

Sähköinen jarrutus



Sisällysluettelo

1.	Johdanto	5
1.1	Yleistä	5
1.2	Käyttösovellukset nopeuden ja momentin mukaan	5
2.	Jarrutustehon arvioiminen	7
2.1	Sähköisen jarrutuksen yleiset mitoitusperiaatteet	7
2.2	Kuormituksen perusteet	8
2.2.1	Vakiomomentti ja neliöllinen momentti	8
2.2.2	Jarrutusmomentin ja -tehon arvioiminen ...	8
2.2.3	Yhteenvedo ja johtopäätökset	12
3.	Käyttöjen sähköiset jarrutussovellukset	13
3.1	Moottorin vuojarrutus	13
3.2	Jarrukatkoja ja jarruvastus	14
3.2.1	Taajuusmuuttaja energiavarastona	14
3.2.2	Jarrukatkojan toimintaperiaate	15
3.3	Vastarinnankytketty tyristorisiltakokoonpano	17
3.4	IGBT-sillan kokoonpano	19
3.4.1	IGBT-pohjaisten verkkoonjarruttavien yksikköjen yleiset toimintaperiaatteet	19
3.4.2	IGBT-pohjainen verkkoonjarrutus -sääötavoitteet	19
3.4.3	Suora momentinsäätö suoran tehonsäädön muodossa	20
3.4.4	Verkkoonjarruttavan IGBT-yksikön mitoitus	22
3.5	Yhteinen tasavirtapiiri	22
4.	Sähköisten jarrutusmenetelmien kokonaiskustannusten arvioiminen	24
4.1	Välittömien energiakustannusten laskeminen	24
4.2	Investointikustannusten arvioiminen	24
4.3	Kokonaiskustannusten laskeminen	25
5.	Symbolit ja määritelmät	29
6.	Hakemisto	30

1.1 Yleistä

Tämä opas on jatkoa ABB:n teknisten oppaiden sarjaan. Oppaassa kerrotaan, millaisia ratkaisuja on saatavissa varastoituneen energian vähentämiseksi ja siirtämiseksi takaisin sähköiseksi energiaksi. Oppaan tarkoitus on antaa hyödyllisiä ohjeita erilaisiin jarrutusratkaisuihin.

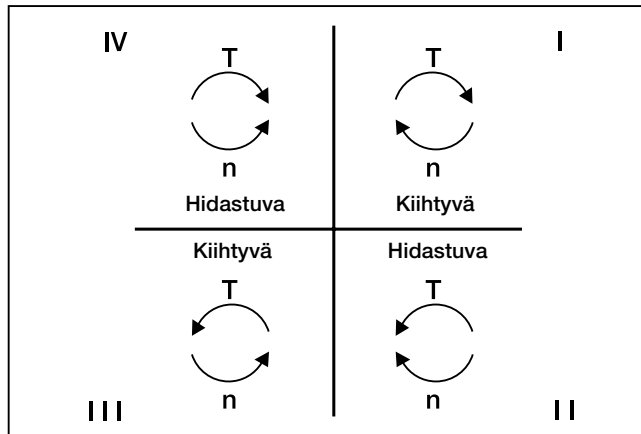
1.2 Käyttösovellukset nopeuden ja momentin mukaan

Käyttösovellukset voidaan jakaa kolmeen pääluokkaan nopeuden ja momentin mukaan. Yleisin vaihtovirtakäyttöjen sovellus on yhden kvadrantin sovellus, jossa nopeus ja momentti pyörivät aina samaan suuntaan ja teho (nopeus kertaa momentti) virtaa vaihtosuuntaajasta prosessiin. Tällaisia sovelluksia ovat esimerkiksi pumppu- ja puhallinsovellukset, joissa kuormitusmomentti käyttäytyy neliöllisesti. Näitä sovelluksia kutsutaankin yleensä neliöllisen momentin sovelluksiksi. Yhden kvadrantin sovellukset kuten puristimet tai kuljettimet voivat myös olla vakiomomenttisovelluksia, joissa kuormitusmomentti ei luonnostaan muutu nopeuden muuttuessa.

Toiseen luokkaan kuuluvat kahden kvadrantin sovellukset, joissa pyörimissuunta ei muutu, mutta momentin suunta voi muuttua. Tällöin teho voi virrata käytöstä moottoriin tai päinvastoin. Yhden kvadrantin käytöstä voi tulla kahden kvadrantin käyttö esimerkiksi silloin, jos puhaltimen nopeus hidastuu nopeammin kuin mitä mekaanisten häviöiden avulla olisi mahdollista. Monilla teollisuudenaloilla laitteen hätäpysäytys saattaa edellyttää kahden kvadrantin käyttöä vaikka itse prosessi vaatii yhden kvadrantin käytön.

Kolmas luokka koostuu neljän kvadrantin sovelluksista, joissa nopeuden ja momentin suunta voi vapaasti vaihdella. Tällaisia sovelluksia ovat paitsi hissit, vinssit ja nosturit myös monet prosessit kuten leikkaaminen, taivuttaminen, kutominen ja koneen testaus, jotka voivat vaatia toistuvia nopeuden ja momentin muutoksia. Esimerkkinä voidaan myös mainita yhden kvadrantin prosessit, kuten aukirullain tai ylhäältä alas kulkeva kuljetin, joissa teho virtaa pääasiallisesti laitteesta vaihtosuuntaajaan.

Yleisesti tiedetään, että energiansäästön kannalta vaihtovirtamoottorin ja vaihtosuuntaajan yhdistelmä on mekaanisia säätömenetelmiä kuten kuristusta parempi. Vähemmän huomiota on kuitenkin kiinnitetty siihen, että monissa prosesseissa teho voi luonnostaan virrata prosessista käyttöön. Kuinka tätä jarrutusenergiaa voitaisiin taloudellisimmin hyödyntää ei juurikaan ole mietitty.



Kuva 1.1 Käyttösovellukset nopeuden ja momentin mukaan.

Luku 2 - Jarrutustehon arvioiminen

2.1 Sähköisen jarrutuksen yleiset mitoitus- periaatteet

Jarrutustarpeen arvioiminen aloitetaan mekaniikasta. Mekaanista järjestelmää on yleensä jarrutettava tietyn ajan kuluessa tai prosessissa on eri kierrosnopeuksia, jolloin moottori toimii generaattorina joko vakionopeudella tai hieman vaihtelevalla nopeudella.

On tärkeää huomata, että sähköisessä jarrutuksessa käytetyt laitteet mitoitetaan jarrutustehon mukaan. Mekaaninen jarrutusteho riippuu jarrutusmomentista ja nopeudesta, kaava (2.1). Mitä suurempi nopeus sitä suurempi teho. Teho virtaa tietyllä jännitteellä ja virralla. Mitä suurempi jännite sitä vähemmän virtaa tarvitaan saman tehon aikaansaamiseksi, kaava (2.2). Virta on ensisijainen pienjännitteisten vaihtovirtakäyttöjen kustannuksia määrittävä tekijä.

Kaavassa (2.2) on merkintä $\cos\phi$, joka ottaa huomioon moottorin magnetointiin käytettävän virran.

Toisaalta moottorin magnetointivirta ei tule muuttajaa syöttävästä vaihtovirtalähteestä eli vaihtosuuntaajaan syötettävä virta on pienempi kuin moottoriin syötettävä virta. Tämä tarkoittaa, että syöttävällä puolella $\cos\phi$ on yleensä lähellä arvoa 1,0. Kaavassa (2.2) on oletettu, että häviötä ei esiinny, kun tasavirta muunnetaan vaihtovirraksi. Vaikka muutoksessa syntyy jonkin verran häviötä, tässä se voidaan jättää huomiotta.

$$P_{mek} = T * \omega = T * \frac{n}{60} * 2 \pi \quad (2.1)$$

$$P_{sähköinen} = U_{DC} * I_{DC} = \sqrt{3} * U_{AC} * I_{AC} * \cos\phi \quad (2.2)$$

2.2 Kuormituksen perusteet

Kuormitus jaetaan yleensä vakiomomenttiin tai neliölliseen momenttiin. Neliöllinen kuormitusmomentti tarkoittaa, että kuormitusmomentti on verrannollinen nopeuden neliöön. Se tarkoittaa myös, että teho on verrannollinen nopeuden kuutioon. Vakiomomenttisovelluksissa teho on suoraan verrannollinen nopeuteen.

