quad (4)$$

Yhtälössä (4) resistanssi ja reaktanssi ovat redusoimattomia, todellisia roottorikäänin arvoja.

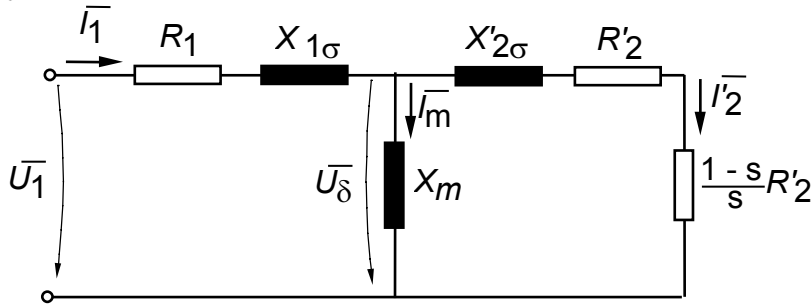
Vakiovoalue

Kun halutaan moottorin ominaisuuksien pysyvän samanlaisina taajuuden muuttuessa, tulee moottorin momenttikäyrän säilyä muodoltaan muuttumattomana. Momenttikäyrän määrittelevät huippumomentti T_h ja huippujättämä Δn_h , jota vastaa suhteellinen jättämä s_h . Nämä pysyvät vakiosuuruisina, jos moottorin ilmapäälivuo (U_δ / ω_1) pidetään samana eri taajuuksilla ja kuormituksilla. Sijaiskytkennässä tämä merkitsee magnetointivirran I_m pitämistä vakiosuuruisena.

Vakiovoalueella, joka jatkuu nolanopeudesta nimellisnopeuteen, ilmapäälivuo pyritään pitämään vakiona. Suurella osalla alueesta tähän päästään pitämällä syöttöjännitteen U_1 ja taajuuden f_1 suhde vakiona. Tavallisesti moottorin nimellistaajuudella f_n liitinjännite säädetään nimelliseksi U_n ja suhde on siten määrätty. Tällä suhteella moottori antaa pienimmillä tehohäviöillä parhaan vääntömomentin.

Pienillä syöttötaajuuksilla kuluttaa staattori-resistanssi R_1 (kuva 18.4b) merkittävän osan syöttöjännitteestä. Tällöin ilmapäälivuo U_δ jää haluttua pienemmäksi Resistanssin R_1 vaikutus voidaan kompensoida nostamalla pienillä taajuuksilla syöttöjännitettä lineaarisen U_δ / f_1 käyrän yläpuolelle (kuvat 18.4c). Tarvittava kompensointi, ns. IR-kompensointi, on sitä pienempi, mitä suurempi moottori on kyseessä (taulukko 18.4a). Toisaalta kompensointi on hyvä tehdä riippuvaiseksi kuormituksesta. Jos vääntömomentin tarvetta ei ole, jännitettä ei kannata nostaa.

Vakiovuolla toimittaessa kutakin vääntömomenttia vastaa taajuudesta riippumatta aina sama vaihevirta. Sijaiskytkennässä magnetointivirta I_m ja roottorivirta I'_2 ovat vakiosuuruisia. Lisäksi roottorivirralla on syöttötaajuudesta riippumatta sama vaihesiirto ilmajännitteeseen U_δ nähden.



KUVA 18.4b. Oikosulkumoottorin yksivaiheinen sijaiskytkentä.

R_1 = staattori-resistanssi,

R'_2 = staattoriin redusoitu roottori-resistanssi,

$X_{1\sigma}$ = staattorin hajareaktanssi,

$X'_{2\sigma}$ = staattoriin redusoitu roottorin hajareaktanssi,

X_m = magnetointireaktanssi eli pääreaktanssi,

I_1 = vaihevirta,

I_m = magnetointivirta,

p = moottorin napapariluku,

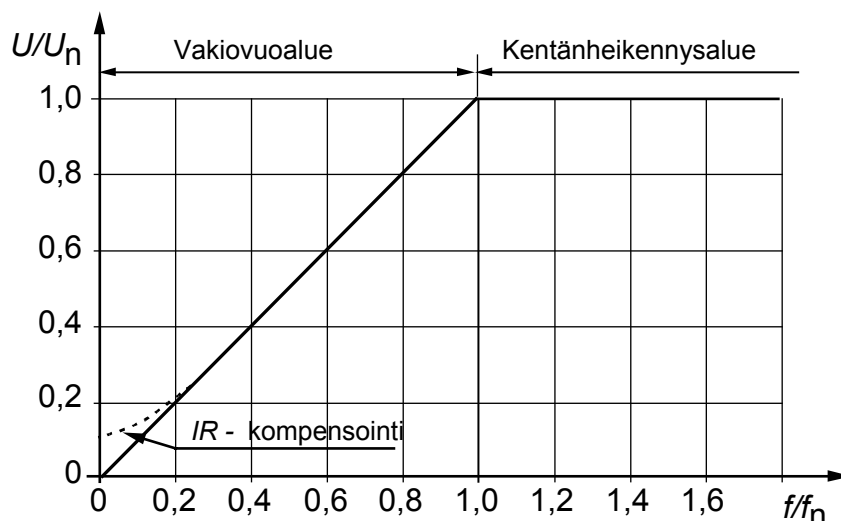
I'_2 = staattoriin redusoitu roottorivirta,

U_{1v} = vaihejännite,

U_δ = ilmajännite,

ω_1 = syöttöjännitteen kulmanopeus $2\pi f_1$,

ω_2 = roottorijännitteen kulmanopeus $2\pi p \Delta n = 2\pi f_2$,



KUVA 18.4c. Syöttöjännitteen ohjaus ja esimerkki IR-kompensoinnista.

Kentänheikennysalue

Nimellisaallon yläpuolella syöttöjännite pidetään nimellisenä (kuva 18.4c). Tästä johtuu että ilmajännite pienenee kääntäen verrannollisena taajuuteen. Huippumomenttia vastaava jättämä on sen sijaan lähes vakio. Momenttikäyrän madaltumisesta johtuen määrättyä

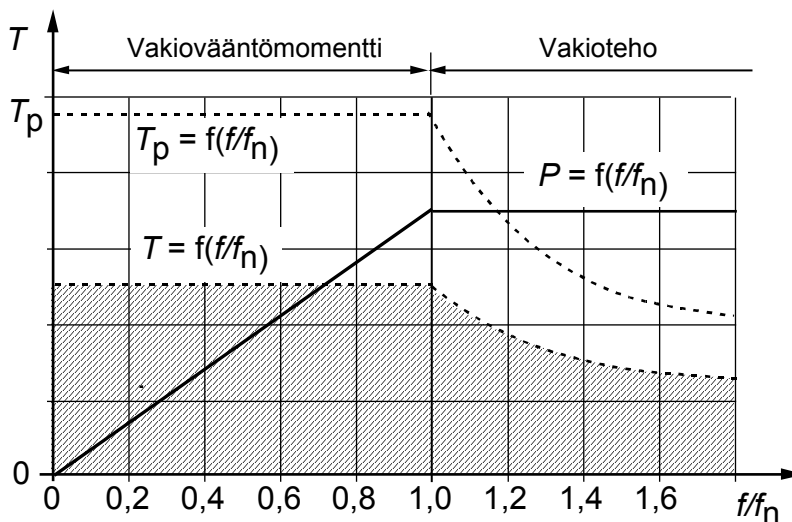
kuormitusmomenttia vastaava jättämä on kentänheikennysalueella suurempi kuin vakio-
vualueella.

Kentänheikennysalueella magnetointivirta I_m , alenee kääntäen verrannollisena taajuuteen. Tästä syystä kuormittamattoman moottorin vaihevirta laskee selvästi taajuuden mukana. Kuormitetussa moottorissa roottoriin tehokertoimen (kuva 18.4b) takia roottorivirralla I'_2 on taipumus kasvaa. Magnetointivirran pienentyminen ja roottorivirran kasvu vaikuttavat toisiaan vastaan. Vakiovirralla moottori kehittää siten kentänheikennysalueella likimain vakio-
tehon.

Kullekin moottorille ominaisella taajuudella ($n = 1,4 f_n \dots 1,6 f_n$) huippumomentti on laskenut niin alas, että saavutettavaa jättämää joudutaan rajoittamaan. Rajoituksen määrää kippaus-
vaara, eikä virran suuruus. Tällöin moottorista ei voida ottaa enää vakio-
tehoa.

Saavutettava vääntömomentti

Oikosulkumoottori käynnistetään parhaiten nostamalla taajuutta niin, että jättämä pysyy koko ajan huippujättämää pienempänä. Tällä tavoin irrotusmomentti on mahdollista saada nimellismomentin suuruiseksi ylivoimattamatta taajuusmuuttajaa. Tällainen käynnistys edellyttää, että taajuusmuuttajan minimitaajuus on 0,5...2 Hz käytetystä moottorikoosta riippuen ja että käytetään täydellistä IR-kompensointia.



KUVA 18.4d. Vakiovirralla moottorista saatava momentti ja teho.

Kun IR-kompensointia ei käytetä ja koneeseen voidaan syöttää vain nimellisvirran suuruinen virta, moottorin kehittämä käynnistysmomentti on standardimoottoreilla tavallisesti 45...55 % nimellismomentista. Saavutettavaan käynnistysmomenttiin ei tässä tapauksessa moottorin koolla tai lämpötilalla ole suurta vaikutusta.

Vakiovualueella suurimman momentin rajoittaa tavallisesti taajuusmuuttaja (kuva 18.4d). Jos taajuusmuuttaja ylivoimattamatta, saadaan moottorista nimellismomenttia suurempi momentti. Kun taajuusmuuttajan nimellisvirta on hieman suurempi kuin moottorin nimellisvirta, syntyvä vääntömomentti on likimain kaavan 5 mukainen:

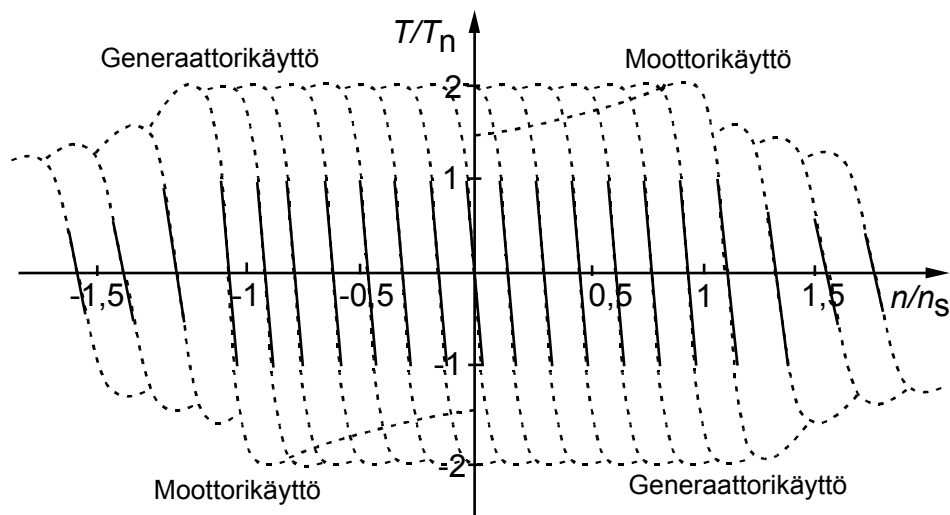
$$T = \frac{I_T}{I_{nm}} \cdot T_n, \quad (5)$$

jossa I_T = taajuusmuuttajan antama virta,
 I_{nm} = moottorin nimellisvirta ja
 T_n = moottorin nimellisvääntömomentti.

