



Osaamista
ja oivallusta
tulevaisuuden
tekemiseen

Topi Hongisto

Taajuusmuuttajakäytön jännitteen nousunopeutta rajoittavan suodattimen toiminnallinen validointi nosturissa

Metropolia Ammattikorkeakoulu

Insinööri (AMK)

Sähkö- ja automaatiotekniikka

Insinöörityö

29.3.2021

Tekijä Otsikko	Topi Hongisto Taajuusmuuttajakäytön jännitteen nousunopeutta rajoittavan suodattimen toiminnallinen validointi nosturissa
Sivumäärä Aika	47 sivua + 1 liite 29.3.2021
Tutkinto	insinööri (AMK)
Tutkinto-ohjelma	sähkö- ja automaatiotekniikka
Ammatillinen pääaine	sähkövoimatekniikka
Ohjaajat	pääinsinööri Ville Niemi lehtori Arja Ristola
<p>Insinööriyön toimeksiantaja oli Konecranesin taajuusmuuttajakehitysosasto. Työn aiheena oli tutkia taajuusmuuttajan aiheuttamia jänniterasituksia moottorille, ja kuinka ne voidaan ehkäistä suodattamalla. Työn tavoitteena oli selvittää soveltuvatko uudet du/dt-suodattimet käytettäväksi nosturisolvelluksessa.</p> <p>Insinööriyön teoriaosuudessa on esitetty, miksi jänniterasituksia aiheutuu, kun moottoria syötetään taajuusmuuttajalla. Insinööriyö alkaa yleiskatsauksella nosturin sähköjärjestelmään. Käytännön työn taustaksi oli tarpeen tutustua yksityiskohtaisemmin, miksi jänniterasituksia aiheutuu etenkin käytettäessä pitkiä moottorikaapeleita. Työssä perehdyttiin niihin päätekijöihin, jotka vaikuttavat jänniterasitukseen. Tämän jälkeen on esitetty eri suodatusmenetelmät.</p> <p>Heijastusilmiötä tutkittiin käytännössä. Kokeelliset mittaukset suoritettiin laboratorio-olosuhteissa. Testijärjestelyt koostuivat taajuusmuuttajasta, moottorista kuormapenkissä ja pitkistä moottorikaapeleista. Mittaukset suoritettiin ensin ilman suodatinta ja sen jälkeen du/dt-suodattimien kanssa. Uusien du/dt-suodattimien testituloksia verrattiin referenssituotteen tuloksiin. Testitulokset on esitetty tämän insinööriyön lopussa.</p> <p>Insinööriyö osoitti, että uudet du/dt-suodattimet soveltuvat käytettäväksi nosturissa. Mittaustuloksien perusteella uudet suodattimet suoriutuivat paremmin kuin referenssituotteet. Uudet suodattimet täyttävät standardin IEC 60034-17 vaatimukset koskien suositusarvoja jännitteen nousunopeudelle ja maksimiarvolle moottorin liittimissä.</p> <p>Työn tuloksena saatuja tietoja voidaan käyttää tukena tutkittaessa muiden uusien du/dt-suodatinsarjan tuotteiden soveltuvuutta moottorin ylijännite suojaukseen.</p>	
Avainsanat	taajuusmuuttaja, heijastus, nousunopeus, lähtösuodatin

Author Title	Topi Hongisto Functional Validation of the Voltage Rise Rate Limiting Filter on Frequency Converter Driven Crane
Number of Pages Date	47 pages + 1 appendix 29 March 2021
Degree	Bachelor of Engineering
Degree Programme	Electrical and Automation Engineering
Professional Major	Electrical Power Engineering
Instructors	Ville Niemi, Chief Engineer Arja Ristola, Senior Lecturer
<p>This thesis study was commissioned by Konecranes inverter development department. The subject of this study was to investigate the voltage stresses that frequency converter causes to the motor and how these can be prevented by filtering. The target of this study was to find out whether the new du/dt filters are suitable for crane application.</p> <p>In the theoretical part this thesis clarifies why voltage stresses occur when the motor is supplied by a frequency converter. The thesis starts with an overview of crane's electrical system. After this, it is explained in more detail why voltage stresses occur especially when using long motor cables. All the main factors affecting voltage stresses are presented in this thesis as well as filtering methods.</p> <p>The reflection phenomenon was also studied in practice. Experimental measurements were performed in the laboratory conditions. The test arrangements consisted of frequency converter, motor in the load bench and long motor cables. Measurements were first conducted without filter and after this with du/dt filters. The test results of the new du/dt filters were compared to the results of the reference product. The test results are presented at the end of this thesis.</p> <p>As a result of this study, it can be stated that new du/dt filters are suitable for use in a crane. Based on the measuring results, the new filters performed better than the reference products. New filters fulfil the requirements of standard IEC 60034-17 regarding limits for the voltage rise rate and peak value of the motor voltage.</p> <p>The information provided by this thesis study can be used as support when investigating the suitability of other new du/dt filter series products for motor over voltage protection.</p>	
Keywords	frequency converter, reflection, rise rate, output filter

Sisällys

Lyhenteet

1	Johdanto	1
2	Nosturin sähkökäytöt	3
2.1	Nosturisovellus	3
2.2	Nosto- ja siirtoliike	4
2.3	Taajuusmuuttaja	5
2.3.1	Verkkosilta	6
2.3.2	Moottorisilta	8
2.4	Oikosulkumoottori	11
2.5	Moottorikaapelit	13
3	Taajuusmuuttajan aiheuttamat jänniterasitukset	15
3.1	Jännitteen nousunopeus	15
3.2	Jännitepulssin heijastuminen	17
3.3	Välipiirin jännite	20
3.4	Kaapelin vaikutus	20
3.4.1	Kaapelin ominaisuudet	21
3.4.2	Kaapelin pituus	22
3.5	Kytkentätaajuus	24
3.6	Jänniterasitusten seuraukset	25
3.7	Jänniterasitusten ehkäisy	27
3.7.1	Pääteimpedanssi	27
3.7.2	Kuristin	28
3.7.3	Du/dt-suodatin	29
3.7.4	Sinisuodatin	30
4	Mittaukset	32
4.1	Mittalaitteet	32
4.2	Testijärjestelyt ja laitteisto	33
4.3	Mittaukset ilman suodatinta	34

4.4	Mittaukset du/dt-suodattimilla	37
4.4.1	Referenssisuodattimet	37
4.4.2	Testattavat suodattimet	39
5	Mittaustulokset	42
6	Yhteenveto	45
	Lähteet	47
	Liitteet	
	Liite 1. Mittaustulokset	

Lyhenteet

DOL	<i>Direct On Line.</i> Suoraan verkkoon kytketty moottorikäyttö.
EMC	<i>Electromagnetic Compatibility.</i> Sähkömagneettinen yhteensopivuus.
IGBT	<i>Insulated Gate Bipolar Transistor.</i> Eristehilabipolaaritransistori.
PVC	<i>Polyvinyl Chloride.</i> Polyvinyylikloridia käytetään eristeenä kaapelissa.
PWM	<i>Pulse Width Modulation.</i> Pulssinleveysmodulaatio.

1 Johdanto

Taajuusmuuttajan ja oikosulkumoottorin yhdistelmä on nykypäivänä yleisin nopeussäädetty moottorikäyttö. Taajuusmuuttajan suosio perustuu sen myötä saavutettuihin etuihin. Sähkömoottorit kuluttavat merkittävän osan koko maailmassa käytetystä sähköenergiasta. Taajuusmuuttajan suurimpia etuja on, että sen avulla voidaan säästää merkittävä määrä sähköenergiaa, kun vaihtosähkömoottorin nopeus voidaan säätää prosessin vaatimalla tavalla. [3.]