2.2.1 Vakiomomentti ja neliöllinen momentti

Vakiomomentti:

C: vakio

$$T_{\text{kuorma}} = C \quad (2.3)$$

$$P_{\text{kuorma}} = T * \omega = C * \omega \quad (2.4)$$

Neliöllinen momentti:

$$T_{\text{kuorma}} = C * \omega^2 \quad (2.5)$$

$$P_{\text{kuorma}} = T * \omega = C * \omega^2 * \omega = C * \omega^3 \quad (2.6)$$

2.2.2 Jarrutus- momentin ja -tehon arvioiminen

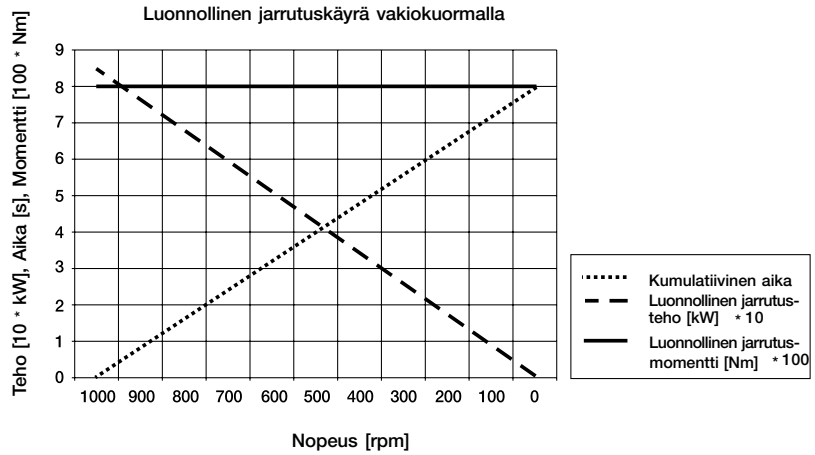
Pysyvässä tilassa (kulmakiikhtyvyys α on nolla) moottorin on tuotettava kitkamomentti, joka on yleensä verrannollinen kulmanopeuteen, sekä kuormitusmomentti tällä tietyllä kulmanopeudella. Jarrutusmomentin ja -tehon tarve ajan suhteen on erilainen vakiomomentin ja neliöllisen momentin kuormitustyypeissä.

$$T_{\text{moottori}} = -[J * \alpha + \beta * W + T_{\text{kuorma}}(\omega)] \quad (2.7)$$

Otetaan esimerkiksi tapaus, jossa kuormitus on tyypiltään *vakiomomentti* eikä käyttö pysty luomaan jarrutusmomenttia eli kyseessä on yhden kvadrantin käyttö. Tarvittava jarrutusaika voidaan laskea seuraavalla kaavalla. Kaavassa (2.7) on huomioitu, että hitausmomentin kiihdyttämiseen (tai hidastamiseen) tarvittava momentti, kitka ja kuormitusmomentti vaikuttavat vastakkaiseen suuntaan kuin moottorin momentti.

$$0 = -[J * \alpha + \beta * W + T_{\text{kuorma}}(\omega)] \quad (2.8)$$

Käytännössä on vaikea tarkkaan määritellä kitkan vaikutusta. Jos kitkaksi oletetaan nolla, jarrutusaika voidaan laskea riittävän tarkasti.



Kuva 2.1 Kumulatiivinen jarrutusaika, jarrutuksen kuormitusteho ja momentti nopeuden funktiona.

$$T_{\text{kuorma}}(\omega) = J * \alpha = J * \frac{(\omega_{\text{alussa}} - \omega_{\text{lopussa}})}{t} = J * \frac{(n_{\text{alussa}} - n_{\text{lopussa}}) * 2 \pi}{t * 60} \quad (2.9)$$

Ratkaisemalla t päädytään seuraavaan kaavaan:

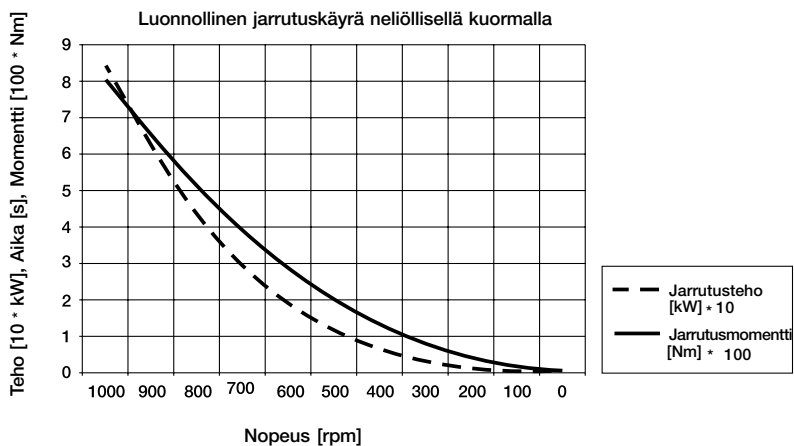
$$t = J * \frac{(n_{\text{alussa}} - n_{\text{lopussa}}) * 2 \pi}{60 * T_{\text{kuorma}}(\omega)} \quad (2.10)$$

Jos oletetaan, että kuormituksen hitausmomentti on 60 kgm^2 ja kuormitusmomentti 800 Nm koko nopeusalueella, kuormituksen pyörimisnopeus on 1000 rpm ja moottorin momentti asetetaan nolaksi, kuormitus siirtyy nollanopeudelle ajassa:

$$t = J * \frac{(n_{\text{alussa}} - n_{\text{lopussa}}) * 2 \pi}{60 * T_{\text{kuorma}}(\omega)} = 60 * \frac{(1000 - 0) * 2 \pi}{60 * 800} = 7.85 \text{ s} \quad (2.11)$$

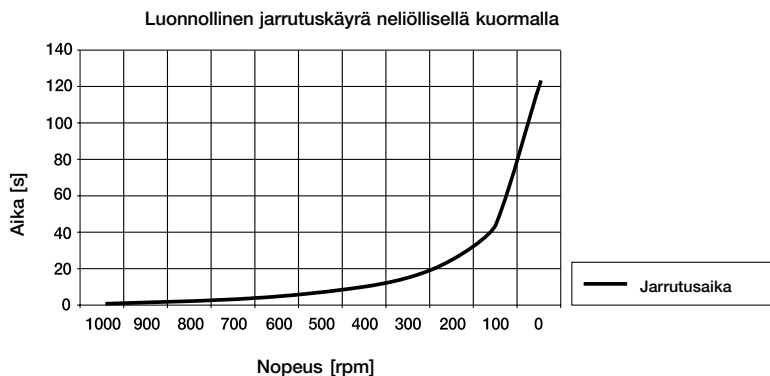
Tämä pätee sovelluksissa, joissa kuormitusmomentti säilyy vakiona jarrutuksen alkaessa. Jos kuormitusmomentti häviää (esimerkiksi kuljettimen hihna on rikki), mekaniikan kineettinen energia säilyy ennallaan eikä kuormitusmomentti hidasta mekaniikkaa. Jos moottori ei tällöin jarruta, nopeus vain hidastuu mekaanisen kitkan seurauksena.

Tarkastellaan nyt tilannetta, jossa hitausmomentti on sama ja kuormitusmomentti on 1000 rpm , mutta **kuormitusmomentti muuttuu neliöllisesti**. Jos moottorin momentti asetetaan nolnaan, kuormitusmomentti alenee neliöllisesti suhteessa nopeuteen. Jos kumulatiivinen jarrutusaika esitetään nopeuden funktiona, luonnollinen jarrutusaika alhaisella nopeudella esimerkiksi 200 rpm :stä 100 rpm :ään kasvaa dramaattisesti verrattuna nopeuden muutokseen 1000 rpm :stä 900 rpm :ään.



Kuva 2.2 90 kW:n puhaltimen luonnollinen jarrutuskäyrä, jarrutuksen kuormitusteho ja momentti nopeuden funktiona.

Luonnollinen jarrutuskäyrä voidaan piirtää helposti nimellispisteessä olevan tehon ja nopeuden avulla käyttämällä kaavoja (2.5) ja (2.6).



Kuva 2.3 Kumulatiivinen jarrutusaika esimerkiksi 90 kW:n puhaltimessa.