Jos moottorista halutaan ottaa huomattavasti nimellismomenttia suurempi vääntömomentti, tarvittavan virran ja taajuusmuuttajan suuruus ei ole yhtä helposti määritettävissä. Ensinnäkin moottorin induktanssit pienenevät voimakkaasti magneettipiirien kyllästymisen takia, jos moottoriin syötetään suuri ylivirta. Induktanssien pieneminen rajoittaa useiden taajuusmuuttajien kykyä antaa perusaaltovirtaa. Toisaalta pienemmän moottorin induktanssit ovat suuremmat kuin taajuusmuuttajan kokoluokkaa olevan moottorin.

Kaikissa tapauksissa on kuitenkin moottorin huippumomentti ylärajana suurimmalle sallitulle vääntömomentille. Kippausvaaran takia on lisäksi varattava tietty reservi. Nyrkkisääntönä voidaan pitää, että $2/3 \cdot T_n$ on suurin sallittu vääntömomentin yläraja. Huippumomentin T_n suuruus annetaan moottoriluetteloissa. Pitkäaikaisesti moottoria voidaan kuormittaa vain moottorin termistä kuormitettavuutta vastaavalla määrällä.

Taajuusohjattu oikosulkumoottorikäyttö voi, ellei puhallin ole esteenä, moottorin puolesta toimia neljässä kvadrantissa (kuva 18.4e). Siirtyminen generaattoripuolelle on joustavaa, koska magnetointivirran tai muun virran suuntaa ei tarvitse kääntää, vaan siirtyminen saadaan aikaan muuttamalla jättämä negatiiviseksi. Tämä merkitsee syöttötaajuuden alentamista pienemmäksi kuin todellinen pyörimisnopeus edellyttäisi. Pyörimissuunnan vaihto tehdään elektronisesti.



KUVA 18.4e. Oikosulkumoottorin momenttikäyriä taajuuden funktiona.

Jatkuvassa tilassa moottorin antama vääntömomentti riippuu jättämästä. Muutostilanteissa, esim. syöttötaajuuden kasvaessa äkillisesti ja pyörimisnopeuden pysyessä vakiona, momentti siirtyy uutta jättämää vastaavaan arvoon tietyllä moottorista riippuvalla aikavakiolla. Tämä aikavakio on sitä suurempi, mitä suurempi on moottorin nimellisteho.

Pyörimisnopeustarkkuus.

Useimmissa tapauksissa oikosulkumoottorin pyörimisnopeutta ohjataan ilman takometria. Näinkin päästään monesti riittävään nopeustarkkuuteen, koska oikosulkumoottorin momenttikäyrä on jyrkkä, ts. suurikaan kuormitusmomentin muutos ei aiheuta suurta muutosta jättämässä.

Jättämän takia todellinen pyörimisnopeus on taajuusmuuttajalla ohjattavaa tahtinopeutta f_1/p pienempi. Ohjauksen ja todellisen pyörimisnopeuden välinen erotus ($\Delta n =$ jättämä) riippuu mm. moottorin koosta, kuormituksesta ja käyntilämpötilasta. Tiettyä kuormitusmomenttia vastaava nopeusvirhe Δn nähdään moottorin momenttikäyrästä.

Kun kuormitusmomentti T_{mek} on huippumomenttiin nähden suhteellisen pieni, voidaan jättämää arvioida nimellisjättämän Δn_n ja nimellismomentin T_n avulla seuraavasti.

$$\Delta n = \Delta n_n \frac{T}{T_n}, \text{ kun } f \leq f_n, \quad (6)$$

$$\Delta n = \Delta n_n \frac{T}{T_n} \left(\frac{f}{f_n} \right), \text{ kun } f \geq f_n, \quad (7)$$

jossa Δn_n = nimellistaajuudella syötetyn moottorin tahtinopeuden ja nimellispyörimisnopeuden erotus,

f = syöttötaajuus.

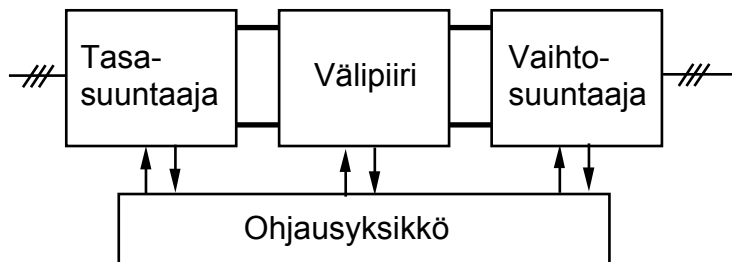
Nimellislämpötilassa olevan moottorin roottoriresistanssi R'_2 on noin puolitoistakertainen kylmän moottorin resistanssiin verrattuna. Tästä syystä kylmän moottorin jättämä on n. 60 % vastaavasta nimellislämpötilassa olevan moottorin jättämästä.

Parempaan pyörimisnopeuden tarkkuuteen pyrittäessä on käytettävä nopeuden mittausta tai säätöä. Säädetyissä käytöissä taajuusmuuttajakäyttö ei eroa merkittävästi esim. tasavirtakäytöstä. Säädön tarkkuuden määrää pääasiassa käytetty pyörimisnopeusanturi.

18.4.3. Taajuusmuuttajavaihtoehdot

Taajuusohjatuissa oikosulkumoottorikäytöissä käytetään välipiirillä varustettuja taajuusmuuttajia. Tällainen taajuusmuuttaja muodostuu kuvan 18.4f mukaisesti neljästä osasta.

Verkon puolella taajuusmuuttajan ensimmäisenä osana on tasasuuntaaja. Välipiirissä sen antama sykkivä tasajännite suodatetaan LC-alipäästösuodattimella tai muutetaan tasavirraksi tasoituskuristimella. Viimeisenä osana on vaihtosuuntaaja, joka muodostaa välipiirin tasasähköstä halutun taajuista vaihtosähköä. Ohjausyksikkö huolehtii taajuusmuuttajan tarkoituksenmukaisesta toiminnasta.



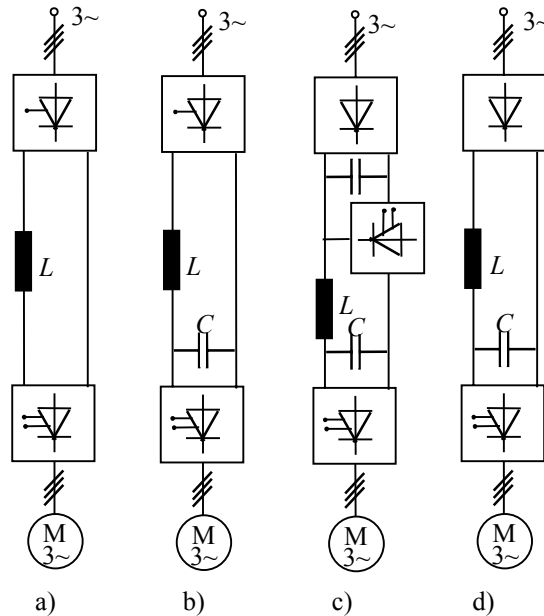
KUVA 18.4f. Taajuusmuuttajan lohkokaavio.

Välipiirin rakenteen perusteella taajuusmuuttajat jakautuvat kahteen päätyyppiin. Välvirtapiirin muodostuessa pelkästään tasoituskuristimesta taajuusmuuttajaa nimitetään tasavirtavälipiirillä varustetuksi (kuva 18.4g a). Tämä taajuusmuuttaja toimii virtalähteenä, joka syöttää moottoriin sellaisen virran, että moottorin navoissa on haluttu jännite. Virran amplitudi määrätään ohjatussa tasasuuntaajassa tai tasasähköpiiriin sarjaan kytketyllä tasavirtakatkojalla.

Tasavirtavälipiirillä varustettu taajuusmuuttaja on tarkoitettu yksittäismoottorikäyttöihin. Vaihtosuuntaajan toimintaperiaatteesta johtuen tämän taajuusmuuttajan käyttö kentänheikennysalueella vaatii erikoistoimenpiteitä. Lisäksi taajuusmuuttajaan kytkettävän moottorin nimellistehon tulee kuulua taajuusmuuttajan määräämälle kapealle tehoalueelle, koska moottorin käämitys kuuluu oleellisena osana taajuusmuuttajan kommutointipiireihin.

Taajuusmuuttajia, joiden välipiirissä on LC-alipäästösuodatin, kutsutaan tasajännitevälipiirillä varustetuiksi. Näissä taajuusmuuttajissa lähtöjännitteen amplitudia säädetään joko välipiirin jännitettä säätämällä (kuvat 18.4g b ja c) tai muuttamalla lähtöjännitteen pulssikuviota (kuva 18.4g d). Tätä pulssikuviota muuttamista kutsutaan pulssileveysmoduloinniksi

(PWM). Tasajännitevälipiirillä varustetut taajuusmuuttajat soveltuvat yksittäis- ja monimoottorikäyttöihin.



KUVA 18.4g. Taajuusmuuttajavaihtoehdot. a) Tasavirtavälipiiri, b) Ohjattu tasajännite, c) Tasajännitteen ohjaus katkojalla, d) PWM-taajuusmuuttaja

PWM-taajuusmuuttaja on yleiskäyttöisin esitetyistä vaihtoehdoista. Se eroaa ohjatulla tasajännitevälipiirillä varustetuista tyypeistä mm. verkkovaikutuksiansa ja säätönopeutensa suhteen.

Ohjatulla välipiirin tasajännitteellä varustetuissa taajuusmuuttajissa jännitteen säädön tapahtuessa välipiiri jännitettä säätämällä, jää säätönopeus huonoksi, koska jännitteen muuttuessa joudutaan varaamaan tai purkamaan välipiirin suurta kondensaattoria. PWM-taajuusmuuttajassa säätönopeus on suuri, koska jännitteen säätö tapahtuu vaihtosuuntaajassa. PWM-taajuusmuuttaja ottaa verkosta diodisiltansa ansiosta lähes yksinomaan pätötehoa. Taajuusmuuttajat, joissa jännitettä ohjataan syöttöverkkoon kytketyn verkkokommutoidun suuntaajan avulla, kuluttavat myös loistehoa.

18.4.4. PWM-taajuusmuuttajan verkko-ominaisuudet

Verkkovirta

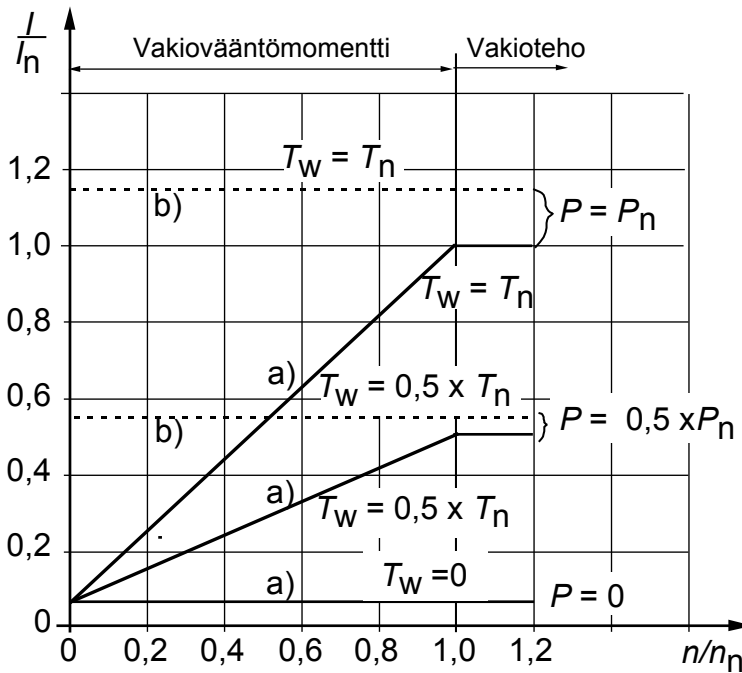
PWM-taajuusmuuttajissa välipiirin tasajännitteen suuruus on vakio. Normaalitapauksessa verkkoon liitetty tasasuuntaaja on diodisilta. Kiinteän välipiirijännitteen takia verkkovirran perusaallon tehollisarvo on suoraan verrannollinen moottorin ottamaan pätötehoon.