Tasasähkömoottoreita käytettiin säätöä vaativissa sovelluksissa ennen kuin vaihtosähkömoottoreita osattiin säätää. Tasasähkömoottorin pyörimisnopeuden säätö on huomattavasti yksinkertaisempaa kuin vaihtosähkömoottorin. Joissakin tarkkaa säätöä vaativissa sovelluksissa tasasähkömoottorit olivat yleisin moottorityyppi pitkään vielä senkin jälkeen, kun taajuusmuuttajat olivat jo markkinoilla. Nykyään mikroprosessorit ja säätötekniikka on kuitenkin niin kehittynyttä, että taajuusmuuttajakäytöt ovat syrjäyttäneet suurimman osan tasavirtakäytöistä. Oikosulkumoottorilla on monia hyviä puolia verrattuna tasasähkömoottoriin. Merkittävimpiä ovat sen hyvä hyötysuhde sekä sen yksinkertainen ja vahva rakenne, jonka ansiosta sitä ei tarvitse huoltaa yhtä paljon kuin tasasähkömoottoria. [5.]

Taajuusmuuttajan hyvien puolien lisäksi sillä on varjopuolensa. Taajuusmuuttajan sisältämän tehoelektronikan seurauksena siitä aiheutuu sähkön laatua heikentäviä tekijöitä. Taajuusmuuttajan sähköverkosta ottama virta ei ole sinimuotoista, minkä seurauksena aiheutuu yliaaltoja syöttävään sähköverkkoon. Tässä insinööriyössä ei kuitenkaan perehdytä sen tarkemmin syöttöverkkoon kohdistuviin haittavaikutuksiin, vaan keskitytään taajuusmuuttajan moottorille aiheuttamiin rasituksiin. [5.]

Taajuusmuuttajien yleistyessä 1900-luvun loppupuolella huomattiin, että moottorit vikaantuivat huomattavasti herkemmin ja nopeammin kuin aikaisemmin. Syytä tähän alettiin selvittämään ja huomattiin, että moottorin liittimillä esiintyy huomattavan korkeita ylijännitteitä. Asiaa tarkemmin tutkittaessa selvisikin, mistä ylijännitteet moottorin liittimillä aiheutuvat. Taajuusmuuttajan syöttämä jännite koostuu jyrkkäreunaisista jännitepulsseista. Taajuusmuuttajassa käytettyjen tehopuolijohdekomponenttien kytkentäajat ovat

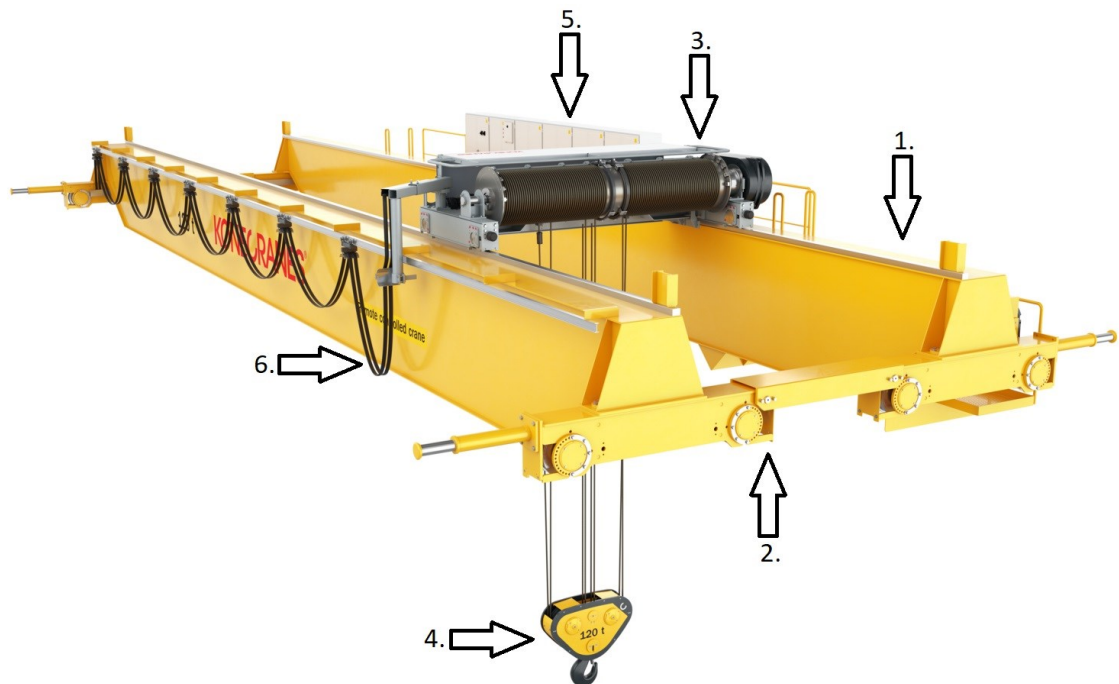
nopeita, minkä seurauksena jännitepulssien nousunopeudet ovat suuria. Jännitteen suuren nousunopeuden seurauksena moottorin ja moottorikaapelin rajapinnassa tapahtuu heijastuminen, jonka seurauksena ylijännite syntyy. Ongelma tulee ilmi etenkin käytettäessä pitkiä moottorikaapeleita. Ongelma voidaan kuitenkin ehkäistä erilaisilla suodatinmenetelmillä. Tässä insinööriyössä esitellään teorian kautta, miten ylijännitteet syntyvät, siihen vaikuttavat tekijät, sen seuraukset sekä se, kuinka ylijännitteiden syntymistä voidaan ennaltaehkäistä eri suodatinmenetelmillä. [7, s. 3; 10, s. 1.]

Taajuusmuuttajia käytetään useissa erilaisissa sovelluksissa. Tämä insinööriyö on tehty Konecranesin taajuusmuuttajien tuotekehitysosastolla. Konecranes on maailmanlaajuisesti tunnettu nostolaitevalmistaja. Työn tavoitteena oli selvittää soveltuvatko uudet du/dt -suodattimet käytettäväksi moottorin ylijännitesuojaukseen nosturissa. Aihe koskee merkittävästi nosturisovelluksia. Nykyään valtaosa nosturin liikkeistä on toteutettu taajuusmuuttajakäytöillä. Nosturin rakenteet voivat olla todella suuria ja aina ei ole mahdollista sijoittaa taajuusmuuttajaa lähelle moottoria. Tämän seurauksena nosturille on ominaista se, että joudutaan käyttämään pitkiä moottorikaapeleita. Taajuusmuuttajan aiheuttamat jänniterasitukset ovat aiheuttaneet nostureiden sähkökäytöissä ongelmia ja sen takia jännitteen nousunopeutta rajoittavien suodattimien käyttö nostureissa on yleistä.

2 Nosturin sähkökäytöt

2.1 Nosturisovellus

Nosturityyppejä on useita eri teollisuudenaloille. Konecranes valmistaa nostureita pienistä ketjunostimista aina suuriin pukkinostureihin. Satamissa tarvitaan konttinostureita rahtikonttien siirtelyyn sekä erilaisia puominostureita laivan tyhjennykseen ja lastaukseen. Pukkinostureita tarvitaan telakoilla suurien laivan osien nostamiseen. Teollisuudessa yleisiä ovat perinteiset siltanosturit. Kuvassa 1 on esitetty tarkemmin siltanosturin rakennetta. Lisäksi on olemassa eri teollisuusalojen vaatimiin erityistarpeisiin räätälöityjä nostureita. Nosturit voivat poiketa rakenteeltaan paljonkin toisistaan, mutta sähkökäyttöjen osalta ne ovat hyvin samanlaisia.