Seuraavaksi tarkastellaan tapausta, jossa mekaanisen järjestelmän on pysähdyttävä tietyn ajan kuluessa tietystä alku nopeudesta.

90 kW:n puhaltimen hitausmomentti on 60 kgm^2 . Puhaltimen toiminnan nimellispiste on 1000 rpm. Puhaltimen on pysähdyttävä 20 sekunnin kuluessa. Kuormitusominaisuuksien aikaansaama luonnollinen jarrutusvaikutus on suurimmillaan jarrutuksen alussa. Hitausmomentin liike-energia voidaan laskea kaavalla (2.12). Keskimääräinen jarrutusteho voidaan laskea jakamalla liike-energia halutulla jarrutusajalla. Saatu arvo on vähintäänkin riittävä, sillä puhaltimen luonnollista jarrutusta ei oteta huomioon.

$$W_{\text{kin}} = \frac{1}{2} * J * \omega^2 = \frac{1}{2} * J * \left(\frac{n}{60} * 2 \pi \right)^2 = P * t \quad (2.12)$$

$$P = \frac{1}{2} * J * \left(\frac{n}{60} * 2 \pi \right)^2 * \frac{1}{t} =$$

$$\frac{1}{2} * 60 * \left(\frac{1000}{60} * 2 \pi \right)^2 * \frac{1}{20} = 16,4 \text{ kW} \quad (2.13)$$

Kun jarrukatkoja on mitoitettu arvoon 16,4 kW ja moottorin jarrutuskyky suurilla nopeuksilla on reilusti yli 16,4 kW, käytössä on oltava jarrutuksen maksimitehon valvonta. Tällainen toiminto on saatavissa joihinkin käyttöihin.

Jos halutaan optimoida jarrukatkojen mitoitusta, voidaan aloittaa tarkastelemalla kuvaa (2.3). Nopeus vähenee nopeasti 1000 rpm:stä 500 rpm:ään ilman lisäjarrutusta. Luonnollinen jarrutusvaikutus on suurimmillaan jarrutuksen alussa. Moottorin jarrutusta ei siis ole tarpeen aloittaa edellä mainitulla 16 kW:n teholla. Kuten kuvasta (2.3) nähdään, nopeus laskee 1000 rpm:stä 500 rpm:ään ilman lisäjarrutusta alle 10 sekunnissa. Tässä esimerkissä 10 sekunnin kuluttua kuormitusmomentti on 25 % nimellismomentista ja puhaltimen kineettinen energia on vain 25 % verrattuna energiaan 1000 rpm:n pyörimisnopeudella. Jos 1000 rpm:n pyörimisnopeudella tehdyt laskelmat toistetaan 500 rpm:n nopeudella, huomataan, että hidastus 500 rpm:stä 0 rpm:ään saavutetaan noin 8 kW:n jarrutusteholla. Edellisten laskelmien tavoin tämäkin arvo on riittävän luotettava, sillä kuormituksen aiheuttamaa luonnollista jarrutuskäyrää ei oteta huomioon.

Yhteenvetona voidaan todeta, että tavoitteena oleva 20 sekunnin hidastus 1000 rpm:stä 0 rpm:ään onnistuu helposti, jos jarrukatkoja ja -vastus mitoitetaan arvoon 8,2 kW. Käytön jarrutustehon rajaksi asetetaan tällöin 8,2 kW.

$$W_{\text{kin}} = \frac{1}{2} * J * \omega^2 = \frac{1}{2} * J * \left(\frac{n}{60} * 2 \pi \right)^2 = P * t \quad (2.14)$$

$$P = \frac{1}{2} * J * \left(\frac{n}{60} * 2 \pi \right)^2 * \frac{1}{t} =$$

$$\frac{1}{2} * 60 * \left(\frac{500}{60} * 2 \pi \right)^2 * \frac{1}{10} = 8,2 \text{ kW} \quad (2.15)$$

2.2.3 Yhteenveto ja johtopäätökset

Kuormitustyyppinä on kahdenlaisia: vakiokuormitusmomentti ja neliöllinen kuormitusmomentti.

Vakiomomenttisolvellus:

- Kuormitusmomentti ei ole riippuvainen nopeudesta. Kuormitusmomentti säilyy lähes samana koko nopeusalueella.
- Teho kasvaa lineaarisesti nopeuden lisääntyessä ja päinvastoin.
- Tyypillisiä vakiomomenttisolvelluksia ovat nosturit ja kuljettimet.

Neliöllisen momentin sovellus:

- Kuormitusmomentti kasvaa suhteessa nopeus potenssiin kaksi.
- Nopeuden lisääntyessä teho kasvaa suhteessa nopeus potenssiin kolme.
- Tyypillisiä neliöllisen momentin sovelluksia ovat puhaltimet ja pumpput.

Jarrutustehon arvioiminen:

- Neliölliselle kuormalle on ominaista nopea luonnollinen hidastus 50 - 100 prosentin nimellisnopeuksilla. Tätä tulisi hyödyntää tarvittavaa jarrutustehoa mitoitettaessa.
- Neliöllinen kuormitusmomentti tarkoittaa, että alhaisilla nopeuksilla luonnollinen hidastus johtuu pääasiassa kitkasta.
- Vakiokuormitusmomentille on ominaista vakiohidastuvuus.
- Jarrutusteho on momentin ja nopeuden funktio tietyssä toimintapisteessä. Jarrukatkojan mitoitus jarrutuksen huipputehon mukaan johtaa yleensä ylimitoitukseen.
- Jarrutusteho sinänsä ei ole moottorin nimellisvirran (momentti) tai tehon funktio.
- Jos kuormitusmomentti katoaa jarrutuksen alkaessa, luonnollisen jarrutuksen vaikutus on pieni. Tämä taas vaikuttaa jarrukatkojan mitoitukseen.

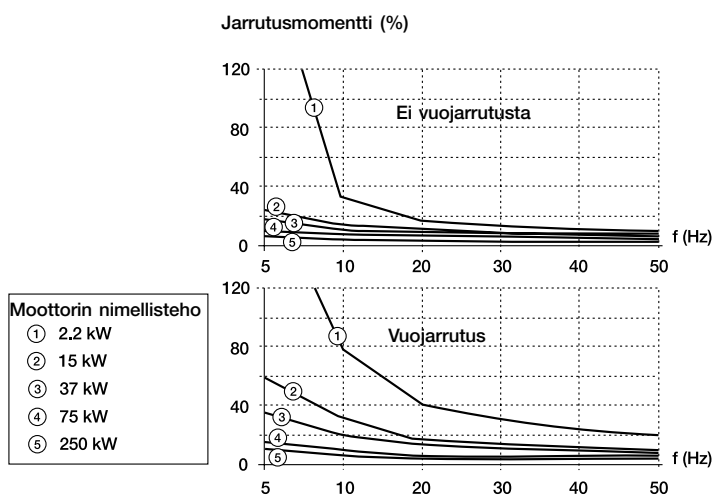
Luku 3 - Käyttöjen sähköiset jarrutussovellukset

Nykyaikainen vaihtovirtakäyttö koostuu syöttötasasuuntaajasta, joka muuntaa vaihtojännitteen tasavirtakondensattoreihin varastoiduksi tasajännitteeksi. Vaihtosuuntaaja muuntaa tasajännitteen takaisin vaihtojännitteeksi ja syöttää vaihtovirtamoottoriin halutun taajuuden. Tarvittava teho virtaa tasasuuntaajan, tasajännitevälipiirin ja vaihtosuuntaajan kautta moottoriin. Tasavirtakondensattoreihin varastoitunut energia on hyvin pieni verrattuna tarvittavaan tehoon, joten tasasuuntaajan on jatkuvasti huolehdittava moottorin tarvitsemasta tehosta sekä sähkökäytön häviöistä.