Vakiovastamomentilla pätöteho pienenee pyörimisnopeuden laskiessa suoraan verrannollisena pyörimisnopeuteen. Tällöin pienenee myös taajuusmuuttajan ottama verkkovirta, vaikka moottorin vaihevirta pysyykin vakiosuuruisena.

Tasasähkökäyttö ottaa suuremman verkkovirran kuin PWM-taajuusmuuttaja (kuva 18.4h), koska tasavirtakäytöissä:

- Nimellisaallon tasasuuntaajan jännite (440 V) on pienempi kuin diodisillan jännite (500 V).
- Pyörimisnopeuden laskiessa ja vääntömomentin pysyessä vakiona teho ja tasasuuntaajan jännite laskevat suoraan verrannollisina pyörimisnopeuteen.

Tällöin verkkovirta pysyy vakiona. PWM-taajuusmuuttajassa tasasuuntaajan jännite pysyy vakiona ja virta pienenee. PWM-taajuusmuuttajakäyttö selviää myös pienemmällä verkkovirralla kuin suoraan verkkoon kytketty oikosulkumoottori.



KUVA 18.4h. PWM-taajuusmuuttajan ottama verkkovirta, kun vastamomentti T_{mek} on nimellinen, puolet nimellisestä ja nolla. Vertailun vuoksi esitetään myös samaan suorituskäyttöön pystyvän tasavirtakäytön verkkovirta: a) PWM-taajuusmuuttaja b) tasasähkökäyttö.

Verkon yliaaltovirrat

Diodisilta on syöttöverkon kannalta epälineaarinen laite. Epälineaarisuus aiheuttaa taajuusmuuttajan verkkovirran säröytymisen. Perustaajuuden lisäksi verkkovirta sisältää f_n taajuiset yliaaltovirrat.

$$f_n = n \cdot f_0 = (6k \pm 1) \cdot f_0, \quad (8)$$

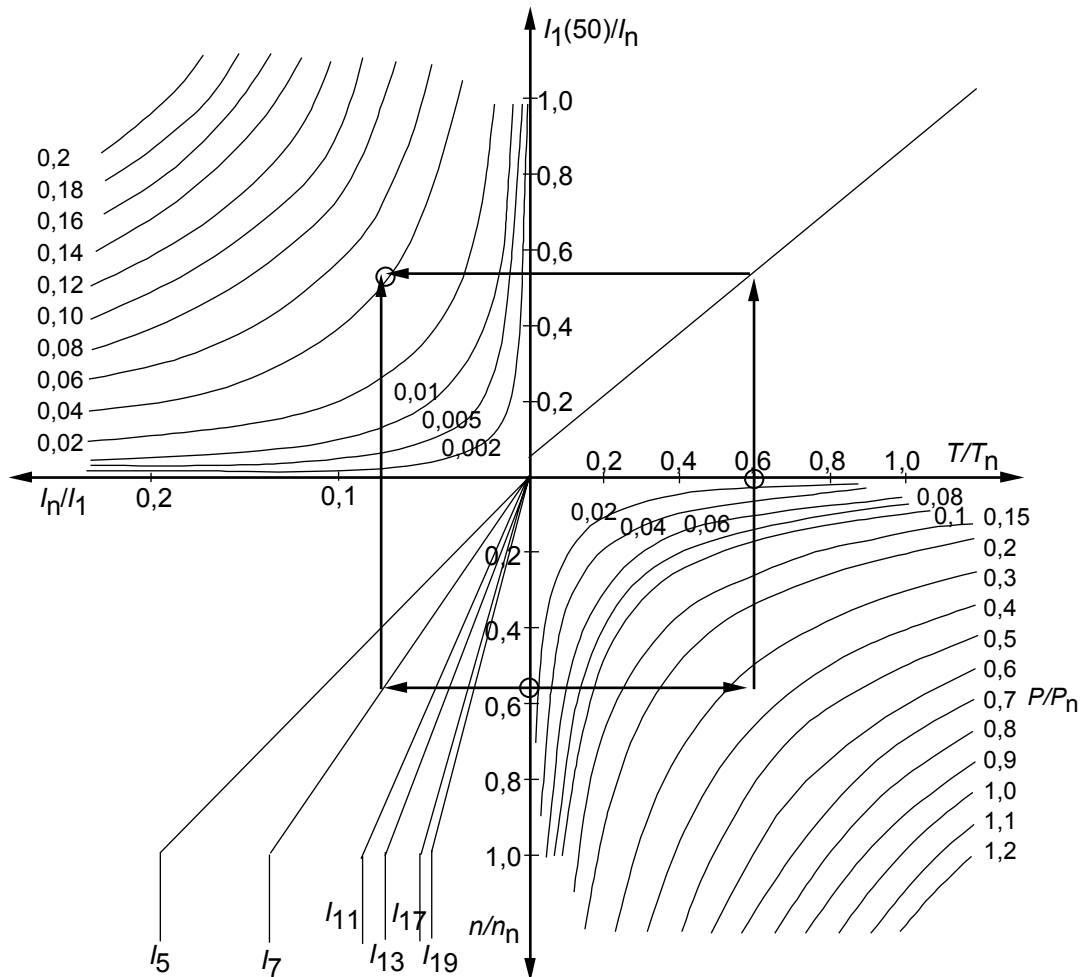
jossa f_n = yliaaltovirran taajuus,
 n = yliaallon järjestysluku,
 f_0 = verkkojännitteen taajuus ja
 k = 1, 2, 3 ...

Ideaalitapauksessa yliaaltojen suuruudet I_n ovat

$$I_n = I_1 / n, \quad (9)$$

jossa I_n = n:s yliaaltovirta,
 I_1 = perusaaltovirran suuruus,
 N = yliaallon järjestysluku.

Yliaaltovirrat ovat siis suoraan verrannollisia perusaaltovirtaan. Kuvan 18.4j nomogrammista on luettavissa PWM-taajuusmuuttajan yliaaltovirtojen suuruudet ideaalitapauksessa eri pyörimisnopeuksilla ja vääntömomenteilla tai tehoilla. Yliaaltovirrat ovat suurimmillaan nimellisaallon taajuuksella ja maksimimomentilla. Vakiokuormitusmomentilla pyörimisnopeuden laskiessa yliaaltovirrat pienenevät, koska perusaaltovirta pienenee.



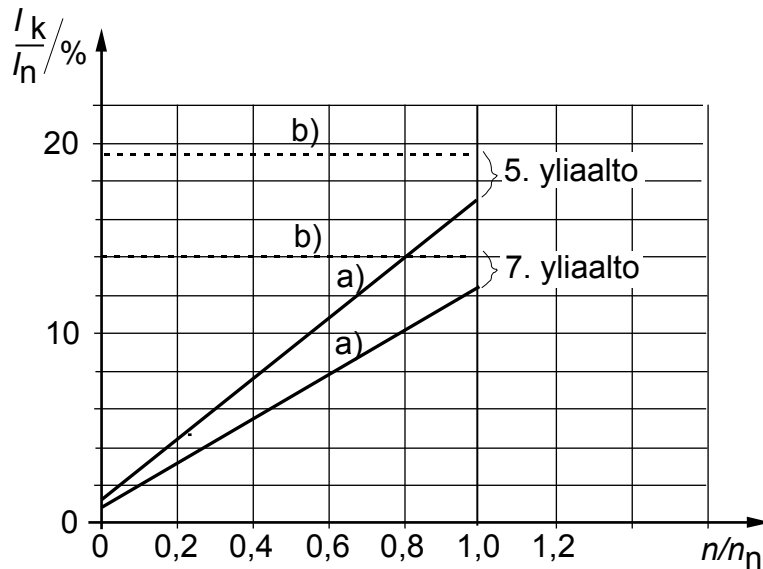
KUVA 18.4j. Nomogrammi, josta saadaan verkkovirran yliaaltovirran suuruus suhteessa moottorin nimellisvirtaan, kun pyörimisnopeus ja teho tai vääntömomentti tunnetaan.

Esimerkki:

Kuormitusvääntömomentti on 60 % nimellisvääntömomentista ja pyörimisnopeus 55 % nimellispyörimisnopeudesta. Kuinka suuri on verkkoon lähtevä 7. eli taajuudeltaan 350 Hz yliaaltovirta?

Oikeanpuoleisesta alaneljänneksestä havaitaan tehon olevan 33 % moottorin nimellistehosta. Piirretään akselin suuntaiset suorat apuviivoille ja niistä edelleen suorat vasemmanpuoleiseen yläneljännekseen. Suorien leikkauskohdasta luetaan 7. yliaaltovirran olevan suuruusluokaltaan alle 5 % moottorin nimellisvirrasta.

Tasasähkökäytöt ja verkkokommutoidulla suuntaajalla jännite- tai virtasäädetyt tasasähkövälipiirillä varustetut taajuusmuuttajat ottavat koko nopeusalueella suuremman verkkovirran perusaallon kuin samalla momentilla kuormitettu PWM-taajuusmuuttaja. Niinpä niiden synnyttämät yliaaltovirratkin ovat suuremmat kuin PWM-taajuusmuuttajilla (kuva 18.4k).



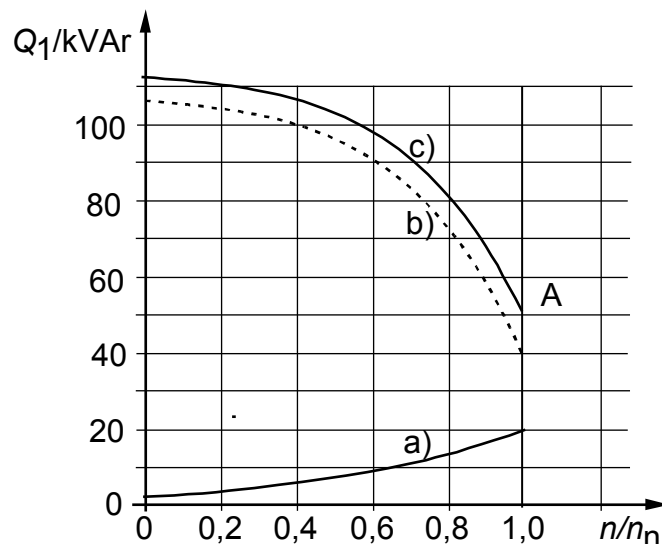
KUVA 18.4k. Tasasähkökäytön ja PWM-taajuusmuuttajan aiheuttamat 5. ja 7. yliaaltovirta nimellismomentilla: a) PWM-taajuusmuuttaja ja b) tasavirtakäyttö.

Loisteho

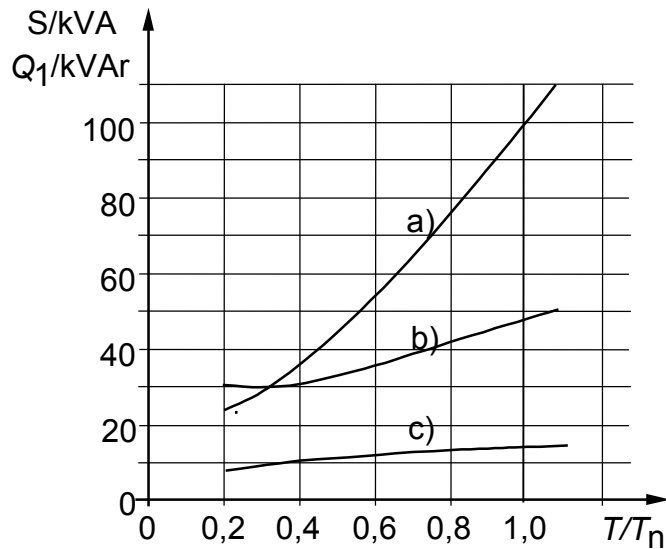
Syöttöverkkoon kytketty laite kuluttaa perusaaltoista loistehoa, jos sen ottama virta on vaihesiirrossa verkkojännitteeseen nähden. Verkkojännitteen ollessa sinimuotoista, syntyy vain perusaalto-loistehoa. Loistehon vaikutuksesta syöttöverkossa syntyy jännitteen alenemaa ja häviötä. Loistehosta aiheutuu kuluttajalle kustannuksia loistehomaksujen, lisääntyneiden häviöiden ja loisvirran vaatiman laitteiden ja siirtoverkon lisämitoituksen takia. Diodisillan perusaallon tehokerroin on kuormituksesta riippumatta lähes yksi.