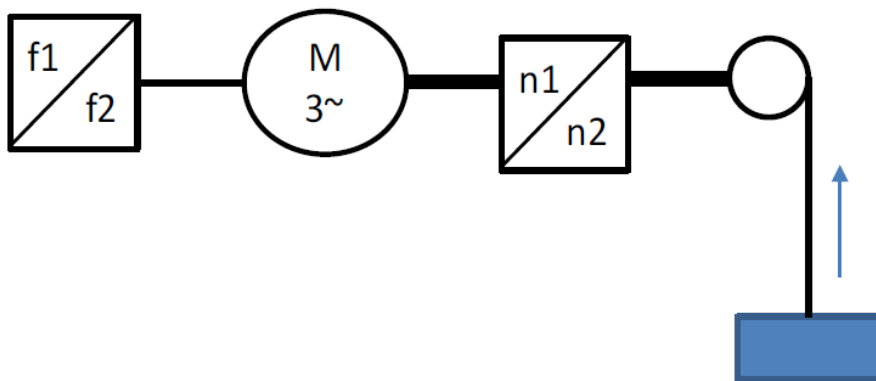
Kuva 1. Kaksipääkannatteisen siltanosturin rakennekuva [1]. Siltanosturin pääkomponentteja ovat: 1. Pääkannattaja, 2. Päätykannattaja, 3. Nostovaunu, 4. Nostokoukku, 5. Sähkökaappi ja 6. Nostovaunun kaapelointi.

Pääkannattajat ja päätykannattajat muodostavat nosturin sillan. Pääkannattaja on siltanosturin näkyvin osa suuren kokonsa takia. Nosturin nostokapasiteetista riippuen pääkannattajia on useimmiten yksi tai kaksi niin kuin kuvan mallinosturissa. Pääkannattajat

kannattelevat kuorman painon. Pääkannattajat liitetään päätykannattajiin, joiden kautta pääkannattajien kuormitus siirtyy nosturiradan kiskoille. Päätykannattajissa on kantopyörät ja siirtokoneisto, jonka voimalla siltaa liikutetaan pitkittäissuunnassa nosturiradan kiskoja pitkin. Nostovaunussa on oma siirtokoneisto ja se liikkuu poikittaissuunnassa pääkannattajia pitkin. Nostovaunuja voi olla yksi tai useampi sovelluksesta riippuen. Nostovaunu pitää sisällään myös nostokoneiston. Kuormaa nostettaessa nostoköysi kiertyy köysitelan ympärille. Nostoköyden päässä on nostokoukku kuorman kiinnitystä varten. Erityistapauksissa nostokoukun tilalla voi olla jokin muu tiettyyn tarkoitukseen oleva kuormauselin. [2.]

2.2 Nosto- ja siirtoliike

Nosturin päätehtävä on taakan siirtäminen paikasta toiseen. Näin ollen nosturikäyttö sisältää yleensä nosto- ja siirtoliikkeen. Vaikka nosto- ja siirtoliike ovat luonteeltaan hyvin erilaisia, niiden sähkökäytöt ei juurikaan eroa toisistaan. Kuvassa 2 on esitetty nostoliikkeen sähkökäyttö. Sähkökäyttö koostuu taajuusmuuttajasta ja oikosulkumoottorista, joka on kytketty vaihteen kautta nostokoneiston köysitelaan. Siirtoliikkeen sähkökäyttö on muuten samanlainen, mutta köysitelan tilalla on kantopyörä.



Kuva 2. Nostoliikkeen sähkökäyttö [3].

Nostoliikkeessä taakkaa nostetaan pystysuorassa ylös. Nostoon vaadittava momentti määräytyy maan vetovoiman kiihtyvyyden ja nostettavan taakan massan perusteella. Kyseessä on vakiomomenttikäyttö. Vakiomomenttikäytössä momentti on sama pyörimisnopeudesta riippumatta, mutta teho kasvaa lineaarisesti pyörimisnopeuden kasvaessa.

Vaikka momentti pysyykin vakiona ajettaessa tasaisella pyörimisnopeudella, niin momentin muutoksia aiheuttavat kuitenkin kiihdytys, hidastus ja massan muutos. Kiihdytystilanteessa nostoon vaadittavan momentin lisäksi tulee nostettavan taakan hitausmassojen kiihdyttämiseen vaadittava momentti. [3; 4, s. 13–16.]

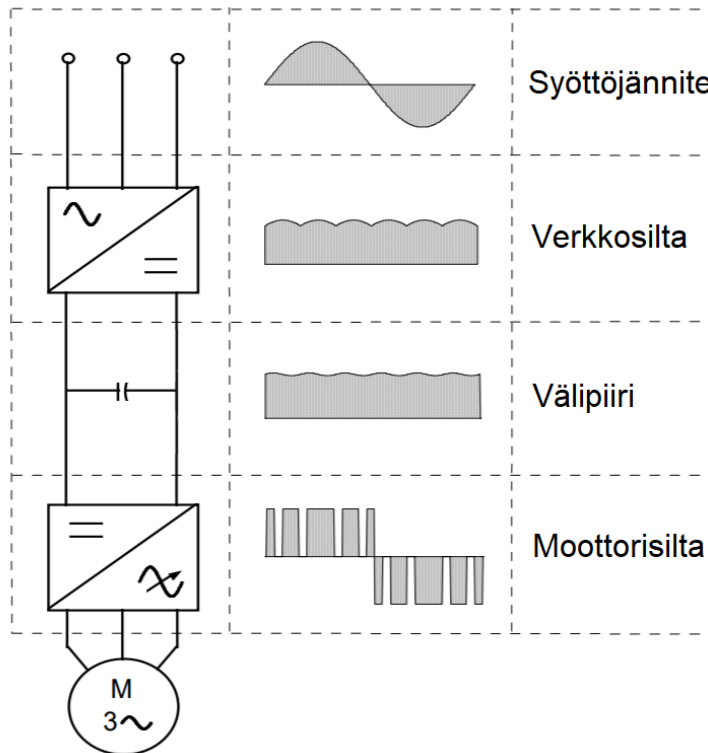
Siirtoliikkeessä taakkaa liikutetaan vaakasuorassa. Siirtoliikkeessä moottorilta vaaditaan suuri momentti liikkeelle lähtiessä, mutta tasaisella pyörimisnopeudella momentin tarve pienenee huomattavasti. Tasaisella pyörimisnopeudella siirtoliikkeen moottorilta vaadittavaan momenttiin vaikuttavat siirrettävän taakan massa sekä liikettä vastustavat kitkavoimat. Kiihdytystilanteessa lisämomenttia aiheuttavat siirrettävän kojeiston sekä mahdollisen taakan hitausmassojen aiheuttama momentti. [4, s. 13–16.]

2.3 Taajuusmuuttaja

Taajuusmuuttaja on vaihtosähkömoottorin säätöä varten kehitetty laite. Oikosulkumoottori on yleisin teollisuudessa käytetty moottorityyppi. Oikosulkumoottorin pyörimisnopeus määräytyy sen napaluvun, jättämän ja syöttävän verkon taajuuden perusteella. Oikosulkumoottoria täytyy ohjata taajuusmuuttajalla, jos sen pyörimisnopeutta halutaan säätää. Taajuusmuuttajalla pystytään muuttamaan syöttävän verkon jännitettä ja taajuutta.