3.1 Moottorin vuojarutus

Vuojarrutus on moottorin häviöihin perustuva jarrutusmenetelmä. Kun sähkökäytössä tarvitaan jarrutusta, vuota ja siten myös moottorissa käytettyä magnetointivirtaa kasvatetaan. Vuota voidaan helposti säätää suoran momentinsäädön (DTC) avulla (lisätietoja on Teknisessä oppaassa nro 1). Kun vaihtosuuntaajaa säädetään suoralla momentinsäädöllä, moottori saavuttaa halutun momentin ja vuon. Vuojarrutuksen aikana suora momentinsäätö varmistaa, että jarrutus voidaan tehdä tietyn nopeusrampin mukaisesti. Vuojarrutus eroaa huomattavasti käytöille tyypillisestä DC-jarrutuksesta. DC-jarrutuksessa tasavirtaa syötetään moottoriin ja moottorivuon säätö häviää jarrutuksen aikana. Suoraan momentinsäätöön perustuva vuojarutus tarjoaa moottorille mahdollisuuden vaihtaa tarvittaessa nopeasti jarrutustehosta moottoritehoon.

Vuojarrutuksessa virrankasvu aiheuttaa lisähäviöitä moottorin sisällä. Myös moottorin jarrutusteho kasvaa, vaikka taajuusmuuttajan jarrutusteho ei kasva. Virrankasvu luo lisähäviöitä moottorin vastuksissa. Mitä suurempi vastusarvo on, sitä suurempi on jarrutusenergian häviö moottorin sisällä. Yleensä pienitehoisissa moottoreissa (alle 5 kW) moottorin vastusarvo on suhteellisen suuri suhteessa moottorin nimellisvirtaan. Mitä suurempi moottorin teho tai jännite on, sitä pienempi on moottorin vastusarvo suhteessa moottorivirtaan. Toisin sanoen vuojarutus on tehokkainta pienitehoisissa moottoreissa.



Kuva 3.1 Moottorin jarrutusmomentin osuus nimellismomentista lähtötaajuuden funktiona.

Vuojaarrutuksen suurimmat edut:

- Suoraa momentinsäätöä käytettäessä ei tarvita lisäkomponentteja eikä lisäkustannuksia synny.
- Moottoria säädetään jarrutuksen aikana toisin kuin käytöille tyypillisessä DC-jarrutuksessa.

Vuojaarrutuksen suurimmat haitat:

- Moottoriin kohdistuu kasvava lämpörasitus, jos jarrutus toistetaan lyhyin aikaväleihin.
- Moottorin ominaisuudet kuten esimerkiksi vastusarvo rajoittavat jarrutustehoa.
- Vuojaarrutus on tehokasta erityisesti pienitehoisissa moottoreissa.

3.2 Jarrukatkoja ja jarruvastus

3.2.1 Taajuusmuuttaja energiavarastona

Vakiokäytöissä tasasuuntaaja on yleensä 6-pulssinen tai 12-pulssinen dioditasasuuntaaja, joka kykenee siirtämään tehoa vaihtovirtaverkosta tasajännitevälipiiriin, mutta ei päinvastoin. Jos tehovirtaus muuttuu, kuten kahden tai neljän kvadrantin sovelluksissa, prosessin syöttämä teho varaa tasavirtakondensaattorit kaavan (3.1) mukaisesti ja välipiiriin tasajännite alkaa kasvaa. Kapasitanssin C arvo on vaihtovirtakäytössä suhteellisen alhainen, mikä johtaa nopeaan jännitteen nousuun. Taajuusmuuttajan komponentit kuitenkin kestävät vain tietyn tasoisen jännitteen.

$$W = P * t = \frac{C * U_{dc}^2}{2} \quad (3.1)$$

$$U_{dc} = \sqrt{\frac{2 * W}{C}} = \sqrt{\frac{2 * P * t}{C}} \quad (3.2)$$

Välipiirin tasajännitteen liiallinen nousu voidaan estää kahdella tavalla: vaihtosuuntaaja itse estää tehovirtauksen prosessista taajuusmuuttajaan. Tämä tapahtuu rajoittamalla jarrutusmomenttia välipiirin vakiojännitetason säilyttämiseksi. Menetelmää kutsutaan ylijännitesäädöksi, ja se on useimmissa käytöissä vakio-ominaisuus. Tällöin laitteen jarrutusprofiili ei kuitenkaan ole käyttäjän määrittelemän nopeusrampin mukainen.

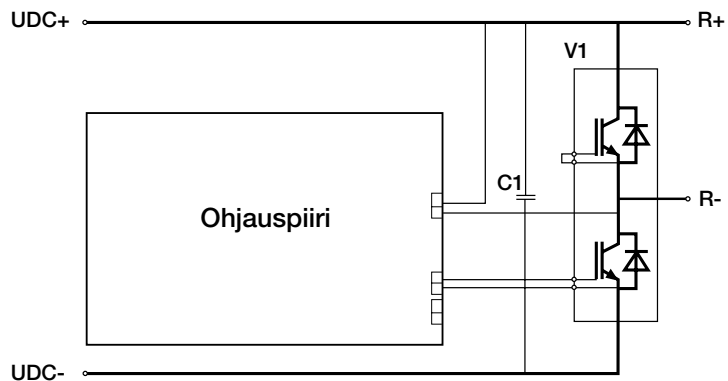
Vaihtosuuntaajan energiavaraston kapasiteetti on yleensä hyvin pieni. Esimerkiksi 90 kW:n käytön kapasiteetti on tavallisesti 5 mF. Jos käyttöön syötetään 400 V AC, välipiirin tasajännitteen arvo on $1,35 * 400 = 565$ V DC. Jos oletetaan, että kondensaattorit kestävät enintään 735 V DC, voidaan aika, joka kuluu 90 kW:n nimellistehon syöttämiseen tasavirta-kondensaattoriin laskea kaavasta:

$$t = \frac{C * U_{dc}^2}{2 * P} = \frac{5 * 10^{-3} * (735^2 - 565^2)}{2 * 90 * 10^3} = 6 \text{ ms} \quad (3.3)$$

Tämä arvo pätee yleensä kaikkiin uusiin pienijännitteisiin vaihtovirtakäyttöihin nimellistehosta riippumatta. Käytännössä se tarkoittaa, että ylijännitesäätimen ja sen ”työhevosen” eli vaihtovirtamoottorin momenttisäätimen, on oltava erittäin nopea. Vastaavasti myös verkkoonjarrutuksen aktivoinnin ja jarrukatkojan on oltava erittäin nopeita.

3.2.2 Jarrukatkojan toimintaperiaate

Välipiirin tasajännitteen liiallista nousua voidaan rajoittaa myös johtamalla jarrutusenergia vastukseen jarrukatkojan kautta. Jarrukatkoja on elektroninen kytkin, joka liittyy välipiirin tasajännitteen vastukseen, jossa jarrutusenergia muunnetaan lämmöksi. Jarrukatkojat aktivoituvat automaattisesti, kun välipiirin tasajännite ylittää tietyn vaihtosuuntaajan nimellisjännitteeseen verrannollisen rajan.



Kuva 3.2 Esimerkki jarrukatkojan piirikaaviosta. UDC tarkoittaa tasajännitevälipiirin liittimiä ja R vastuksen liittimiä.

Jarrukatkojan ja -vastuksen suurimmat edut ovat:

- Yksinkertainen elektroninen rakenne ja tunnettu tekniikka.
- Katkojan ja vastuksen alhaiset peruskustannukset.
- Katkoja toimii, vaikka vaihtovirran syöttö olisi poikki. Jarrutusta voidaan tarvita sähkökatkoksen aikana, esim. hisseissä tai muissa turvallisuuden suhteen kriittisissä sovelluksissa.

Jarrukatkojan ja -vastuksen suurimmat haitat ovat:

- Jarrutusenergia menee hukkaan, jos lämmitettyä ilmaa ei voida hyödyntää.
- Jarrukatkoja ja -vastukset vaativat tilaa.
- Lisäinvestointeja voidaan tarvita jäähdytyksen ja lämmön talteenottojärjestelmään.
- Jarrukatkojat mitoitetaan yleensä tietylle jaksolle, esim. 100 % teho yhden minuutin ajan 10 minuutin välein, pitkät jarrutusajat vaativat jarrukatkojan tarkempaa mitoitusta.
- Palovaara kasvaa kuumen vastuksen ja ympäröivässä ilmassa mahdollisesti olevan pölyn ja kemiallisten ainesosien seurauksena.
- Jarrutuksen aikana kasvanut välipiirin tasajännite aiheuttaa ylimääräistä jänniterasitusta moottorin eristykselle.