PWM-taajuusmuuttajassa loistehon kulutusta pienentää lisäksi verkkovirran pieneneminen pyörimisnopeuden laskiessa (kuvat 18.4 l ja m).

Verkkoonjarruttavissa PWM-taajuusmuuttajissa on tyristorisilta, joka kehittää verkkoon ohjausloistehoa. Loistehon kulutus on kuitenkin suhteellisen vähäinen, koska jarrutusteho on monesti pieni.

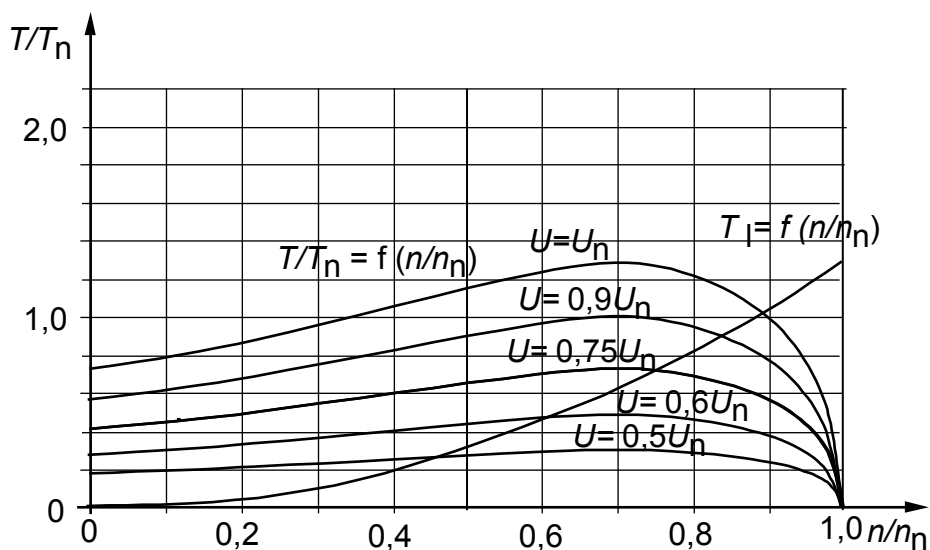


KUVA 18.4l. Syöttölaitteiden ottamat loistehot moottorin HXUR 562 G2 (90 kW) nimellismomentilla. a. PWM-taajuusmuuttaja b. Verkkokommutoidulla 6-pulssisuuntaajalla jänniteohjattu taajuusmuuttaja. c. Verkkokommutoidulla 6-pulssisuuntaajalla virtaohjattu taajuusmuuttaja. Piste A vastaa nimellisarvollaan käyvän moottorin loistehoa.



KUVA 18.4m. Syöttöverkosta otetut näennäis- ja loistehot kuormituksen funktiona 50 Hz taajuudella. Moottorin M2BA 280 (90 kW) a. Näennäisteho suoraan verkosta syötettynä b. Loisteho suoraan verkosta syötettynä c. Loisteho PWM-taajuusmuuttajalla syötettynä.

Moottorin jättämän muuttamiseen perustuville säätötavoille on yhteistä ja ominaista mm. ettei nopeutta voida säätää kuin nimellinopeudesta alaspäin, ja että kuormituksen muutos vaikuttaa voimakkaasti pyörimisnopeuteen, esimerkiksi kuormituksen poisputoaminen nostaa aina moottorin pyörimisnopeuden tyhjäkäyntinopeuteen. Lisäksi moottorin toimiminen suurella jättämän arvolla merkitsee lisääntyneitä häviöitä, joten moottori on ylimitoitettava termisesti. Tällainen säätötapa muodostuu pitkillä käyttöajoilla ja suuremmilla tehoilla epätaloudelliseksi. Säätämällä syöttöjännitteen tehollisarvoa voidaan moottorin momenttikäyrää ja jättämää muuttaa. Moottorin kehittämä vääntömomentti on verrannollinen syöttöjännitteen neliöön $T \approx k U^2$ jännitealueella, jolla magneettipiirit eivät kyllästy. Säätämällä jännitteen avulla moottorin momenttia voidaan kuormitusmomenttikäyrän ja moottorin momenttikäyrän leikkauspistettä eli moottorin toimintapistettä siirtää, kuten kuvassa 18.4n on esitetty. Riittävän laajan säätöalueen saavuttamiseksi on moottorin momenttikäyrän oltava normaalin vakio moottorin momenttikäyrää huomattavasti loivempi. ts. roottoriresistanssin on oltava normaalia suurempi.



KUVA 18.4n. Oikosulkumoottorin momenttikäyriä $T = f(n)$ syöttöjännitteen eri arvoilla. Kuormituksen vastamomentti $T_1 = f(n)$.

Täysi säätöalue saavutetaan vain kun moottori ja säädin ovat kuormitukseen nähden hyvin yhteensovitettut. Jännitteensäätömenetelmää voidaan soveltaa sekä 1- että 3-vaihemoottoreilla. Tavallisesti jännitteensäätö suoritetaan tyristorisillalla, jolloin jännitteen epäsinimuotoisuus aiheuttaa lisähäviöitä moottorissa

18.4.5. Skalaariohjaus ja skalaarisäätö, vektorisäätö, suora vääntömomenttisäätö DTC

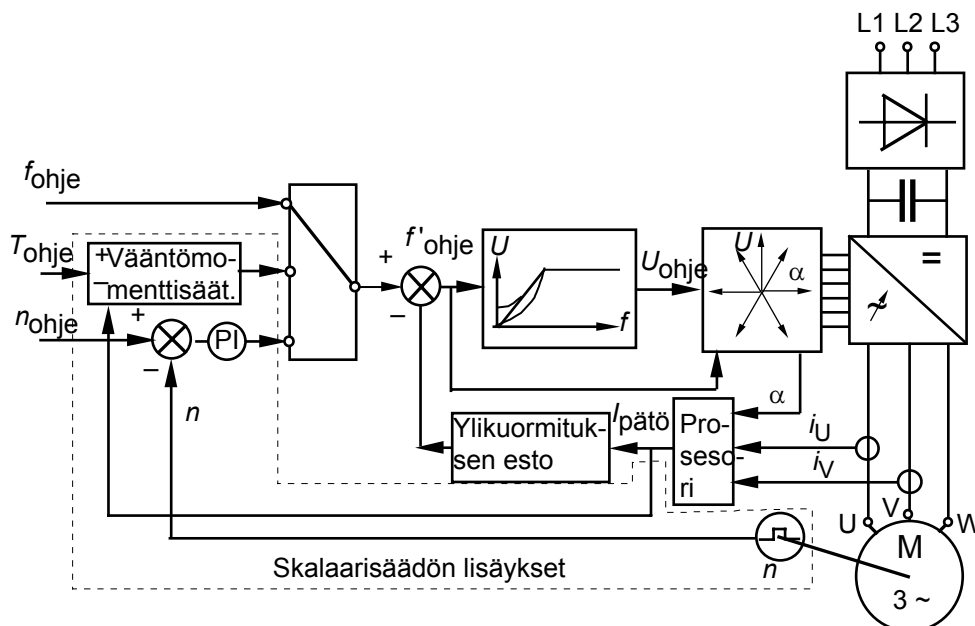
Sähkökäytön tehtävänä on siirtää työkonelle mekaanista tehoa niin, että saavutetaan haluttu toimintatila. Yleensä pyritään tiettyyn pyörimisnopeuteen tai vääntömomenttiin.

Skalaariohjauksessa moottorin pyörimisnopeutta ohjataan invertterin lähtötaajuutta muuttamalla, jolloin moottorin pyörimisnopeus asettuu taajuuden ja kuormitusvääntömomentin määräämään arvoon. Lähtöjännite riippuu lähtötaajuudesta. Jännite kasvaa lineaarisesti moottorin nimellisjännitteeseen asti, joka saavutetaan moottorin nimellistaajuudella. Tämän yläpuolella jännite pysyy vakiona.

Skalaariohjauksessa mitataan moottorin vaihevirrat ja lasketaan pätövirtakomponentit. Moottorin pätövirtakomponentti on verrannollinen moottorin vääntömomenttiin. Oletetaan moottorin vääntömomentin olevan suoraan verrannollisen moottorin jännitteen ja pätövirran tuloon $U_1 \cdot I_p = U_1 \cdot I \cdot \cos \varphi$. Tästä johtuu nimitys skalaariohjaus. Skalaariohjauksessa ei mitata moottorin pyörimisnopeutta.

Skalaarisäädön avulla voidaan säätää joko moottorin pyörimisnopeutta tai vääntömomenttiä tai molempia vuorotellen. Pyörimisnopeus jää jättämän verran syöttötaajuutta vastaavaa tahtinopeutta pienemmäksi. Jättämä asettuu sellaiseen arvoon, että työkonel saa vaatimansa tehon. Skalaarisäädössä on takometri.

Kuva 18.4o esittää skalaariohjauksen ja -säädön lohkoakaaviota. Skalaarisäädön **perusohjelmassa** on vakiona käytettävissä kaikki ns. sovellustoimilohkot.



KUVA 18.4o. Skalaariohjauksen ja -säädön lohkoakaavio.

Pienillä taajuuksilla (0...10 Hz) syntyy moottorin staattorin resistansseissa merkittävä jännitehäviö. Jännitehäviö voidaan kompensoida kasvattamalla taajuusmuuttajan lähtöjännitettä siten, että moottori aina saa oikean magnetoinnin. Tätä ns. IR-kompensointia tarvitaan mm. suuren käynnistysmomentin vaativissa vakiomomenttikäytöissä sekä suuren irrotusmomentin vaativissa käytöissä.

Jättämän kompensointia voidaan käyttää niissä tapauksissa, joissa vaaditaan stabiilia pyörimisnopeutta riippumatta kuormitusmomentin muutoksista. Kompensoinnin vaikutus voidaan asetella suhteessa käytettävän moottorin jättämään. Kompensointi ei toimi alle 10 Hz taajuuksilla.

Ohjearvointegraattorin toimintaa on normaalisti pehmennetty kulmapisteissä ns. S-käyrän avulla. Mikäli käytön vaatima integrointiaika on lyhyt ($< 3s$), pehmennys alkaa oleellisesti pidentää integrointiaikoja. Tällöin S-käyrä voidaan kytkeä pois päältä.

Skalaarisäätöön sisältyy myös seuraavat lisätoiminnot:

1. jumisuoja,
2. vauhtikäynnistys,
3. verkkokatkossäätö,
4. momenttisäätö,
5. nopeusmittaus takometrin avulla,
6. nopeussäätö takometrin avulla ja
7. tasavirtajarrutus.

Jotta edellä luetellut lisätoiminnot saataisiin käyttöön, on ne oltava ohjelmaan tehtaalla aktivoituina.

Jumisuoja pysäyttää vaihtosuuntaajan tilanteessa, jossa moottorin yllämpenemisen vaara on ilmeinen. Roottori on joko jatkuvasti jumissa tai kuormitus on muuten jatkuvasti liian suuri. Vauhtikäynnistys mahdollistaa suuntaajan käynnistämisen pyörivään moottoriin ilman, että moottoria ensin jarrutettaisiin. Vaihtosuuntaaja etsii pyörivän moottorin akselinopeutta vastaavan taajuuden ja tahdistuu tähän. Haku on mahdollista myös silloin, jos akseli pyörii taajuusohjeeseen nähden vastakkaiseen suuntaan. Vauhtikäynnistys sopii hyvin esim. suuriin puhallinkäyttöihin ja linkokäyttöihin.