Taajuusmuuttajia on olemassa suorina sekä välipiirillisinä. Suorissa taajuusmuuttajissa syöttävän vaihtosähköverkon jännite pilkotaan suoraan halutun taajuiseksi. Suoria taajuusmuuttajia ovat matriisimuuttajat sekä syklokonverterit. Välipiirillisissä taajuusmuuttajissa vaihtosähkö muutetaan ensin tasasähköksi ja sitten taas vaihtosähköksi. Välipiiri erottaa verkkosillan ja moottorisillan toisistaan sekä toimii lyhyt aikaisena sähköenergian varastona. [5.]

Yleisin taajuusmuuttajatyyppe on jännitevälipiirillinen taajuusmuuttaja. Myös nostureissa käytetään lähes poikkeuksetta jännitevälipiirillisiä taajuusmuuttajia, joten tässä luvussa käsitellään tarkemmin sen toimintaa. Yleisesti ottaen taajuusmuuttajan toimintaperiaate on kolmivaiheinen. Taajuusmuuttajan pääosat ovat verkkosilta, välipiiri ja moottorisilta. Kuvassa 3 on esitetty jännitevälipiirillisen PWM-taajuusmuuttajan (*Pulse Width Modulation* eli pulssinleveysmodulointi) pääosat sekä jännitteiden muodot eri kohdissa.



Kuva 3. Taajuusmuuttajan toimintaperiaate [6].

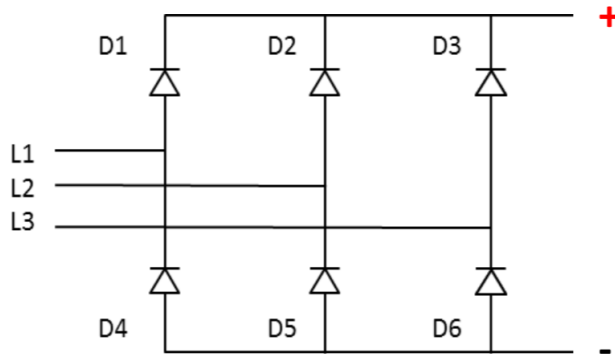
Taajuusmuuttajaa syötetään sinimuotoisella vaihtosähköllä. Verkkosilta muuntaa sinimuotoisen syöttöjännitteen tasajännitteeksi. Tasasuunnattu jännite ei kuitenkaan ole täysin tasaista, vaan se on muodoltaan hieman aaltoilevaa. Epätasainen tasajännite saadaan melko tasaiseksi suodattamalla se. Suodattaminen tapahtuu välipiirissä olevilla kondensaattoreilla. Viimeinen osa on moottorisilta, missä suodatettu tasajännite muunnetaan halutun taajuiseksi vaihtojännitteeksi. Taajuusmuuttajan moottorille syötämä jännite on muodoltaan pulssimaista. Moottorille syötettävää jännitettä voidaan säätää muuttamalla jännitepulssien leveyksiä. [5.]

2.3.1 Verkkosilta

Tyypillisesti verkkosilta on kuusi- tai kaksitoistapulssinen diodisilta. Diodisilta on halvin ja yksinkertaisin ratkaisu toteuttaa tasasuuntaus. Diodisilta johtaa vain yhteen suuntaan, joten jarrutustehoa ei ole mahdollista syöttää takaisin syöttöverkkoon. Jarrutusteho voidaan syöttää takaisin verkkoon korvaamalla diodisilta verkkovaihtosuuntaajalla. Verkkovaihtosuuntaajassa diodit on korvattu IGBT-tehopuolijohteilla (*Insulated Gate Bipolar*

Transistor eli eristehilabipolaaritransistori). Jarrutustehon siirtäminen takaisin sähköverkkoon on kannattava vaihtoehto silloin, kun jarrutusteho on suuri ja usein toistuvaa. [5.]

Kuusipulssisen diodisillan toiminta on hyvin yksinkertainen. Diodi on passiivinen komponentti, jota ei voi ohjata. Virtaa voidaan siirtää vain yhteen suuntaan. Se on kuitenkin riittävä ratkaisu moneen sovellukseen. Kuvassa 4 on esitetty kuusipulssinen diodisilta. Diodin piirrosmerkin nuolenpään osoittama suunta on diodin päästösuunta. [3.]



Kuva 4. Kuusipulssinen diodisilta [3].

Diodisillan toimintaperiaate perustuu siihen, että diodeista johtaa aina se, jonka yli oleva jännite on korkein. [3.] Tasasuunnattu jännite johdetaan taajuusmuuttajan välipiiriin, jossa elektrolyyttikondensaattorit tasoittavat jännitteen aaltomaisuutta sekä toimivat lyhytaikaisena energiavarastona. Koska diodeja ei voi ohjata, niin välipiirin jännitteen suuruus määräytyy suoraan syöttävän verkon jännitteen mukaan. Kuormitettuna välipiirin jännite voidaan laskea yhtälöllä 1.

$$U_{DC,ave} = \frac{3\sqrt{2}}{\pi} U, \quad (1)$$

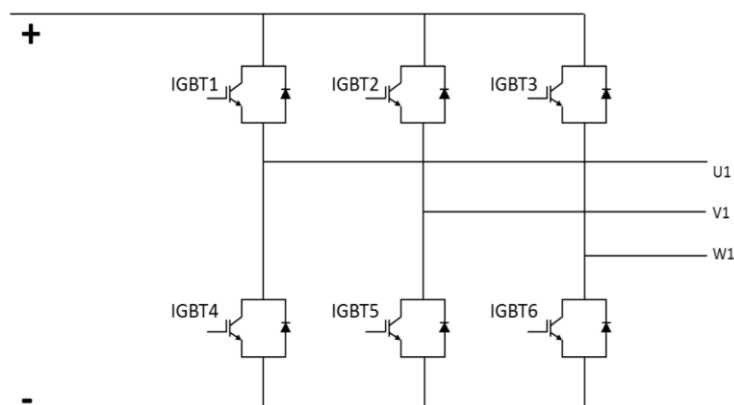
jossa $U_{DC,ave}$ on välipiirin jännitteen aritmeettinen keskiarvo ja U on syöttöverkon pääjännitteen tehollisarvo. Välipiirin jännite ei kuitenkaan ole täysin vakio. Moottorin käydessä tyhjäkäynnillä voi välipiirin jännite nousta hetkelliseen maksimiarvoon, jolloin välipiirin jännite voidaan laskea yhtälöllä 2.

$$\hat{u} = \sqrt{2} \times U \quad (2)$$

Nosturikäytöissä huomioitavaa on myös se, että kyseessä on neljän kvadrantin sovellus, jolloin nopeuden ja momentin suunta voi vapaasti vaihdella. Tämän takia teho ei välttämättä aina virtaa taajuusmuuttajasta prosessiin, vaan moottorin toimiessa generaattorina teho virtaa taajuusmuuttajaan. Kun verkkosiltana käytetään diodisiltaa, joka kykenee siirtämään tehoa vain yhteen suuntaan, ei tehoa voida siirtää takaisin syöttävään verkkoon. Tämän seurauksena ylimääräinen energia varastoituu välipiiriin ja välipiirin tasajännite alkaa kasvaa. Välipiirin tasajännite ei saa kasvaa liian korkeaksi, vaan sen liiallista kasvua tulee rajoittaa. Jarrukatkojen ja vastuksen käyttäminen välipiirissä on yleinen ratkaisu rajoittaa liiallista tasajännitteen kasvua. Jarrukatkoja liittyy välipiirin tasajännitteen vastukseen, jossa ylimääräinen energia muunnetaan lämmöksi. Jarrukatkoja on elektroninen kytkin, yleensä IGBT-transistori, joka aktivoituu automaattisesti välipiirin tasajännitteen ylittäessä jarrukatkojen toimintapisteen. Esimerkiksi nosturikäytöissä kuormanlaskutilanteissa moottori saattaa toimia generaattorina jopa useiden minuuttien ajan. [5; 7, s. 22.]