Milloin jarrukatkojaa käytetään:

- Jarrutusta tarvitaan satunnaisesti.
- Jarrutusenergian määrä suhteessa moottoripuolen energiaan on erittäin pieni.
- Jarrutustoimintoa tarvitaan sähkökatkoksen aikana.

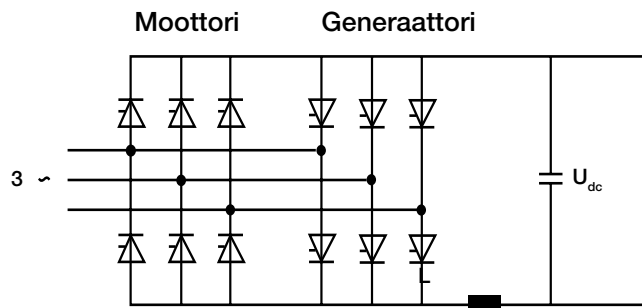
Milloin on syytä harkita muita ratkaisuja jarrukatkojan ja -vastuksen sijaan:

- Jarrutus on jatkuvaa tai säännöllisesti toistuvaa.
- Jarrutusenergian kokonaismäärä on suuri suhteessa tarvittavaan moottorienergiaan.
- Hetkellinen jarrutusteho on suuri, esim. useita satoja kilowatteja useiden minuuttien aikana.
- Ympärillä olevassa ilmassa on huomattava määrä pölyä tai muita mahdollisesti tulenarkoja, räjähdysalttiita tai metallisia ainesosia.

3.3 Vastarinnan- kytketty tyristorisilta- kokoonpano

Taajuusmuuttajan dioditasasuuntaussillat voidaan korvata kahdella vastarinnankytketyllä tyristoritasasuuntaajalla. Tällaisen kokoonpanon avulla tasasuuntaussiltaa voidaan vaihtaa prosessin tarvitseman tehovirtauksen mukaan.

Tyristorisyöttöyksikön tärkeimmät osat ovat kaksi 6-pulssista tyristorisiltaa. Moottorisilta muuntaa syötetyn 3-vaiheisen vaihtovirran tasavirraksi. Se syöttää tehoa käyttöihin (vaihtosuuntaajiin) välipiirin kautta. Generaattorisilta muuntaa tasavirran takaisin vaihtovirraksi, kun on tarvetta siirtää moottorin jarrutustehon ylijäämä takaisin syöttöverkkoon.



Kuva 3.3 Vastarinnankytketyn tyristorisyöttöyksikön kaavio.

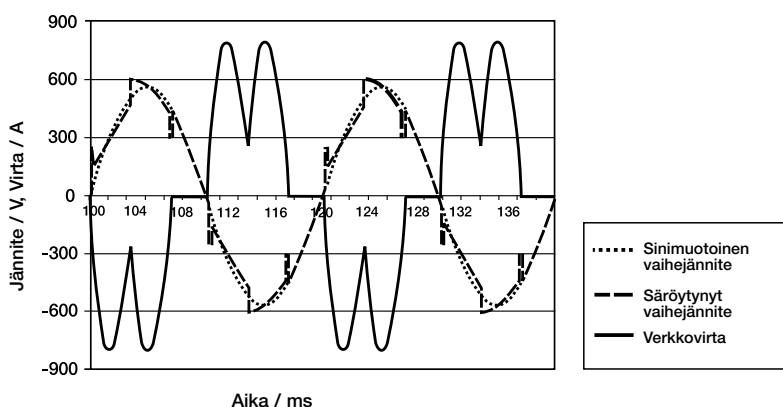
Vain yksi silta toimii kerrallaan, jolloin toisen sillan toiminta on estetty. Tyristorin syttymishetkeä (ohjauskulma) säädellään jatkuvasti välipiirin jännitteen pitämiseksi halutulla tasolla. Moottori/generaattorisillan valinta ja välipiirin jännitteen säätö perustuvat syöttövirran, syöttöjännitteen ja välipiirin jännitteen mittaukseen. Tasavirtakuristin suodattaa välipiirin virtapiikit.

Vastarinnankytketyn tyristorisillan suurimmat edut ovat:

- Tunnettu ratkaisu.
- Tarvitaan vähemmän investointeja kuin IGBT-ratkaisussa.
- Tasajännitettä voidaan säätää pienemmäksi kuin verkossa. Tämä on etu tietyissä erikoissovelluksissa.

Vastarinnankytketyn tyristorisillan suurimmat haitat ovat:

- Kommutointimarginaalin säilyttämiseksi välipiirin tasajännite on aina alhaisempi kuin syötetty vaihtojännite. Moottoriin syötetty jännite pysyy siten alhaisempana kuin syötettävä vaihtojännite. Tämä voidaan kuitenkin välttää käyttämällä syöttöyksikössä jänniteennostomuuntajaa.
- Jos jännitesyöttö häviää, sulake saattaa palaa tyristorin estyneen kommutoinnin seurauksena.
- $\cos\phi$ vaihtelee kuormituksen mukaan.
- Harmoninen kokonaissärö on suurempi kuin verkkoonjarruttavissa IGBT-yksiköissä.
- Verkkovirran särö voi aiheuttaa ei-toivotun jännitesärön, jonka määrä riippuu syöttävän verkon impedanssista.
- Jarrutus ei ole mahdollista sähkökatkoksen aikana.



Kuva 3.4. Esimerkki vastarinnankytketyn sillan virran ja jännitteen aaltomuodoista jarrutuksen aikana.

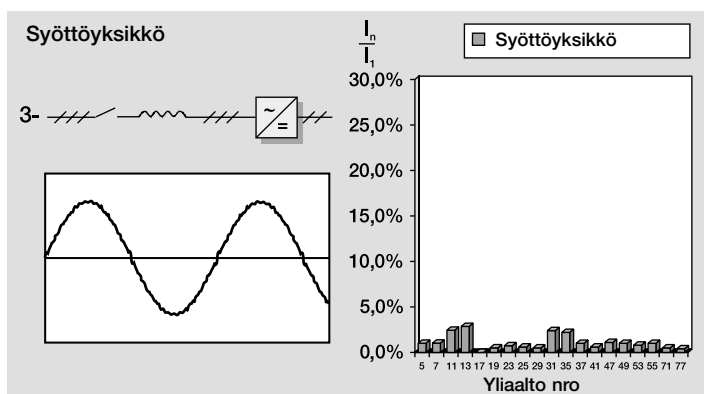
3.4 IGBT-sillan kokoonpano

3.4.1 IGBT - pohjaisten verkkoonjarruttavien yksikköjen yleiset toiminta-periaatteet

IGBT-pohjainen verkkoonjarrutus perustuu samoille periaatteille kuin tehonsiirto verkossa. Verkossa useita generaattoreita ja kuormituspisteitä on kytketty toisiinsa. Voidaan olettaa, että kytkentäpisteessä verkko on suuri kiinteätaajuinen tahtigeneraattori. Käytön IGBT-tulosiltaa (jäljempänä verkkosuuntaaja) voidaan pitää toisena kuristimen kautta generaattoriin kytkettynä vaihtojännitejärjestelmänä. Tehonsiirto kahden vaihtovirtajärjestelmän välillä, joiden jännite on U ja jotka on kytketty toisiinsa, voidaan laskea alla olevalla kaavalla (3.4).

$$P = \frac{U_{\text{verkko}} * U_{\text{suuntaaja}}}{X} \sin \delta \quad (3.4)$$

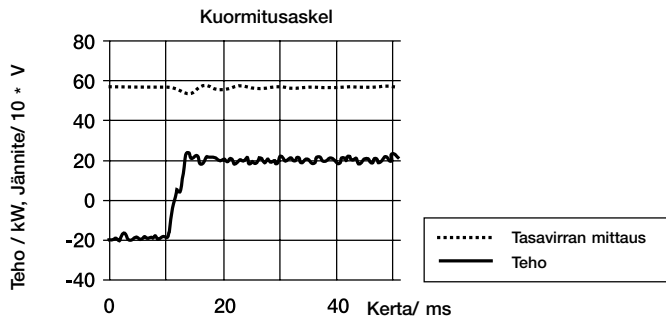
Kaava osoittaa, että tehon siirtämiseksi näiden kahden vaihtovirtajärjestelmän välisessä jännitekulmassa on oltava vaihe-ero. Järjestelmien välisen tehovirtauksen säätämiseksi kulmaa on säädettävä.