Verkkokatkossäätö pitää vaihtosuuntaajan toiminnassa lyhyissä (n. 0,5 s) verkkokatkoksissa. Tällöin tarvittava energia otetaan moottorin ja kuorman pyörivien massojen liike-energiasta. Jos katkos kestää yli sekunnin, ei pääkontaktorin ohjauslogiikka enää pysty sulkemaan kontaktoria, vaikka käytön liike-energia riittäisikin. Tällaisessa tapauksessa on käytettävä releistyksele varmennettua apujännitettä.

Momenttisäätö valittuna taajuusmuuttajaa ohjataan momenttiohjeella. PI-säätäjän avulla pyritään pitämään käytön momentti ohjearvon mukaisena taajuusohjetta muuttamalla. Alle 5 Hz taajuudella momenttisäätö siirtyy automaattisesti taajuussäädölle. Jos momenttisäätöä tarvitaan alle 5 Hz taajuuksilla, on käytettävä vektorisäätöohjelmaa. Jos moottorin pyörimisnopeudesta halutaan saada tarkka tieto, voidaan moottori varustaa takometrillä, joka sitten kytketään vaihtosuuntaajaan. Pyörimisnopeus voidaan lukea suoraan digitaalimuodossa vaihtosuuntaajan paneelilta tai ottaa ulos analogiaviestinä. Jos moottori on varustettu takometrillä, voidaan käyttää nopeussäätöä. Nopeussäätäjällä voidaan takometritiedon perusteella poistaa oikosulkumoottorin kuormituksesta riippuvan jättämän akselinopeuteen aiheuttama virhe. Normaali toiminta-alue on 5...200 Hz. Alle 5 Hz taajuuksilla nopeussäätö toimii, mutta on säätöominaisuuksiltaan hidaskäyttö. Askelvasteen nousuaika on yli 5 Hz taajuuksilla 100 ms. Kun halutaan vaativampaa säätödynamiikkaa, on käytettävä vektorisäätöä.

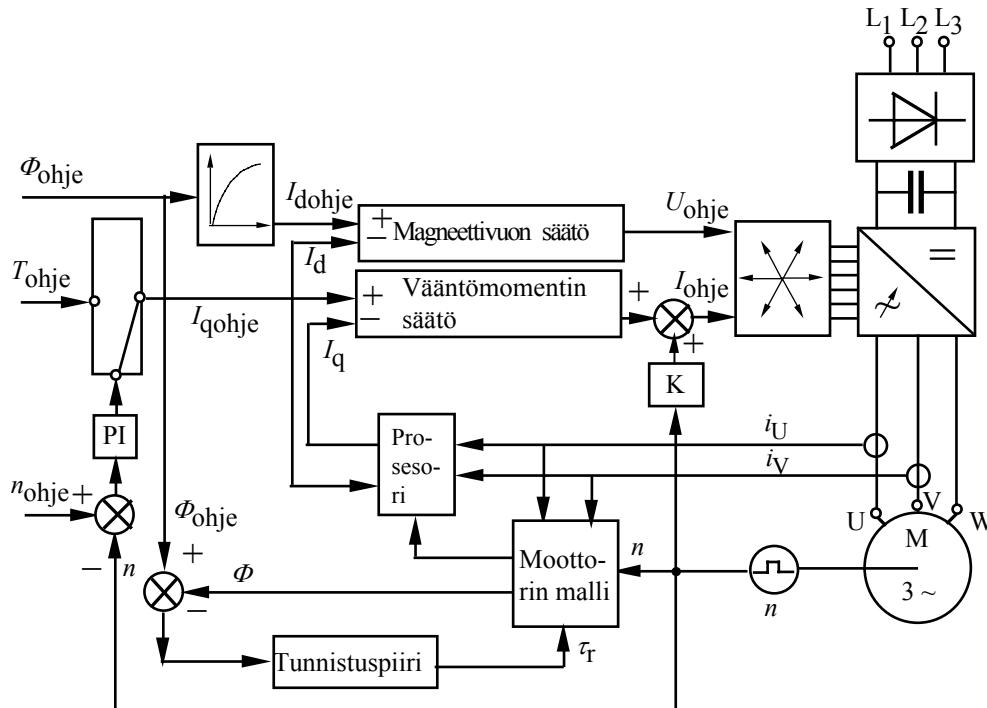
Vektorisäätö

Oikosulkumoottorin vääntömomentti on päävuon ja roottorivirran vektoritulo. Jos halutaan säätää vääntömomenttia, on myös vuovektorin suunta otettava huomioon. Tällaista säätöä nimitetään vektorisäädöksi.

Vektorisäädön toteuttaminen edellyttää sekä moottorivirtojen että pyörimisnopeuden asento-tarkkaa mittausta. Mittaussignaalit syötetään oikosulkumoottorin matemaattiseen malliin, joka on vaihtosuuntaajassa sijaitsevan mikroprosessorin muistissa. Moottorimalli laskee moottorin magneettivuon ja jakaa virran vääntömomenttia ja magneettivuota kuvaaviin virran osiin. Kumpaakin virtakomponenttia pystytään säätämään erikseen, joten moottorin vääntömomenttia voidaan muuttaa ja vuo pitää vakiona. Vääntömomentin vasteaika eli se aika,

jonka kuluessa moottorin vääntömomentin oloarvo on saavuttanut moottorin momenttiohjeen on hyvin lyhyt ($<20\text{ms}$).

Vektorisäädössä on aina oltava takometri. Kuvassa 18.4p on esitetty vektorisäädön lohko-kaavio.



KUVA 18.4p. Vektorisäädön lohko-kaavio.

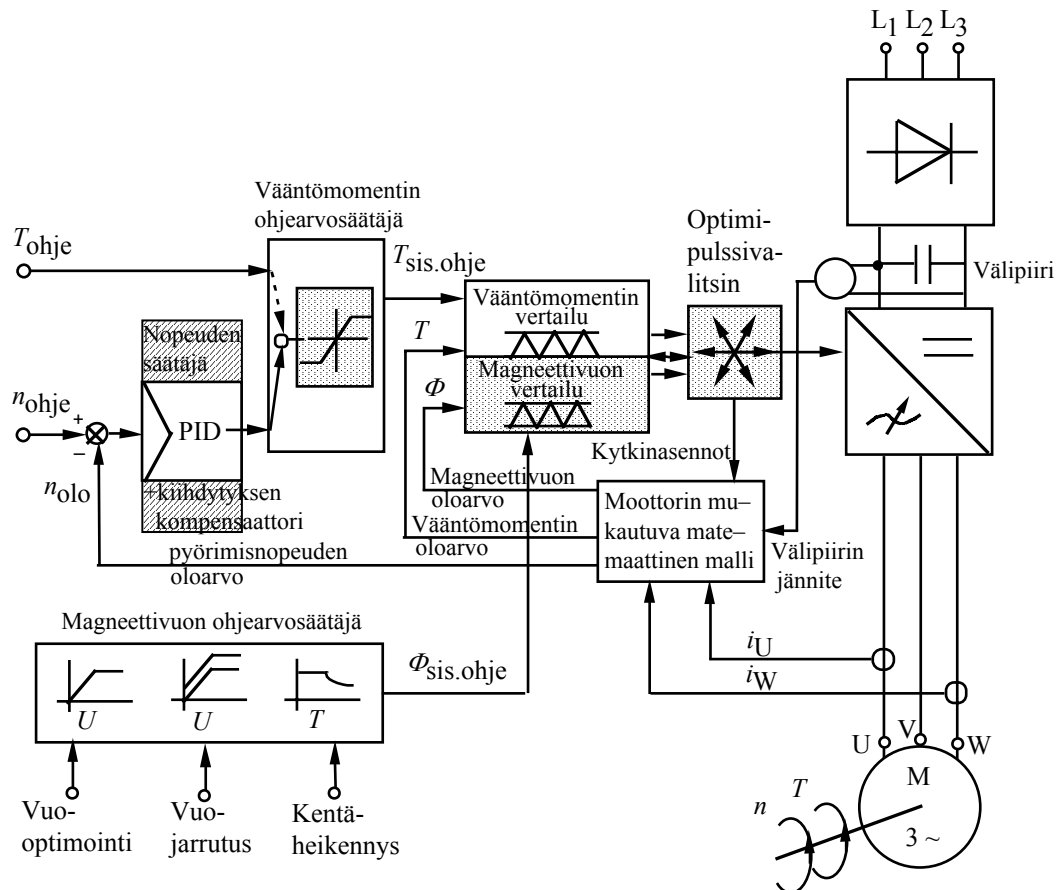
Nopeusmittauksen staattinen tarkkuus on 0,01 % nimellinopeudesta käytettäessä takometriä, jolta saadaan 1024 pulssia / kierros. Momenttisäätäjällä päästään 20 ms momentin askelvasteisiin.

Vektorisäätö sopii sovelluksiin, joissa vaaditaan hyvää dynamiikkaa ja /tai tarkkaa nopeussäätöä. Vektorisäädöllä saadaan oikosulkumoottorille lähes tasavirtakäyttöä vastaavat säätöominaisuudet.

Vektorisäädöllä voidaan mm. estää vuon heikentyminen silloin, kun kuorma äkillisesti kasvaa ja koko virta tarvittaisiin moottorin vääntömomenttia lisäämään. Käytännössä vuon ja momentin säätö tapahtuu taajuusmuuttajan lähtöjännitettä ja taajuutta muuttamalla.

Suora vääntömomenttisäätö eli DTC (Direct Torque Control)

Suoran vääntömomenttisäädön avulla ohjataan suoraan moottorin perussuureita vääntömomenttia ja pyörimisnopeutta. Moottorin virta ja invertterin tasajännitevälipiirin jännite mitataan ja syötetään mukautuvaan eli adaptiiviseen moottorin matemaattiseen malliin. Se laskee vuon ja vääntömomentin oloarvot 25 ms välein. Vääntömomentin ja vuon vertailupiirit eli komparaattorit vertailevat oloarvoja ohjearvoihin, jotka tulevat momentin ja vuon ohjearvosäätäjiltä. Optimipulssin valitsin tekee tarvittavat kytkennänmuutokset komparaattoreilta saamiensa kaksitasoisten tietojen perusteella. DTC:ssä kytkennän muutokset tehdään vuon ja momentin arvojen perusteella. Moottoria syöttävän jännitteen muotoon ei kiinnitetä huomiota. Tästä johtuen moottoria syöttävä jännite ei muutostiloissa ole sinimuotoinen. Jatkuvuustilassa pyörimisnopeuden ollessa vakio moottorin syöttöjännite muuntautuu sinimuotoiseksi. Tässä suhteessa DTC eroaa oleellisesti perinteisestä PWM-käytöstä, jossa invertteri pyrkii syöttämään moottoria kaikissa tilanteissa mahdollisimman sinimuotoisella jännitteellä. DTC:llä saavutetaan parempi dynamiikka kuin tasasähkökäytöllä. Sen vääntömomenttivaste on $<5\text{ms}$. Kuvassa 18.4q on esitetty suoran vääntömomenttisäädön lohko-kaavio.



KUVA 18.4q. Suoran vääntömomenttisäädön (DTC) lohkokaavio.

18.4.6. Sovellusohjelmointi

Asiakaskohtainen käyttösovellus voidaan tehdä toimilohkoja käyttäen. Se on tallennettu EPROM-muistiin. Sovelluksen tekeminen toimilohkojen avulla on samantapaista kuin erillisiä elektroniikkakortteja käyttämällä, paitsi että toimintojen yhdisteleminen tapahtuu ohjelman avulla. toimilohkokirjastossa on n. 200 toimilohkoa.