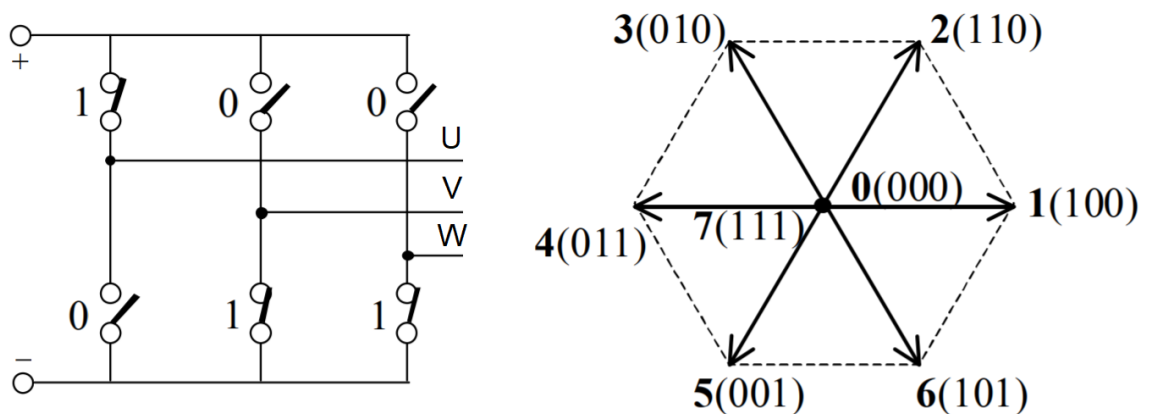
2.3.2 Moottorisilta

Moottorisillan tehtävä on muuntaa välipiirin suodatettu tasajännite jälleen takaisin vaihtojännitteeksi, joka syötetään ohjattavalle moottorille. Moottorisilta toimii verkkosiltana silloin, kun moottori toimii generaattorina ja teho virtaa prosessista taajuusmuuttajaan. Moottorisilta koostuu kuudesta tehopuolijohteesta, joita voidaan ohjata. Nykyään yleisimmin moottorisillassa käytetään IGBT-tehpuolijohteita. Kuvassa 5 on esitetty IGBT-tehpuolijohteilla toteutetun moottorisillan rakenne.



Kuva 5. Moottorisillan rakenne [3].

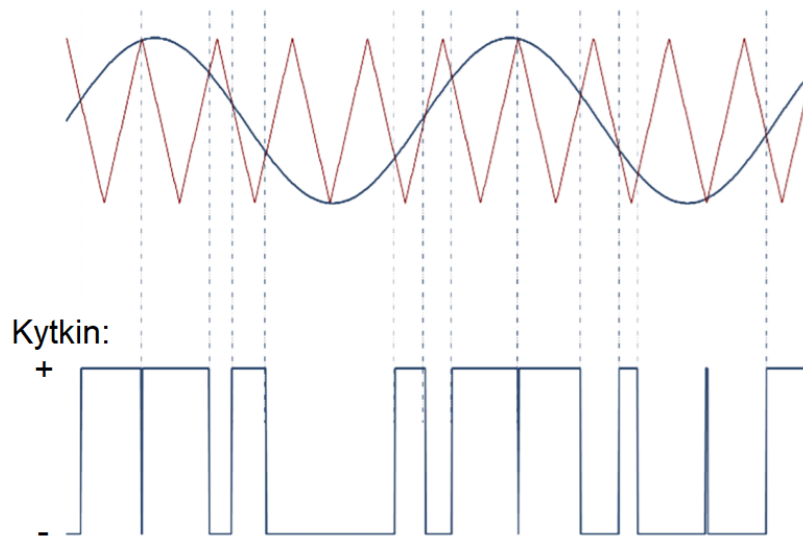
Kuvassa näkyy myös, että jokaisen IGBT-transistorin rinnalle on kytketty vastakkaiseen suuntaan johtava diodi. Kyseessä on nolladiodi. Nolladiodin tehtävä on suojata IGBT:tä tarjoamalla vastakkaisuuntaisen jännitteen aiheuttamalle virralle turvallinen kulkureitti. [5.] Moottorisillan jokainen IGBT-transistori toimii ohjattuna kytkimenä. Kytkimistä voidaan tehdä kahdeksan erilaista kytkentäkombinaatiota. Kytkimillä voidaan luoda kuusi nollasta poikkeavaa jännitevektoria ja kaksi nollavektoria. Ylä- ja alahaarassa voi olla samanaikaisesti kaksi kolmesta kytkimestä johtavassa tilassa, kun halutaan luoda nollasta poikkeava jännitevektori. Nollavektori syntyy, jos ylä- tai alahaarassa kaikki kolme kytkintä ovat samanaikaisesti johtavassa tilassa. Saman vaiheen ylä- ja alahaaran kytkimen tulee olla aina vastakkaisessa kytkentätilassa. Kytkimien asentoja muuttamalla voidaan staattorin käämivuota kasvattaa tai pienentää. Moottoria pyörittävää vääntömomenttia saadaan kasvatettua kierrättämällä staattorin käämivuota kauemmaksi roottorin käämivuosta. Kuvassa 6 on esitetty kytkimien kahdeksan mahdollista kytkentätilaa sekä niitä vastaavat jännitevektorit. [5; 8, s. 144.]



Kuva 6. Moottorisillan kytkentätilat ja jännitevektorit [14].

PWM-taajuusmuuttajan moottorille syötettävän jännitteen taajuutta ja tehollisarvoa pystytään muuttamaan. PWM eli pulssinleveysmodulaatio on yleisimmin käytössä oleva modulointimenetelmä. PWM-taajuusmuuttajan moottorille syöttämä jännite koostuu jännitepulsseista ja jännitettä voidaan säätää muuttamalla pulssinleveyksiä. Yksinkertaisin esimerkki toteuttaa pulssinleveysmodulointi on sinikolmiovertailu. Sinikolmiovertailussa kolmioaalto toimii kantaaaltona ja sen suuruus pysyy koko ajan samana. Siniaalto toimii modulointiaaltona. Modulointiaallon taajuutta ja jännitettä muuttamalla säädetään moottorille syötettävää jännitettä. Modulointiaaltoa verrataan kantaaltoon ja sen perusteella

moottorisillan tehpuolijohteita ohjataan auki ja kiinni. Positiivinen jännitepulssi muodostuu, kun modulointiaalto on kantaaltaa suurempi. Modulointiaallon ollessa kantaaltaa pienempi, muodostuu negatiivinen jännitepulssi. Kuvassa 7 on esitetty yhden vaiheen modulointiaallon vertailu kantaaltaan ja kytkimen toiminta. Kytkin on kiinni, mikäli modulointiaalto on kantaaltaa suurempi. Kantaallaan ollessa modulointiaaltoa suurempi, kytkin on auki. Muidenkin vaiheiden modulointiaaltoja verrataan samaan tapaan kantaaltaan ja kytkimiä ohjataan sen perusteella vaihekohtaisesti. [5.]



Kuva 7. Sinikolmiovertailu [3].