Kuva 3.5. Tyypillinen verkkovirran aaltomuoto ja yliaallot IGBT-syöttöyksikössä.

3.4.2 IGBT-pohjainen verkkoonjarrutus - säätötavoitteet

IGBT-pohjaisilla verkkoonjarrutusyksiköillä on kolme yleistä säätötavoitetta. Ensimmäinen tavoite on pitää välipiirin tasajännite vakana tehovirtauksen absoluuttiarvosta ja suunnasta riippumatta. Näin varmistetaan, että vaihtovirtamoottoreita syöttävät vaihtosuuntaajat voivat toimia optimaalisella tavalla toimintapisteestä huolimatta. Välipiirin tasajännite on vakaa, kun välipiiriin tuleva tehovirtaus vastaa välipiiristä lähtevää tehovirtausta. Sopiva tehovirtaus saavutetaan säätämällä kahden vaihtovirtajärjestelmän välistä tehokulmaa.



Kuva 3.6. Nopea muutos verkkoonjarrutus tilasta moottoritilaan. Huomaa kuinka vakaana välipiirin tasajännite säilyy muutoksen aikana.

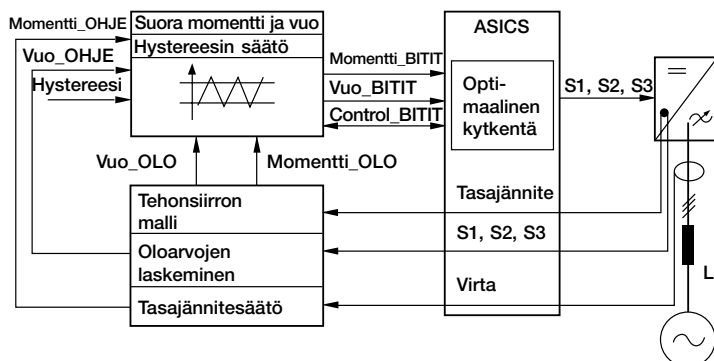
Säädön toinen tavoite on minimoida tarvittava syöttövirta eli toimia pisteessä $\cos\phi = 1,0$. Tavoite saavutetaan säätämällä verkkosuuntaajan lähtöjännitettä. Joissakin sovelluksissa IGBT-verkkosuuntaajan halutaan toimivan myös induktiivisena tai kapasitiivisena kuormana.

Säädön kolmas tavoite on minimoida syöttövirran yliaaltosisältö. Tärkein suunnittelukriteeri on kuristimen impedanssiarvo ja sopiva säätömenetelmä.

3.4.3 Suora momentin-säätö suoran tehonsäädön muodossa

Suorassa momentinsäädössä (DTC) säädetään vaihtosuuntaajalla syötettävää vaihtovirtamoottoria. Säädössä IGBT-kytkimet kytkeytyvät päälle ja pois vaihtovirtamoottorin momentin ja käyttäjän ohjemomentin välisen eron perusteella (Tekninen opas nro 1). Samaa periaatetta voidaan soveltaa verkkosuuntaajaan, joka säätää tehovirtausta verkosta käyttöön ja päinvastoin. Teho on momentti kerrottuna kulmataajuudella, joka verkossa on vakio. Momentin säätäminen tarkoittaa siis myös tehovirtauksen säätämistä.

$$P = \frac{U_i U_c}{X} \sin\delta = |T| |\omega| \quad (3.5)$$

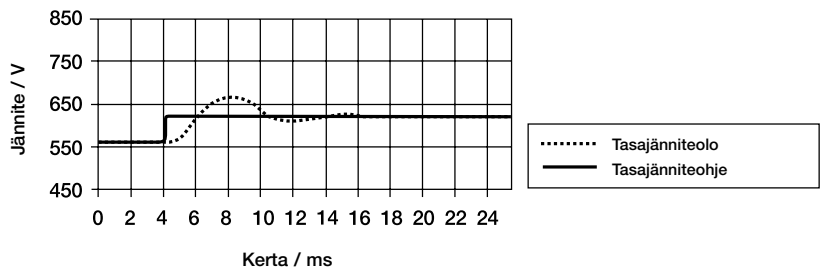


Kuva 3.7. Suoraan momentinsäätöön perustuvan verkkoonjarruttavan IGBT-yksikön peruskaavio.

Suora momentinsäätö yhdistettynä IGBT-tekniikkaan tuottaa vain vähän virtayliaaltoja. IGBT-syöttöyksikköä voidaan käyttää korvaamaan yksikvadranttinen 12- tai 18-pulssinen syöttöyksikkö, jota käytetään tavallisesti virtayliaaltojen vähentämiseen syöttöpuolella. IGBT-syöttöyksikkö sopii ratkaisuksi tapauksiin, joissa on tärkeämpää ottaa huomioon virtayliaallot kuin jarrutusenergian käsittely.

Verkkoonjarruttavan IGBT-yksikön suurimmat edut ovat:

- Syöttövirran yliaaltojen alhainen määrä sekä moottori- että verkkoonjarrutustilassa.
- Hyvä dynamiikka tehovirtauksen muuttuessa nopeasti.
- Mahdollisuus nostaa tasajännitettä syötettävää vaihtojännitettä suuremmaksi. Näin voidaan kompensoida heikkoa verkkoa tai lisätä moottorin maksimimomenttia kentänheikennysalueella.
- Järjestelmän jännitehäviöiden kompensointi jännitteen nostokyvyn ansiosta.
- Mahdollisuus säätää tehokerrointa.
- Verkkokatkossäätö automaattisella synkronoitumisella verkkoon.
- Välipiirin tasajännite on suunnilleen sama moottori- ja jarrutustilassa. Jarrutus ei aiheuta moottorin eristyksille ylimääräistä jänniterasitusta.



Kuva 3.8. Syöttöjännitteen nostaminen.

Verkkoonjarruttavan IGBT-yksikön suurimmat haitat:

- Suuremmat investointikustannukset.
- Jarrutus ei ole käytettävissä sähkökatkoksen aikana.
- Korkeasta kytkentätaajuudesta johtuvat suuritaajuiset jänniteylliaallot. Nämä usean kilohertsin jännitekomponentit voivat herättää muiden sähkölaitteiden pienet kondensaattorit. Eri laitteita syöttävien muuntajien sopivalla suunnittelulla ja järjestelyllä tällaiset ilmiöt voidaan poistaa.

Verkkoonjarruttavaa IGBT-yksikköä käytetään, kun:

- jarrutus on jatkuvaa tai usein toistuvaa.
- jarrutusteho on suuri.
- saavutetaan tilansäästöä jarruvastusratkaisuun verrattuna.
- verkon yliaaltorajat ovat kriittisiä.

3.4.4 Verkkoonjarruttavan IGBT-yksikön mitoitus

IGBT-yksikön syöttövirta mitoitetaan tarvittavan tehon perusteella. Oletetaan, että tarvittava moottoriakselin teho on 130 kW ja jarrutusteho 100 kW. IGBT-syöttöyksikkö mitoitetaan valitsemalla moottori- tai jarrutustehon maksimiarvo, tässä tapauksessa 130 kW. Moottorijännite on 400 V. Syöttöverkon minimiarvoksi oletetaan 370 V.

Jännitenosto-ominaisuutta voidaan hyödyntää; välipiirin tasajännite nostetaan vastaamaan 400 V:n vaihtojännitettä. Vaadittu syöttövirta lasketaan kuitenkin 370 V:n perusteella. Jos oletetaan, että moottorin ja käytön kokonaishäviöt ovat 5%, verkosta tarvittava kokonaisteho on 136,5 kW. Syöttövirta voidaan laskea kaavasta:

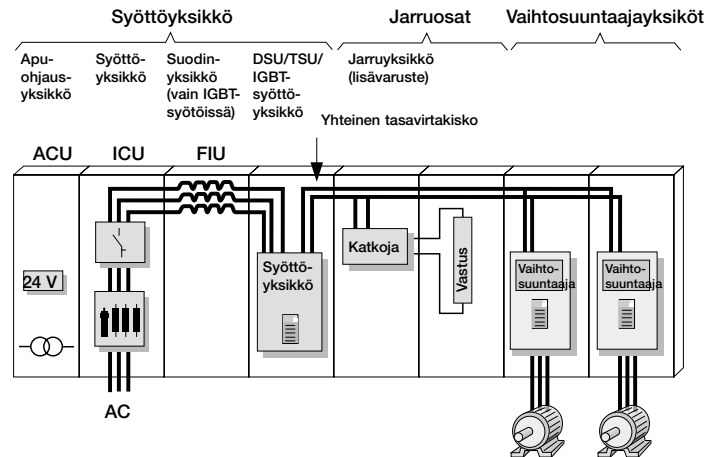
$$I_{\text{syöttö}} = \frac{P}{\sqrt{3} * U_{\text{syöttö}}} = \frac{136,5 \text{ kW}}{\sqrt{3} * 370 \text{ V}} = 213 \text{ A} \quad (3.6)$$

Verkkoonjarruttava IGBT-yksikkö valitaan ainoastaan lasketun virran perusteella.