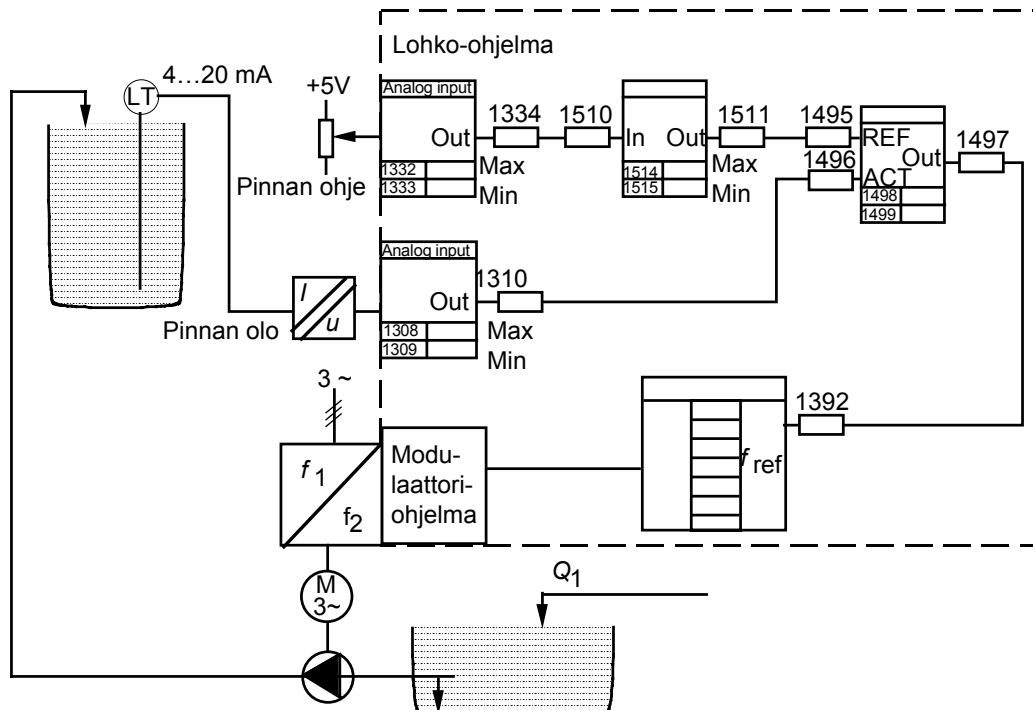
Vakiotoimilohkoja ovat:

- loogiset toiminnot,
- aritmetiikka,
- ajoitus ja vertailu,
- valitsimet,
- hälytystoiminnot,
- I/O -toiminnot,
- tietoliikenne,
- diagnostiikka ja
- erikoistoiminnot.

Toimilohko-ohjelman perusversio sisältää vakio-ohjausliitäntöjen toiminnot ja skalaarisäädön.

Vaihtoehtona skalaarisäädölle vaativissa käytöissä on vektorisäätö. Sitä varten tarvitaan takometritakaisinkytkentä. Yleisimpiin sovelluksiin (esim. pinnankorkeuden säätö) on tehty valmiita makro-ohjelmia. Toimilohkot ja optioliitännät voidaan ohjelmoida sovelluskohtaisesti eli säätö on vapaasti ohjelmoitava. Myös asiakas voi halutessaan tehdä ohjelmoinnin esim. ohjauspaneelia käyttäen. Tällöin toimitukseen sisältyy ohjelma, jossa on vapaasti ohjelmoitavia toimilohkoja.

Kuvassa 18.4r on esitetty yksinkertaistettu esimerkki pinnankorkeussäädön lohko-ohjelmasta ja sen ohjepiireistä.



Kuva 18.4r. Lohko-ohjelmointi.

Seuraavat toiminnot ovat myös toteutettavissa sovellustoimilohkojen avulla:

1. Prosessisäätö
2. PFC-automatiikka
3. Suhdesäätö
4. Rajoitussäätö
5. Kriittisten taajuuksien esto
6. Moottorin ylikuormitussuoja

Edellä lueteltujen toimintojen yhdistely on mahdollista. Toimintoja voidaan myös räätälöidä sovellustoimilohkojen avulla.

Toimintoa käytetään niissä tapauksissa, joissa on eduksi, että prosessisäätö on taajuusmuuttajassa. Tavallisimpia sovelluksia ovat pumppu- ja puhallinkäytöt paine, taso- tai virtaussäädöllä varustettuna. Prosessisäätö on PI- tyyppinen.

PFC- (pumppu-, puhallin- ja kompressori-) **automatiikkaa** käytetään esim. usean rinnakkaisen pumpun omaavissa käytöissä. Yhden pumpun pyörimisnopeutta säädetään taajuusmuuttajalla ja muut kytketään suoraan verkkoon virtaustarpeen mukaan. PFC- automatiikka mahdollistaa pumppausmäärän portaattoman säädön. Yhteensä 5 pumppua voidaan kerralla käynnistää.

Suhdesäätöohjelma soveltuu säätökohteisiin, joissa käytön perusnopeusohjetta korjataan eri lähteestä tuotavalla lisäohjeella, kuten esim. paperikoneen perälaatikon sekoituspumpun säätöön. Lisäohje vaikuttaa perusohjeeseen ohjelmallisesti aseteltavalla suhteellisella osuudella, joka on tavallisesti joitakin prosentteja perusohjeesta.

Rajoitussäätöohjelma sopii esim. kehäsahan syöttötelojen tai puuhiomon syöttöketjujen säätöön. Taajuusmuuttajalla säädetään syöttömoottorin pyörimisnopeutta. Mikäli päämoottori (sahaus- tai hiomamoottori) pyrkii ylikuormittumaan, ohjelma pienentää nopeusohjetta automaattisesti. Taajuusmuuttaja voidaan ohjelmallisesti lukita siten, että se sulkee pois kaikki taajuudet, jotka voivat olla käytölle kriittisiä. Yhteensä 5 eri taajuusaluetta voidaan ohjelmoida muistiin.

Toiminto käsittää yksinkertaisen **ylikuormitussuojan** moottorille satunnaisissa ylikuormitustapauksissa. Moottorin kuormitettavuuskäyrä ohjelmoidaan muistiin (kuormitettavuus 0 Hz

sekä kentänheikennyspisteessä). Jos käyrä ylitetään tietyn aseteltavan ajan, saadaan hälytys tai laukaisu.

Käyttösovellutukset

Käyttämällä rakennemuodulleja voidaan rakentaa erilaisia käyttösovellutuksia, joista kolme yleisintä on tässä kuvattu.

Erilliskäyttö on taajuusmuuttajasovelluksista yleisin. Erilliskäytöksi sanotaan taajuusmuuttajakäyttöä, jossa on erillinen syöttö ja yksi invertteriyksikkö, joka syöttää yhtä tai useampaa moottoria.

Ryhmäkäyttö on usean erilliskäytön yhdistelmä, joilla on yhteinen kontaktoriyksikkö, verkosuuntaaja ja energiavarasto.

Linjakäytössä (esim. Paperikone) kullakin käyttöryhmällä on oma vaihtosuuntaaja, mutta syöttöyksiköt ovat yhteisiä koko linjalle. Koko linjakäytön ohjauksen hoitaa yhteinen digitaalinen säätäjä, joka on liitetty nopealla optisella linkillä käyttöryhmiin.

Standardimoottorien kuormitettavuus on rajallinen, koska jos $f \leq 50$ Hz – jäähtytyskyky alenee, kun pyörimisnopeus laskee ja $f \geq 50$ Hz – U on vakio ja moottorin magnetointi heikkenee.

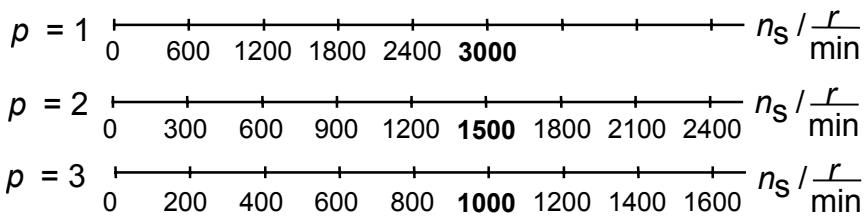
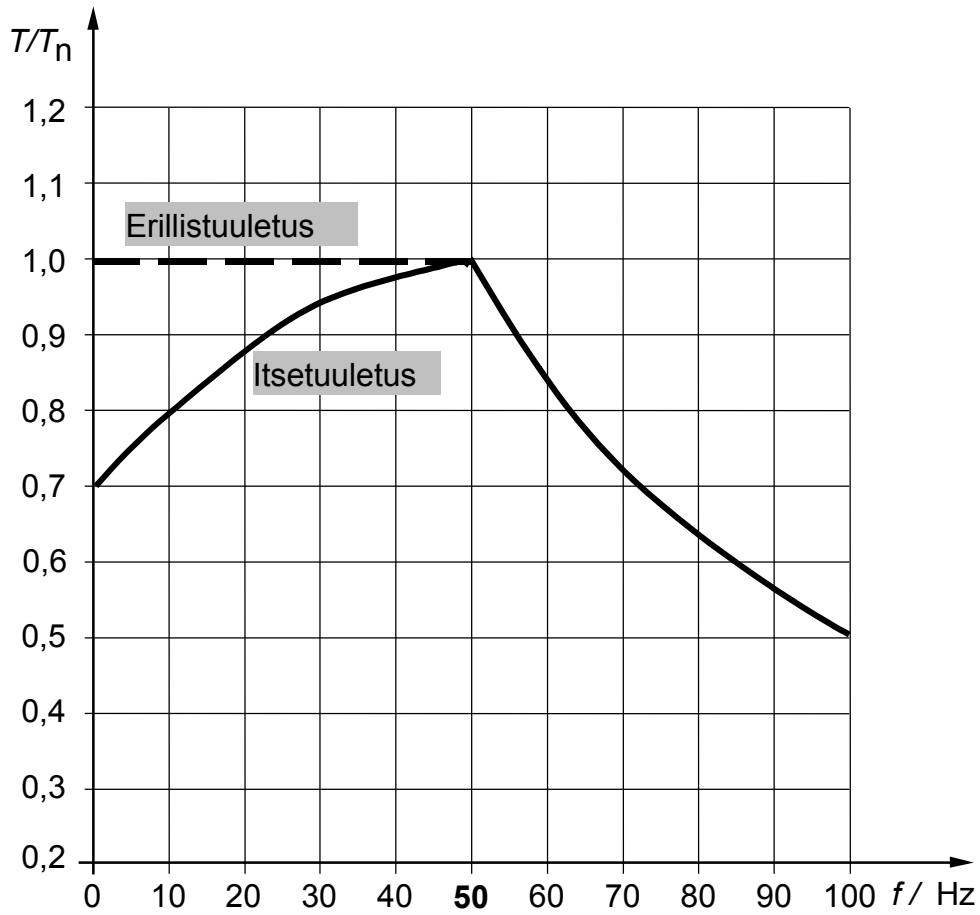
Kuvassa 18.4s esitetään moottoreiden terminen kuormitettavuus taajuusmuuttajien yhteydessä vääntömomenttina ja tehona. Käyrät perustuvat ABB moottoreilla suoritettuihin mittauksiin, mutta pätevät hyvin myös muiden valmistajien moottoreille.

Käytöissä, joissa ajetaan pitkiä aikoja pienillä taajuuksilla, kannattaa käyttää tietystä moottorin runkokoosta ylöspäin erillistuuletusta. Erillistuuletus on suunniteltu siten, että se antaa moottorille saman ilmamäärän kuin mitä rungoltaan samankokoisessa standardimoottorissa virtaa, kun pyörimisnopeus on 1500 r/min.