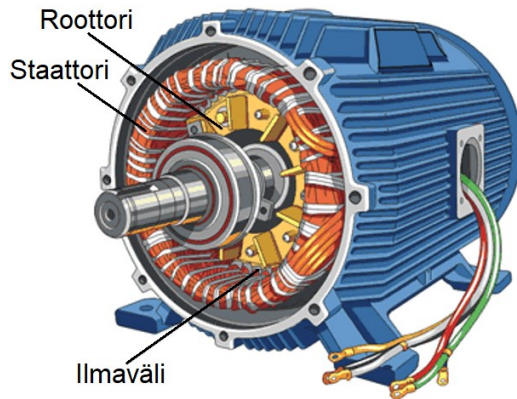
PWM-taajuusmuuttajan moottorille syöttämä jännite koostuu siis amplitudiltaan saman korkuisista positiivisista ja negatiivisista jännitepulssista. Jännitepulssien amplitudi määräytyy välipiirin jännitteen mukaan. Jännitettä muutetaan viemällä välipiirin jännite moottorille eri mittaisina jaksoina. Vaikka jännite on pulssimaista eikä sinimuotoista, niin moottorin virta on kuitenkin hyvin lähelle sinimuotoista. Kytkeäntäaajuudella on suuri merkitys sähkökäytön toiminnassa. Kytkeäntäaajuus määrittelee moottorisillan tehpuolijohteiden kytkeäntä tiheyden. Matalalla kytkeäntäaajuudella jännitepulssit ovat leveämpiä ja niitä on vähemmän. Korkeammalla kytkeäntäaajuudella jännitepulssit ovat kapeampia ja niitä esiintyy tiheämmin. Mitä suurempi kytkeäntäaajuus on, niin sitä sinimuotoisempaa on moottorin virta. Suurella kytkeäntäaajuudella moottorin säätö toimii paremmin ja moottori käy siistimmin. Moottorin äänitaso on myös tällöin pienempi. Ääniherkissä sovelluksissa voidaankin joutua käyttämään jopa 20 kHz:n kytkeäntäaajuutta. Kytkeäntäaajuuden

nostamisella on kuitenkin huonotkin puolensa. Suurilla kytkentätaajuuksilla moottorisil-
lan kytkentähäviöt kasvavat ja tästä syystä taajuusmuuttajasta saatavan virran suuruutta
joudutaan rajoittamaan. Suuri kytkentätaajuus aiheuttaa myös suuremmat EMC-häiriöt
(*Electromagnetic Compatibility* eli sähkömagneettinen yhteensopivuus). Nosturit operoi-
vat yleensä teollisessa ympäristössä eli ääniherkkyys on harvoin ongelma, joten nostu-
reissa voidaan hyvin käyttää matalampiakin kytkentätaajuuksia. 4 kHz on melko tyypilli-
nen kytkentätaajuus, jota käytetään nostureiden sähkökäytöissä. [8, s. 143.]

2.4 Oikosulkumoottori

Oikosulkumoottori on sähkökäytön työhevonen. Se muuttaa sähköisen energian mekaa-
niseksi energiaksi. Oikosulkumoottori on epätahtikoneisiin kuuluva induktiomoottori. Se
on teollisuudessa eniten käytetty moottorityyppi. Oikosulkumoottorin suosio perustuu
sen hyvään hyötysuhteeseen sekä yksinkertaiseen ja kestäväan rakenteeseen. Yksin-
kertaisen rakenteen ansiosta oikosulkumoottori ei tarvitse paljoa huoltoa. [5.]

Oikosulkumoottorin pääosat ovat staattori ja roottori. Staattori koostuu rautalevysydä-
mestä ja käämityksestä. Käämitys valmistetaan sähköä hyvin johtavasta materiaalista,
yleensä kuparista. Pienemmissä moottoreissa staattorikäämitys tehdään yleensä pyö-
rölangasta, mutta isommissa moottoreissa suositaan muotokuparia. Staattorin rautale-
vysydän toimii alustana staattorikäämeille. Pyörölangasta tai muotokuparista tehdään
käämivyyhti ja rautalevysydämässä on urat, joita pitkin käämivyyhti asennetaan kulke-
maan. Jokaisella syöttövaiheella on oma käämitys, ja ne asennetaan staattoriin siten,
että saman vaiheen käämitys on aina vastakkaisilla puolilla staattoria. Samalla vaiheella
voi olla useampi käämivyyhti staattorissa. Moottorin napaluku määräytyy sen mukaan,
kuinka monta käämiä staattorissa on yhtä syöttövaihetta kohden. Eri vaiheiden käämit
on oltava eristettyjä toisistaan sekä myös moottorin metallirakenteista. Käämivyyhdin eri
kierrokset ovat myös eristetty toisistaan. [6.] Roottori on moottorin pyörivä osa ja sen
rakenne on hyvin yksinkertainen. Yleensä roottorin käämitys on toteutettu häkkikäämi-
tyksenä. Roottorilla on niin ikään rautalevysydän, jossa on urat. Häkkikäämityksen joh-
dinsauvat kulkevat urissa. Häkkikäämityksen molemmat päät on suljettu oikosulkuren-
kailla. Tästä tulee nimitys oikosulkumoottori. Staattorin ja roottorin välissä on ilmaväli,
joka mahdollistaa roottorin pyörimisen. [9.] Kuvassa 8 on esitetty oikosulkumoottorin ra-
kenne.



Kuva 8. Oikosulkumoottorin rakenne [9].

Oikosulkumoottorin toiminta perustuu sähkömagneettiseen induktioon. Kun moottorin liittimiin kytketään kolmivaiheinen jännite, staattorin käämityksissä kulkee virta aiheuttaen pyörivän magneettikentän moottorin sisällä olevaan ilmaväliin. Magneettikentän pyörimisnopeus määräytyy syöttötaajuuden ja moottorin rakenteen perusteella. Tätä syöttötaajuuden ja moottorin rakenteen määräämää staattorin magneettikentän pyörimisnopeutta kutsutaan synkroniseksi nopeudeksi. Pyörivän magneettikentän magneettivuot leikkaavat roottorin käämisauvoja, jonka seurauksena roottorin oikosuljettuun häkikäämitykseen indusoituu virta ja roottori magnetoituu. Kun roottori magnetoituu, sille muodostuu oma magneettikenttä ja se pyrkii seuraamaan staattorin pyörivää magneettikenttää. Oikosulkumoottori kuuluu epätahtikoneisiin, koska roottori pyörii epätahdissa staattorin synkroniseen pyörimisnopeuteen verrattuna. Induktion seurauksena oikosulkumoottorilla on jättämä. Jättämä on kuitenkin välttämätön oikosulkumoottorin toiminnan kannalta. Jos roottorin magneettikenttä pyörisi samassa tahdissa staattorin magneettikentän kanssa, ei syntyisi sähkömotorista voimaa eikä vääntömomenttia ja roottori ei pyörisi. Moottorin pyörimisnopeus määräytyy syöttöverkon taajuuden, moottorin napapariluvun ja jättämän perusteella. [8, s. 97–100; 9.] Moottorin pyörimisnopeus voidaan laskea yhtälöllä 3.

$$n = \frac{f \times 60}{p} (1 - s) \quad (3)$$

n on pyörimisnopeus
 f on syöttöverkon taajuus
 p on napapariluku
 s on suhteellinen jättämä.