3.5 Yhteinen tasavirtapiiri

Kun prosessi koostuu useista käytöistä, joissa yksi moottori voi tarvita jarrustointia, kun taas toiset toimivat moottoritasavirtakiskossa, yhteinen tasavirtakisko on erittäin tehokas tapa käyttää mekaaninen energia uudelleen. Yhteistä tasavirtakiskoa käyttävä sähkökäyttö koostuu erillisestä syöttötasasuuntaajasta, joka muuntaa vaihtovirran tasavirraksi ja vaihtosuuntaajista, jotka syöttävät yhteiseen tasavirtakiskoon kytkettyjä vaihtovirtamoottoreita. Tasavirtakisko on siis kanava, jonka kautta yhden moottorin

jarrutusenergia siirtyy hyödyntämään toisia moottoreita. Yhteisen tasavirtakiskon perusrakenne näkyy kuvassa (3.9).



Kuva 3.9. Yhteisen tasavirtakiskon perusrakenne.

Yhteisen tasavirtakiskon suurimmat edut ovat:

- Tehovirtauksen helppo tasaaminen käyttäjien välillä.
- Pienet häviöt jarrutusenergian hyödyntämisessä yhteisen tasavirtakiskon ansiosta.
- Vaikka hetkellinen jarrutusteho on suurempi kuin moottoriteho, jarrukatkojaa ja -vastusta ei tarvitse mitoittaa täyden jarrutustehon mukaan.
- Jos jarrutustehoa tarvitaan pitempiaikaisesti, voidaan käyttää tasasuuntaajyhdistelmää.

Yhteisen tasavirtakiskon suurimmat haitat käytettäessä yhden kvadrantin tasasuuntaajaa:

- Hetkellisen moottoritehon on oltava suurempi tai yhtä suuri kuin jarrutusteho.
- Jarrukatkojaa ja -vastusta tarvitaan, jos hetkellinen jarrutusteho ylittää moottoritehon.
- Jos moottoreiden teho ja määrä on pieni, erillinen tasasuuntaajajärjestelmä voi olla kallis.

Yhteistä tasavirtakiskoa käytetään yhden kvadrantin tasasuuntaajan kanssa, kun:

- käyttäjien määrä on suuri.
- moottoriteho on aina suurempi kuin jarrutusteho tai suhteellinen jarrutusteho on pieni.

Luku 4 - Sähköisten jarrutusmenetelmien kokonaiskustannusten arvioiminen

Energiaa säästäviin tuotteisiin investoitaessa käyttöiän kokonaiskustannusten arviointi on entistä tärkeämpää. Vaihtovirtakäyttöä käytetään nopeuden ja momentin säätämiseen. Tämän perustoiminnon avulla saavutetaan energiansäästöjä muihin säätömenetelmiin verrattuna. Vaikka pumppu- ja puhallinsovelluksissa jarrutusta tarvitaan harvoin, uusia vaihtovirtakäyttöjä käytetään yhä useammin sovelluksissa, joissa jarrutusta tarvitaan.

Edellä on mainittu monia teknisiä kriteereitä. Seuraavaksi tarkastellaan sähköisten jarrutusmenetelmien taloudellisia tekijöitä.

4.1 Välittömien energia-kustannusten laskeminen

Energian välittömät kustannukset voidaan laskea esimerkiksi energian hinnan ja arvioidun päivittäisen jarrutusajan ja -tehon perusteella. Energian hinta vaihtelee maittain, mutta laskelmissa voidaan käyttää arvioitua 0,05 euron hintaa kilowattitunnilta. 1 euro ~ 1 USD. Energian vuosikustannukset voidaan laskea kaavalla:

$$\text{Kustannukset} = \text{jarrutusaika (h/päivä)} * \text{keskimääräinen jarrutusteho (kW)} * \text{energian hinta (euroa/kWh)} * 365 \quad (4.1)$$

Esimerkiksi 100 kW:n käyttöä käytetään 8000 tuntia vuodessa ja jarrutusta 50 kW:n keskimääräisellä teholla 5 minuuttia tunnissa eli 667 tuntia vuodessa. Jarrutusenergian välittömät kustannukset ovat 1668 euroa vuodessa.

4.2 Investointi-kustannusten arvioiminen

Eri jarrutusmenetelmiin tarvittavat investoinnit vaihtelevat. Arvioinnissa tulisi huomioida seuraavat investointikustannuksiin vaikuttavat seikat.

Jarrukatkoja:

- Jarrukatkojan ja -vastuksen aiheuttamat ylimääräiset investointikustannukset sekä niiden tarvitseman lisätilan aiheuttamat kustannukset.
- Jarrukatkojaan tarvittavan lisäilmanvaihdon investointikustannukset.

Tyristori- tai IGBT-pohjainen sähköinen jarrutus:

- Tyristori- tai IGBT-pohjaisen verkkoonjarrutuksen aiheuttamat ylimääräiset investointikustannukset verrattuna samantehoiseen käyttöön ilman sähköistä jarrutusta.

Yhteinen tasavirtakisko:

- Jarrukatkojan ja -vastuksen aiheuttamat lisäkustannukset mukaan lukien niiden mahdollisesti tarvitsema tila yhteisessä tasavirtakiskossa.
- Yhteisen tasavirtakiskon ja vastaavan yksittäiskäytön investointikustannusten ero.

4.3 Kokonaiskustannusten laskeminen

Investointia tehtäessä lasketaan kokonaiskustannukset taloudellisen päätöksenteon tueksi. Energian hinta ja käyttöjen hinnat vaihtelevat maasta, laitoksesta, yrityksen koosta, korkoprosentista, investoinnin käyttöajasta ja yleisestä taloudellisesta tilanteesta riippuen. Seuraavissa esimerkeissä annettuja hintoja on käytetty vain esimerkinomaisesti.

Esimerkki 1 - Satunnainen jarrutus

Tarkastele seuraavaa sovellusesimerkkiä:

Jatkuva moottoriteho on 200 kW ja kierrosluku 1500 rpm. Hätäseistoimintoa käytettäessä sovelluksen on pysähdytävä 10 sekunnin kuluessa. Kokemusten perusteella hätäpysäytys tapahtuu kerran kuussa. Käytön hitausmomentti J on 122 kgm². Kun hätäseistoiminto käynnistyy, kuormitusmomentti voidaan jättää huomiotta.

Moottorin tarvitseman jarrutusmomentin laskeminen:

$$T = J * \frac{(\omega_{\text{alussa}} - \omega_{\text{lopus}})}{t} = J * \frac{(n_{\text{alussa}} - n_{\text{lopus}}) * 2 \pi}{t * 60} =$$

$$122 * \frac{(1500 - 0) * 2 \pi}{10 * 60} = 1915 \text{ Nm} \quad (4.2)$$

Moottorin (200 kW, 1500 rpm) tyypillinen momentti on noin 1200 Nm. Vaihtosuuntaajan säätämää vaihtovirtamoottoria voidaan hetkellisesti käyttää momentilla, joka on 200 % nimellisarvosta. Suurempien momenttiarvojen saavuttamiseksi tarvitaan myös suhteellisesti suurempi moottorivirta.