Muutamilla pienitehoisilla moottoreilla ($P_n < 4$ kW) kuormitettavuus ei ole kuvan 18.4s mukainen. Moottorit saattavat pienillä taajuuksilla lämmentä liikaa jo tyhjäkäynnissä. Tämä johtuu seuraavista syistä:

- Pienillä moottoreilla resistanssi / reaktanssi suhde on suuri, jolloin virran yliaallot synnyttävät pienessä moottorissa suhteellisesti enemmän virtalämpöhäviöitä kuin suuressa moottorissa.
- Tyhjäkäyntivirta on samaa suuruusluokkaa nimellisvirran kanssa, joten kuormituksen vähentäminen ei merkittävästi pienennä kokonaishäviöitä.
- Pienissä moottoreissa jännitteen nousu yli nimellisjännitteen suurentaa moottorin lämpenemistä.

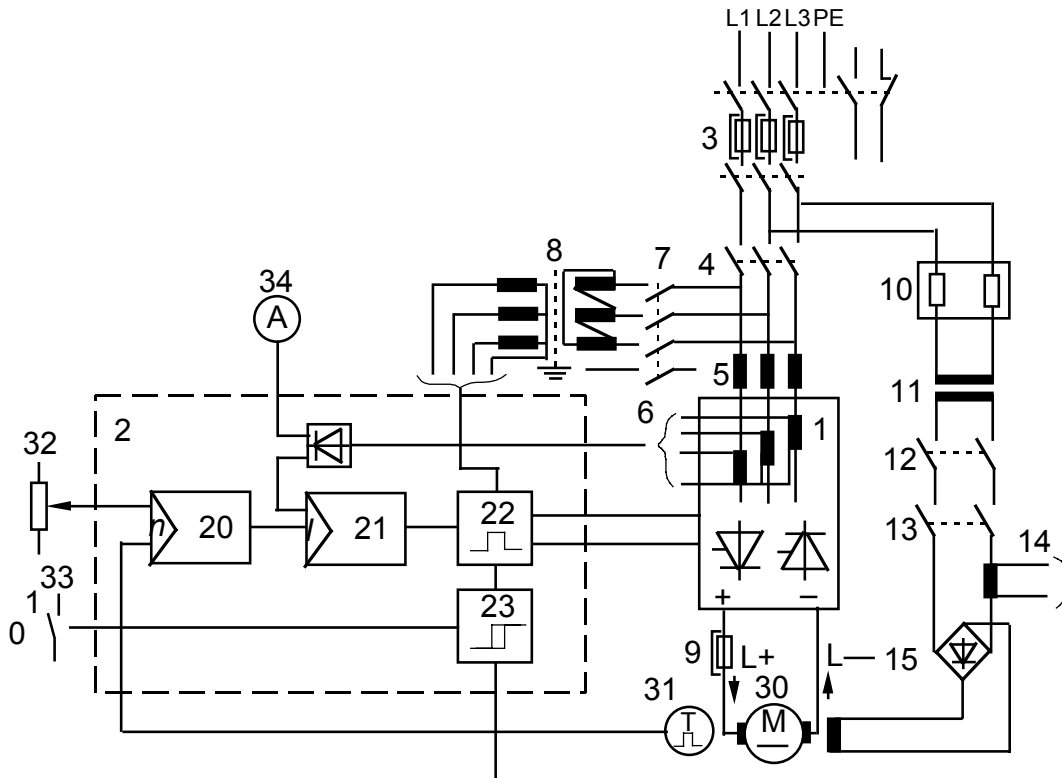
Suunniteltaessa pienten moottorien käyttöä taajuusmuuttajalla on syytä varmistaa sopivuus valmistajan kanssa.



KUVA 18.4s. IEC 60034 -oikosulkumoottorin tyypillinen jatkuva kuormitettavuus taajuusmuuttajakäytössä.

18.5. Tasasähkökäytöt

Nykyaikainen tasasähkökäyttö on säädettävä moottorikäyttö, johon moottorin lisäksi kuuluu tyristorisuuntaajakeskus. Kuvassa 18.5a on periaatekaavio käytöstä.



KUVA 18.5a. Tasasähkökäytön periaatekaavio.

- | | |
|------------------------------------|------------------------------|
| 1. Tyristorisilta | 13. Magnetoinnin kontaktori |
| 2. Digitaalinen säätö | 14. Magnetoinnin valvonta |
| 3. Kytkinvaroke | 15. Magnetointitasasuuntaaja |
| 4. Kontaktori | 20. Nopeussäätäjä |
| 5. Kuristimet | 21. Virtasäätäjä |
| 6. Virran mittaus | 22. Sytytin |
| 7. Tahdistusjännitteen suojakytkin | 23. Ohjauslogiikka |
| 8. Tahdistusjännitteen muuntaja | 30. Tasavirtamoottori |
| 9. Tasavirtapiirin sulake | 31. Pulssitakometri |
| 10. Magnetoinnin sulake | 32. Nopeuden ohje |
| 11. Magnetoinnin muuntaja | 33. Ohjauskytkin |
| 12. Magnetoinnin suojakytkin | 34. Virran mittaus |

Pääpiiri

Tasavirtamoottori on vierasherätteinen kone, joka on suunniteltu kestäväksi virrassa esiintyvä aaltoisuus ja säädön aiheuttamat nopeat ankkurivirran vaihtelut. Virran muutosnopeus saattaa olla jopa 100 kertaa nimellisvirta sekunnissa. Seuraavassa taulukossa on yleisesti käytettyjä moottorijännitteitä.

Verkojännite [V]

380
525
660

Moottorijännite [V]

440
600
750

Keskuksen keskeisenä osana on tyristorisilta, jolla syöttöjännite tasasuunnataan ja sen suuruutta asetellaan. Yleisesti käytetään seuraavia siltakytkeä:

Teho [kW]	Kytkeä
≤ 5	täysin ohjattu 1- vaihesilta
≤ 2000	täysin ohjattu 3- vaihesilta
≥ 2000	täysin ohjattu 12- pulssisilta

Puoliohjattujen siltojen käyttö on vähäistä, johtuen niiden huonoista säätö- ja yliaalto-ominaisuuksista.

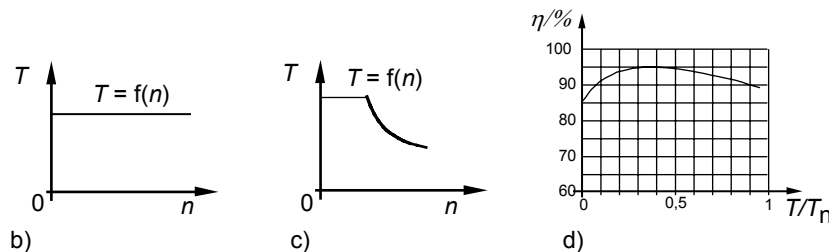
Haluttaessa moottorista kahdensuuntaista momenttia, voidaan käyttää magnetointi- tai ankkurijännitteen napaisuuden vaihtoa kontaktoreilla tai kaksisuuntaista tyristorisiltaa. Viimeksi mainittu tapa on paras, koska siinä eivät ole haittana kontaktorien toimintaviiveet ja kuluminen. Viive ankkurivirran suunnanvaihdossa on pienempi kuin 5 ms.

Normaalisti moottorin magnetointivirta on vakio, jolloin myös momentti kierrosluvun funktiona on vakio (kuva 18.5b). Jos magnetointipiiriin sijoitetaan tyristorisuuntaaja, voidaan kenttä säätää siten, että se jostain pyörimisnopeudesta alkaen alkaa heikentyä nopeuden kasvaessa. Tällöin saadaan kuvan 18.5c mukainen momenttikäyrä, joka saattaa johtaa käytön kannalta edullisempaan mitoitukseen, jos momenttitarve (kuva 18.5b) on pienillä pyörimisnopeuksilla suurempi kuin suurilla.

Kuvassa 18.5d on 100 kW tyristorikäytön hyötysuhde momentin funktiona. Hyötysuhde paranee tehon kasvaessa.

Tyristorisuuntaaja mitoitetään vähintään moottorin häviöiden verran tarvittavaa moottoritehoa suuremmaksi. Jos kuorma on vaihteleva, on ero suurempi, koska pitkistä lämpöaika-kiosta johtuen moottorin lyhytaikainen ylikuormitettavuus on paremmin hyväksi käytettävissä kuin tyristorisillan ylikuormitettavuus.

Niinpä suuntaajateho on yleensä moottoritehoon verrattuna 1,05...1,8 kertainen.



KUVA 18.5b, c ja d. Tasavirtamoottorikäytön ominaiskäyrä.

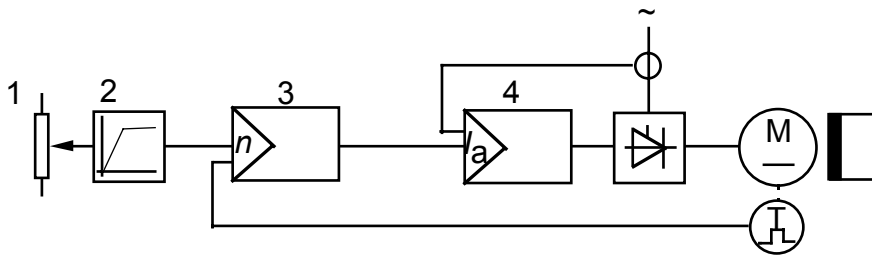
Syöttömuuntajan mitoitus-teho on 1,3...1,45-kertainen moottoritehoon verrattuna. Kerroin johtuu muun muassa siitä, että käytön tulee toimia normaalisti myös alhaisella verkkojännitteellä.

Säätö

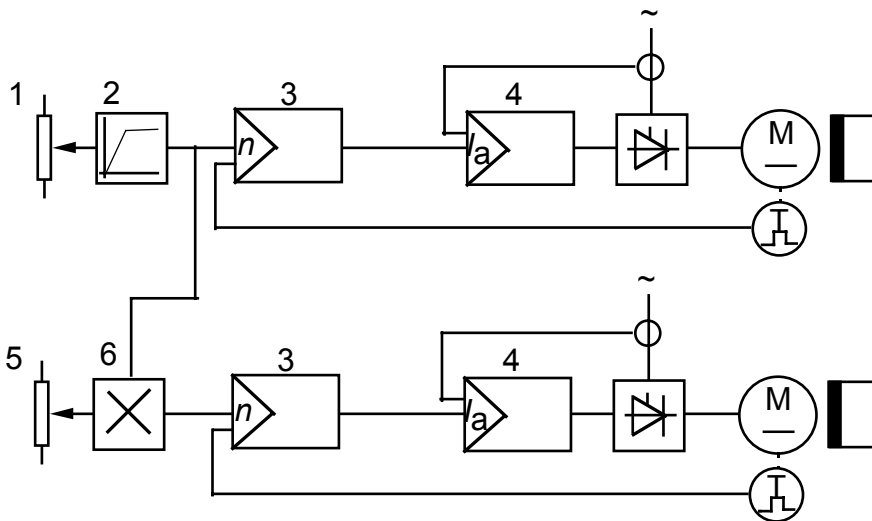
Kuvissa 18.5e...h on säätökytkentöjä. Yleisin säätötapa on nopeudensäätö (kuva 18.5e). Säätäjään kuuluu virransäätövahvistin, virranrajoituspiiri, nopeudensäätöpiiri ja ohjearvointegraattori. Monimoottorikäytöissä halutaan yleensä asetella moottorien nopeuseroja. Tämä käy päinsä kuvan 18.5f mukaisesti ohjearvoketjuvahvistimella, jonka vahvistusta voidaan asetella potentiometrillä

Jos kaksi moottoria on kytketty mekaanisesti yhteen, on kummallakin oma virransäätäjä, joita yhteinen nopeudensäätäjä ohjaa kuvan 18.5g mukaisesti. Kuvassa 18.5h on pumpun säätäjä. Käynnistettäessä moottori kiihdytetään tasaisesti nopeudensäädöllä paineiskujen välttämiseksi. Vasta sen jälkeen alkaa pinnankorkeuden- tai paineensäätäjä toimia.