DOL-käyttöisen (*Direct On Line* eli suoraan verkkoon kytketty) moottorin pyörimisnopeus määräytyy pitkälti syöttöverkon taajuuden mukaan. Moottori pyörii vain tietyllä nopeudella ja noudattaa moottorin ominaiskäyrää. Taajuusmuuttajakäytön etuja onkin sen lisäksi, että pyörimisnopeutta voidaan säätää, on moottorin maksimimomentti käytettävissä koko pyörimisnopeusalueella nolasta kentänheikennyspisteeseen saakka. Tätä kutsutaan vakiovoalueeksi. Käytännössä kuitenkin pienillä pyörimisnopeuksilla moottorin lämpenemä rajoittaa moottorin kuormittamista. Ilman erillistä tuuletusta maksimimomenttia ei voida käyttää pitkiä aikoja pienillä pyörimisnopeuksilla moottorin lämpenemisen takia. Moottoria voidaan ajaa myös nimellistä suuremmilla pyörimisnopeuksilla eli kentänheikennysalueella. Tällöin saatavilla oleva maksimimomentti alenee, koska jännitettä ei voida enää nostaa, joten magneettivuo heikkenee kääntäen verrannollisesti nopeuteen ja momentti alenee neliöllisesti. Taajuusmuuttajalla syötettyä oikosulkumoottoria voidaan käyttää nelikvadranttikäyttönä eli se voi toimia generaattorina tai moottorina molempiin suuntiin. Oikosulkumoottori alkaa toimia generaattorina, kun ulkopuolinen voima saa moottorin pyörimään staattorin magneettikenttää nopeammin. Tällöin staattorin sähkömotorinen voima kasvaa yli napajännitteen, jolloin virran suunta muuttuu ja oikosulkumoottori alkaa syöttämään tehoa verkkoon. [8, s. 104–106.]

2.5 Moottorikaapelit

Taajuusmuuttajakäyttö saattaa aiheuttaa erityisvaatimuksia kaapelityypeille sekä kaapelien pituuksille. Erityisesti pitkät moottorikaapelit saattavat aiheuttaa ongelmia. Eri valmistajat antavat eri lukuja, kun puhutaan pitkistä moottorikaapeleista. Jotkut luokittelevat jo 10 metrin kaapelin pitkäksi. Nostureissa moottorikaapelit voivat olla hyvin pitkiä soveluksesta riippuen. Suurissa nostureissa pisimmät moottorikaapelit voivat olla satoja metrejä. Luvussa 2.1 esiteltiin siltanosturin rakenne. Siltanosturin pääkannattaja voi olla useita kymmeniä metrejä pitkä. Moottorikaapeloinnin tulee mahdollistaa nostovaunun liikkuminen koko pääkannattajan pituuden matkan. Taajuusmuuttajat voivat olla sijoitettu sähkökaappiin, joka on asennettu pääkannattajaan. Joissain tapauksissa sähkökaappi saatetaan sijoittaa muualle rakennukseen hyvinkin kauas nosturista. Näin ollen moottorin ja taajuusmuuttajan väliset kaapelit ovat väkisin kymmenien tai jopa satojen metrien pituisia. Kuvassa 9 on esitetty yleinen nostovaunun kaapelointimenetelmä.



Kuva 9. Nostovaunun moottorikaapeli [8, s. 284].

Tässä kaapelointi tavassa kaapelit on ripustettu roikkumaan satulavaunuihin, jotka liikkuvat kiskoja pitkin. Tähän tarkoitukseen lattakaapeli sopii pyörykaapelia paremmin, sillä se on joustavampaa liikkeen suuntaa ajatellen. Taajuusmuuttajan kanssa suositellaan käytettäväksi häiriösuojattuja kaapeleita EMC-vaatimusten täyttymiseksi. Häiriösuojatut kaapelit ovat kuitenkin häiriösuojaamattomia kaapeleita jäykempiä, eikä tästä syystä aina sovellu nostureissa käytettäväksi. Häiriösuojaamaton lattakaapeli onkin yleinen kaapelityyppi nostureiden moottorikaapeloinnissa. Lattakaapelissa tulee huomioida myös sen epäsymmetrisyys. Epäsymmetriansa takia siitä aiheutuvat häiriöt saattavat vaihdella eri vaiheiden kesken. [8, s. 284–285; 10, s. 8–9.]

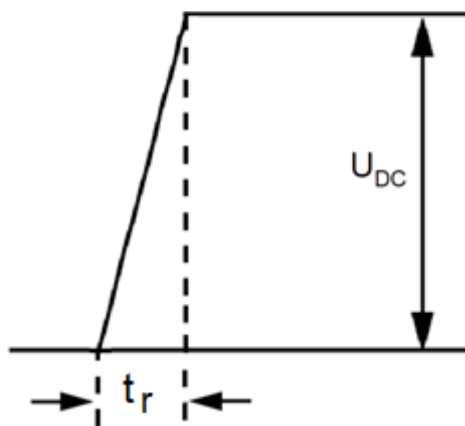
3 Taajuusmuuttajan aiheuttamat jänniterasitukset

Taajuusmuuttajakäyttöjen yleistyessä on havaittu, että moottorit vikaantuivat nopeammin kuin perinteisessä DOL-käytössä. Asiaa on tutkittu ja mittauksissa havaittiin suuria ylijännitteitä moottoreiden liittimissä. [10, s. 1.] Moottoreiden käämitysten eristyksiä ei ollut suunniteltu kestämaan niin suuria jännitteitä, minkä seurauksena käämityksissä tapahtui läpilyöntejä ja moottorit vikaantuivat. Ongelma yhdistettiin taajuusmuuttajan IGBT-tehopuolijohteiden nopeisiin kytkentäaikoihin, jonka seurauksena jännitepulssit ovat hyvin jyrkkäreunaisia ja aiheuttavat heijastumisia moottorin ja taajuusmuuttajan välillä. Tässä luvussa esitellään taajuusmuuttajan aiheuttamien jänniterasitusten syntyminen sekä niihin vaikuttajat tekijät.