Jarrutusteho on maksimissaan jarrutusjakson alussa.

$$P_{\text{jarru, maks}} = T * \omega = 1915 * \frac{1500}{60} * 2 \pi \approx 300 \text{ kW} \quad (4.3)$$

Jarrukatkojen ja -vastuksen on kestettävä hetkellisesti 300 kW:n suuruisen tehon virta. Keskimääräinen jarrutus-teho on laskettu alla.

$$W_{\text{kin}} = \frac{1}{2} * J * \omega^2 = \frac{1}{2} * J * \left(\frac{n}{60} * 2 \pi \right)^2 = P * t \quad (4.4)$$

$$P = \frac{1}{2} * J * \left(\frac{n}{60} * 2 \pi \right)^2 * \frac{1}{t} =$$

$$\frac{1}{2} * 122 * \left(\frac{1500}{60} * 2 \pi \right)^2 * \frac{1}{10} = 150,3 \text{ kW} \quad (4.5)$$

Vastusjarrutuksen kustannukset:

Jarrukatkoja tarvitaan 300 kW:n maksimijarrutustehoa käytettäessä. Jos käytössä on tehonrajoitin, jarruvastus voidaan mitoittaa 150,3 kW:n tehon mukaan. Jarrukatkojen ja -vastuksen aiheuttama lisäkustannus on 4000 euroa. Jarruvastus tarvitsee 0,4 m² lattiatilan. Lisätilan kustannukset ovat 500 euroa/m².

Pienestä lämpöenergiasta ja jarrutuksen hätäkäytöstä syntyvät lisäjähdytyskustannukset ovat merkityksettömiä.

Ylimääräiset investointikustannukset koostuvat seuraavista:

- Jarrukatkoja ja -vastus kaapissa, 4000 euroa.
- Lattiatila 0,4 m² * 500 euroa/m², 200 euroa.

Energiahäviön kokonaiskustannukset yhden jarrutuskerran aikana:

$$\text{Kustannukset} = \frac{10}{3600} (\text{h}) * \frac{300}{2} (\text{kW}) * 0,5 (\text{euroa/kWh}) = 0,02 \text{ euroa} \quad (4.6)$$

Tässä esimerkissä jarrutusenergian kustannukset ovat merkityksettömiä.

Neljän kvadrantin käytön kustannukset:

Jarrukatkojalla varustettuun käyttöön verrattuna sähköisen jarrutuksen ja vastarinnankytketyn tyristorisillan investoinnin aiheuttama lisäkustannus on 7000 euroa. Energiansäästöllä ei voida kattaa tarvittavia lisäinvestointeja.

Esimerkki 2 - Nosturisovellus

Tarkastele seuraavaa sovellusesimerkkiä:

Nosturi, jonka nostoteho on 100 kW. Nosturi tarvitsee sekä moottori- että generaattoritulassa täyden tehon. Pisin nostokerta voi kestää 3 minuuttia. Nosturin keskimääräinen käyttöaika vuodessa on 20 %.

Vastusjarrutuksen kustannukset:

Jarrukatkoja- ja vastus on mitoitettava jatkuvan 100 kW:n jarrutuksen mukaan 3 minuutin maksimijarrutusajasta johtuen. Yleensä jarrukatkoja mitoitetaan enintään 1 minuutin jarrutusajalle 10 minuutin aikana.

- Jarrukatkoja ja -vastus kaapissa 7800 euroa.

Nosturin mekaaninen rakenne mahdollistaa jarrukatkojalla varustetut kaapit. Lattiatilasta ei aiheudu lisäkustannuksia.

Nosturin oletetaan toimivan 50 % käyttöajastaan generaattoritulassa, keskimäärin 2,4 tuntia päivässä. Energiahäviön kokonaiskustannukset ovat:

$$\text{Kustannukset} = 2,4 \text{ (h/päivä)} * 100 \text{ (kW)} * 0,05 \text{ (euroa/kWh)} * 365 = 4380 \text{ euroa} \quad (4.7)$$

Neljän kvadrantin käytön kustannukset:

Neljän kvadrantin IGBT-käyttöä suositellaan nosturisovelluksiin.

IGBT-tulosillalla varustetun sähköisen jarrutuksen aiheuttamat ylimääräiset investointikustannukset verrattuna jarrukatkojalla varustettuun käyttöön ovat 4000 euroa.

Hyötylaskelma osoittaa, että 4000 euron lisäinvestointi tuo saman määrän energiansäästöä ensimmäisen käyttövuoden aikana.

Esimerkki 3 - Linkosovellus

Tutustu seuraavaan sovellusesimerkkiin:

Sokerilinko, jossa on 6-napainen 160 kW:n moottori. Moottori tarvitsee täyden momentin 30 sekunnin ajaksi kiihdyttääkseen kuorman 1100 r/min maksiminopeuteen, jonka jälkeen linko pyörii 30 sekunnin ajan suurella nopeudella. Kun kuorma on lingottu, moottori hidastaa lingon mahdollisimman nopeasti purkamista ja

uudelleentäyttöä varten. Yhden valmistusjakson täyttö-, pyörimis- ja purkamisajat ovat vakiot, joten tuotantoa voidaan lisätä vain lisäämällä kiihdytys- ja hidastusnopeutta. Tämä onnistuu käyttämällä neljän kvadrantin IGBT-käyttöä, jossa tasavirtapiirin jännitettä voidaan nostaa kentänheikennysalueella (1000 - 1100 r/min). Näin voidaan säästää noin 3 sekuntia työkierrosta kohti, ja vähentää työkierrökseen kuluva aikaa 110 sekunnista 107 sekuntiin. Tuloksena on tuotoksen lisääntyminen ja prosessin tuottavuuden paraneminen. IGBT:n lisäkustannukset ovat 10 %.

Luku 5 - Symbolit ja määritelmät

- AC: Vaihtovirta tai -jännite
- B: Kitkakerroin
- C: Vakio tai kerroin
- $\cos\phi$: Perusaaltoisen jännitteen ja virran välisen sähköisen kulman kosini
- DC: Tasavirta tai -jännite
- DPF: Perusaallon tehokerroin kosinina $\cos\phi_1$, jossa ϕ_1 on laitteen perustaajuisen virran ja syöttöjännitteen perustaajuuskomponentin välinen vaihekulma.
- I: Virta [ampeeri, A]
- J: Hitausmomentti [kgm^2]
- n: Pyörimisnopeus [kierrosta minuutissa, rpm]
- P: Teho [watti, W]
- PF: Tehokerroin, $\text{PF} = P/S$ (teho/voltttiampeeri) = I_1 / I_s^*
DPF (Sinimuotoisella virralla PF on yhtä suuri kuin DPF).
- T: Momentti (newtonmetri, Nm)
- t: Aika

THD: Virran kokonaissärö määritellään seuraavasti:

$$\text{THD} = \frac{\sqrt{\sum_k^{40} I_k^2}}{I_1} \quad (5.1)$$

jossa I_1 on perustaajuisen virran rms-arvo.
THD jännitteenä voidaan laskea samalla tavalla.

- U: Jännite [V]
- W: Energia [Joule, J]
- ω : Kulmanopeus [radiaani/sekunti, 1/s]

Luku 6 - Hakemisto

C

$\cos\phi$ 7, 18, 29

D

DC-jarrutus 13

E

energiavarasto 14, 15

H

harmoninen kokonaissärö 18, 29

hitausmomentti 9, 10, 25, 29

I

IGBT 18, 19, 20, 21, 22, 24, 27, 28

impedanssi 18, 20

J

jarrukatkoja 11, 12, 15, 16, 17, 23, 24, 25, 26, 27

jarrutusteho 7, 11, 12, 13, 15, 17, 22, 23, 26

K

kaksikvadranttinen 5

kitka 8, 9, 12

kuljettimet 12

L

linko 27

luonnollinen jarrutus 10, 11, 12

N

nelikvadranttinen 5

neliöllinen momentti 8, 12

nosturi 12, 27

P

puhaltimet 12

pumput 12

S

suora momentinsäätö 13, 20

T

tasasuuntaaja 13, 14, 17, 22, 23

tasavirta 7

tyristorisilta 17, 18, 26

V

vaihtosuuntaaja 13, 15, 16, 19, 20, 23, 25

vaihtovirta 7

vakiomomentti 8, 12

verkkosuuntaaja 19, 20

vuojarrutus 13, 14

Y

yhteinen tasavirtakisko 22, 23, 25

yksikvadranttinen 5, 8, 21, 23

ylijännitesäätö 15

ylimitoitus 12



ABB Industry Oy

Tuotemyynti

PL 182

00381 Helsinki

Puhelin

Telekopio

Internet

010 222 000

010 222 2913

<http://www.abb.fi>