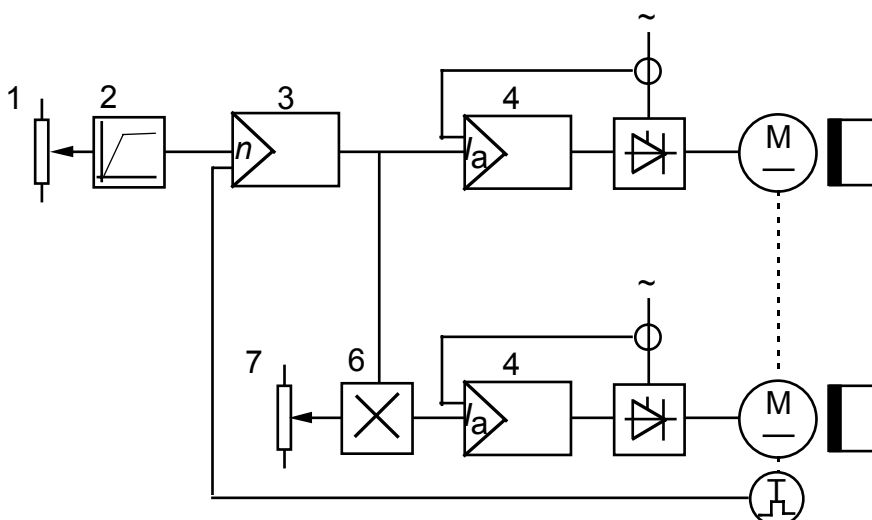
Säädön tarkkuuden vakiintuneessa tilassa (staattinen tarkkuus) määrää pääasiassa käytetty anturi esim. nopeudensäädössä takometri. Tarkkuus muutostilanteissa, kuten kuormituksen tai nopeusohjeen muuttuessa (dynaaminen tarkkuus) riippuu säätönopeudesta. Jos elektronisen käytön mahdollisuuksia halutaan tässä suhteessa käyttää hyväksi, täytyy käyttöakseli mitoittaa riittävän jäykäksi ja pitää välykset kytkimissä ja vaihteissa riittävän pieninä.



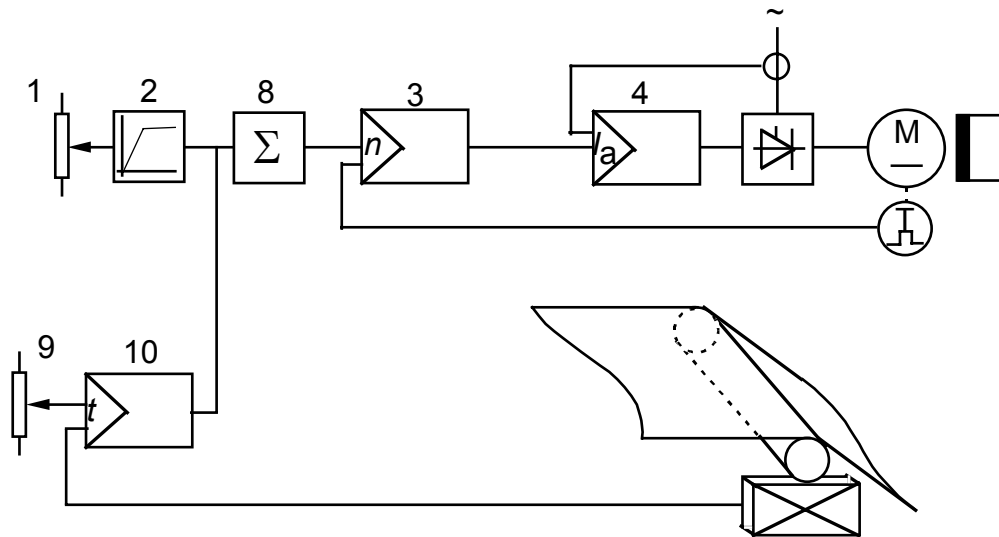
KUVA 18.5e. Nopeudensäätö.



KUVA 18.5f. Kahden moottorin yhteissäätö.



KUVA 18.5g. Kahden mekaanisesti yhteen kytketyn moottorin säätö.



KUVA 18 5h. Kireyden säätö.

- | | |
|---------------------------|------------------------------|
| 1. Nopeuden ohje | 6. Kertoja |
| 2. Ohjearvointegraattori | 7. Kuormitussuhteen asettelu |
| 3. Nopeudensäätövahvistin | 8. Summain |
| 4. Virransäätövahvistin | 9. Kireyden ohje |
| 5. Nopeuseron asettelu | 10. Kireyden säätövahvistin |

18.6. Moottorikäyttöjen suojaus

Säädettyjä moottorikäyttäjä suojattaessa tulee erikseen tarkastella moottorin suoja, moottoria syöttävän tehoasteen suoja, moottorikäyttölaitoksissa olevia monelle käytölle yhteisiä suoja, moottorin käyttämien prosessilaitteiden vaatimia suoja, sekä koordinoida näin syntyvän kokonaissuojauksen toimintaa. Kaapeleiden ylikuormitus- ja oikosulkusuojaus kuuluu myös kokonaissuojaukseen. Oheiseen taulukkoon on merkitty tarpeelliseksi katsottava suoja X, sekä mahdollinen tapauskohtaisesti tarvittava suoja (X). Lisäksi on mainittu näiden suojien laukaisutoiminnan kiireellisyys.

Ylijännitesuoja käytetään syöttömuuntajakohtaisesti suurissa laitoksessa suojaamaan käyttökokonaisuuksia verkosta päin tulevilta ylijännitteiltä. Nämä suojat (Voltrap, varistori) vaimentavat itse ylijännitteen. Vaihtovirtakäytöissä suojataan tasavirtavälipiiri ylijännitteen syntymisestä, silloin kun moottori syöttää energiaa verkkoon päin, eikä verkko pysty tätä vastaanottamaan. Tasasähkömoottorikäytössä suojataan ankkuripiiri ylijännitteeltä kentänheikennyksellä toimivissa käytöissä.

Taulukko 18.6a. Moottorikäyttöjen suojaus.

Suoja	Laitos tai muuntajakohdainen	Tasavirtakäyttö		Vaihtovirtakäyttö		Suojan toimintanopeus	
		Tehoaste	Moottori	Tehoaste	Moottori	Välitön	Hidastettu
Ylijännite	(x)						
Ylijännite			(x)	x		x	
Alijännite	(x)						(x)
Alijännite				x		x	
Oikosulkuvirta	x	x		x		x	
Puolijohde		x		x		x	
Ylivirta		x	x			x	
Virranrajoitus		x		x			
Lämpörele		(x)		(x)	(x)	x	(x)
Käämeissä lämpötila-anturi			(x)		x		(x)
Kommutaattori			(x)			x	
Alimagnetointi			x			x	
Maasulku	x	(x)	(x)	(x)	(x)		x
Tuuletus, tehoaste	x	x				x	
Tuuletus, moottori			(x)		(x)	(x)	x
Laakerisuoja			(x)		(x)		x
Apujännitteet	x	x		x		x	
Prosessilaitteiden suojaus						x	x

Alijännitesuojausta käytetään vaihtovirtakäyttöjen tasavirtavälipiirissä, koska tasavirtavälipiirin jännite määrää tehoasteessa olevan invertterin kommunikointikyvyn. Laajoissa moottorikäytöissä valvotaan myös verkon jännitettä alijännitteen varalta, koska kaikkien apujännitepiirien toiminta riippuu käytettävissä olevasta verkkojännitteestä.

Oikosulkusuojaat kuuluvat sähkömoottorikäyttöihin kuten muuhunkin sähkönjakeluun. Laitokseen tulevassa, sekä jokaiseen moottorikäyttöön menevässä syötössä, käytetään aina oikosulkusuoja.

Puolijohdesuojaat ovat erikoisnopeita sulakkeita ja ne ovat yleensä kytketty sarjaan suojaavan puolijohteen kanssa. Puolijohteet vaativat erikoissuoja pienen lämpökapasiteettinsa vuoksi.

Ylivirtasuoja tarvitaan tasavirtakäytöissä suojaamaan moottoria ja sen kommutaattoria lieviltä lyhytaikaisilta ylivirroilta virta-alueella $2...3 \times I_n$, missä käytön muut suojat eivät toimi. Kun sama tehoaste syöttää montaa moottoria, tarvitaan moottorikohtaiset ylivirtasuojaat estämään moottoreita syöttämästä toisiaan epänormaaleissa käyttötilanteissa.

Virranrajoituksella voidaan nopeasti ja tarkasti rajoittaa tehoelektronikkalaitteiden lähtötehoa tai lähtövirtaa siten, että hetkellisissä vaarattomissa ylikuormitustilanteissa käyttökes-

keytykseen johtavat suojat eivät toimi. Rajoitus suojaa myös tehoasteita kommutoinnin epäonnitumiselta.

Lämpörele. Digitaalitekniikassa, joka on yhä vallitsevampi, erillinen lämpörele voidaan korvata asettamalla ohjelmointilaitteella moottorin lämpömallia vastaavat arvot säätöohjelmaan. Jos samaan suuntaajaan kytketään useampia moottoreita käytetään erillisiä lämpöreleitä.

Lämpösuoja moottorin käämeissä on tarpeellinen, jos moottorissa on omalla akselilla oleva tuuletin ja moottoria joudutaan käyttämään paljon alhaisilla kierrosluvuilla. Myös vierastuuletteisilla moottoreilla käämeihin sijoitetut suojat antavat hyvän turvan jäähdytystehon heikkenemistä vastaan. Säädetävillä vaihtovirtamoottoreilla, joilla tavallisen lämpöreleen käyttö yhdessä virtamuuntajien kanssa vaihtelevan syöttötaajuuden takia on vaikeata, ovat käämeihin sijoitetut suojat ensisijainen ratkaisu

Kommutaattorisuoja käytetään tasavirtakäytöissä suojaamaan kommutaattoria sellaisissa käyttötapauksissa, joissa moottori voi jäädä seisomaan suurella virralla pitkähkön ajan. Suojaa tarvitaan, koska moottorin seistessä kommutaattori lämpenee ja laajenee paikallisesti.

Alimagnetointisuoja käytetään valvomaan tasavirtamoottorin magnetointivirtaa ja estämään moottoria ryntäämästä tai ylikuormittumasta.

Maasulkusuoja tarvitaan, koska tehoasteet rajoittavat maasulkuvirrat tehoasteiden jälkeisissä laitoksen osissa. Tämän vuoksi käytetään käyttömaadoitetuissa laitoksissa sähkömoottorikäyttökohtaisia maasulkusuoja. Käyttömaadoittamattomissa laitoksissa käytetään laitoskohtaisia tai sähkömoottorikohtaisia maasulkusuoja.

Tuuletus. Useimmiten ovat sekä tehoasteet että moottorit varustettu erillisellä tuuletusjärjestelmällä. Tällöin näitä osia on suojattava tuuletuksen katoamiselta. Tehoasteet suojataan usein käyttökohtaisesti, kun taas moottorit varustetaan yhteisellä tuuletusjärjestelmällä ja yhteisellä laitoskohtaisella suojalla.

Apujännitteiden suojaus. Sähkömoottorikäyttö tarvitsee apujännitteitä ohjaus-, suojaus- ja muita apupiirejä varten. Apujännitepiirit suojataan oikosululta joko laitoskohtaisesti tai moottorikäyttökohtaisesti riippuen apujännitejärjestelmän laajuudesta. Sähkömoottorikäyttöjen apujännitteet voivat olla varmistettuja.

Prosessilaitteiden suojaus. Sähkömoottorikäytön käyttämät laitteet sisältävät ylikuormituksilta suojattavia laitteita, vaihteita, laakereita jne. Käytettävät laitteet voivat vaatia suojausta myös turvallisuussyistä. Nämä suojat laukaisevat tarpeen vaatiessa myös sähkömoottorikäytön.