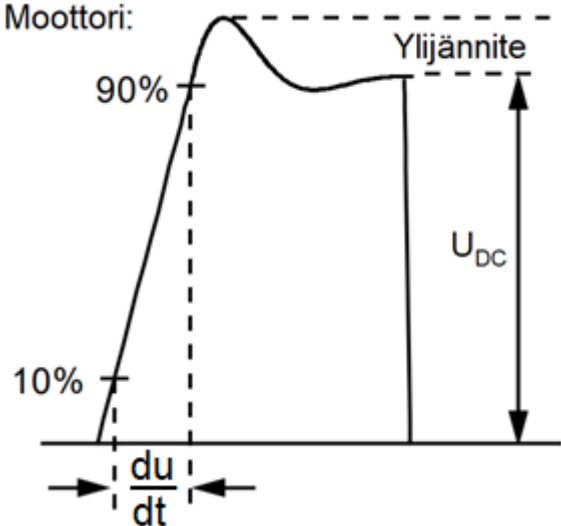
3.1 Jännitteen nousunopeus

Aikaisemmin on esitetty PWM-taajuusmuuttajan toimintaa. Taajuusmuuttajan syöttämä jännite koostuu jyrkkäreunaisista jännitepulsseista. Jännitepulssin nousu- ja laskuajat määräytyvät tehopuolijohteiden kytkentäaikojen mukaan. IGBT:t ovat moottorisillassa yleisesti käytetty tehopuolijohde ja niiden kytkentäajat voivat olla alhaisimmillaan jopa 50 ns. IGBT:n hilavastuksella rajoitetaan hilan virtaa, joka taas vaikuttaa hilan jännitteen nousu- ja laskuajoihin ja sitä kautta IGBT:n sytytys- ja sammutusaikaan. Pienellä hilavastuksella hilajännite on suurempi ja IGBT:n kytkentäaika on lyhyempi. Lyhyillä kytkentäajoilla on etunsa ohjauksellisessa ja taloudellisessa mielessä. Taajuusmuuttajan kytkentähäviöt pienenevät lyhyiden kytkentäaikojen seurauksena. Lisäksi ne mahdollistavat suurten kytkentätaajuuksien käyttämisen, jolloin moottorin virta on sinimuotoisempaa parantaen moottorin toimintaa. Nopeilla jännitteen nousunopeuksilla moottorin jänniterasitukset kuitenkin pahenevat. Perinteisessä DOL-käytössä esiintyy myös heijastumista, mutta moottorin syöttöjännite on matalataajuinen, yleisimmin 50 Hz tai 60 Hz, jolloin se jakautuu tasaisemmin moottorin käämitykselle. Taajuusmuuttajan syöttämät jännitepulssit sisältävät suuritaajuisia yliaaltoja, jonka seurauksena jännitejakauma moottorin käämityksissä ei ole enää tasainen ja aiheuttaa suurempia rasituksia moottorin käämityksissä. [5.] Kuvassa 10 on esitetty taajuusmuuttajan kytkemän jännitepulssin nousuaika sekä jännitteen nousunopeus moottorin liittimillä.

Taajuusmuuttaja:



Moottori:



Kuva 10. Vasemmalla jännitepulssin nousuaika taajuusmuuttajalla ja oikealla jännitteen nousunopeus moottorin liittimillä [6].

Taajuusmuuttajan kytkemä jännitepulssi nousee ajassa t_r välipiirin jännitteen suuruiseen arvoon. Tämä aika määräytyy tehopuolijohteiden kytkentäajan mukaan. Jännitepulssin nousunopeus ei ole sama taajuusmuuttajalla ja moottorilla. Moottorilla jännitteen nousunopeutta hidastaa kaapelin vaimentava vaikutus. Kaapelin vaikutuksesta jännitepulssin muoto on pyöristyneempi moottorin liittimissä. Jännitepulssin pyöristyneestä muodosta johtuen jännitteen nousunopeus jännitepiikin ala- ja yläpäässä on hieman loivempi. Tästä syystä yleinen käytäntö on, että jännitteen nousunopeus moottorilla lasketaan sen perusteella, kuinka kauan jännitteellä kestää nousta 10 prosentista 90 prosenttiin huippujännitteestä. Jännitteen nousunopeus moottorilla voidaan laskea yhtälöllä 4.

$$du/dt = \frac{u_{90\%} - u_{10\%}}{t_{90\%} - t_{10\%}} \quad (4)$$

$u_{90\%}$ on 90 % huippujännitteestä

$u_{10\%}$ on 10 % huippujännitteestä

$t_{90\%}$ on ajanhetki, jolloin jännite on 90 % arvossa

$t_{10\%}$ on ajanhetki, jolloin jännite on 10 % arvossa.

Jännitteen nousunopeus riippuu pitkälti taajuusmuuttajan tyypistä. Etenkin tehopuolijohdekytkimenä käytetyllä transistorilla on suuri merkitys. Tyypillisesti du/dt arvo on suuruusluokaltaan 1–5 kV/ μ s. [6.]

3.2 Jännitepulssin heijastuminen

Jännitepulssin heijastuminen tapahtuu kohdassa, jossa kaksi eri suuruista impedanssia kohtaavat. Tätä kutsutaan epäjatkuvuuskohdaksi. Moottorin ja moottorikaapelin liitoskohta on tällainen. Liitoskohdassa virta pienenee suuremman impedanssin vaikutuksesta ja liitospintaan kerääntyy varausta. Varaus aiheuttaa suuren jännitteen nousun liitoskohdassa aiheuttaen uuden aallon, josta osa heijastuu takaisin ja osa jatkaa eteenpäin. Tyypillisesti moottorin, etenkin pienempien moottoreiden, ominaisimpedanssi on huomattavasti suurempi kuin kaapelin ominaisimpedanssi. Jännitepulssin saapuessa moottorille tapahtuu siis väistämättä heijastuminen epäjatkuvuuskohdan takia. Moottorille tulevan pulssin ja heijastuneen pulssin suhdetta kuvataan heijastuskertoimella. Heijastuskerroin voidaan laskea yhtälöllä 5.

$$\rho = \frac{Z_m - Z_0}{Z_m + Z_0} \quad (5)$$

ρ on heijastuskerroin
 Z_m on moottorin ominaisimpedanssi
 Z_0 on kaapelin ominaisimpedanssi.

Yhtälöstä nähdään, että heijastuskertoimen arvo vaihtelee välillä 0–1, kun moottorin ominaisimpedanssi on kaapelin ominaisimpedanssia suurempi. Pienempien moottoreiden impedanssi voi olla huomattavasti kaapelin ominaisimpedanssia suurempi, joten heijastuskerroinkin on silloin suuri. Suurien moottoreiden impedanssi on pienempi, joten heijastuskerroinkin on pienempi. Heijastunut osa jännitepulssista palaa takaisin taajuusmuuttajalle. Taajuusmuuttajalla se kohtaa välipiirin kondensaattorin, jonka ominaisimpedanssi on suurilla taajuuksilla lähellä nollaa ja heijastuu negatiivisena taas moottorille. Jännitepulssi jää värähtelemään tätä väliä, kunnes on vaimentunut heijastuskertoimen ja kaapelin häviöiden seurauksena. [5.]

Tarkastellaan yhden jännitepulssin heijastumista tarkemmin. Kuvassa 11 on esitetty moottorin rajapinnassa tapahtuva heijastuminen. Amplitudiltaan välipiirin jännitteen suuruinen jännitepulssi lähtee taajuusmuuttajalta ja kohtaa moottorin. Moottorin impedanssi on kaapelin ominaisimpedanssia suurempi, joten jännitepulssista heijastuu takaisin suuruudeltaan heijastumiskertoimen mukainen osa. Heijastuneesta osasta muodostuu oma jännitepulssi, joka hetkellisesti summautuu alkuperäisen jännitepulssin kanssa. Jos

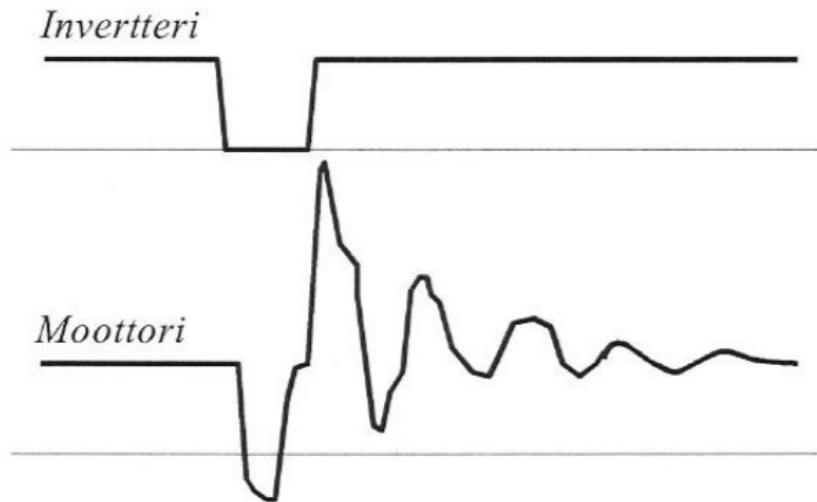
heijastuminen olisi täydellinen, niin summautunut jännitepulssi olisi kaksi kertaa välipiirinjännitteen suuruinen. Osa pulssista menee kuitenkin läpi moottorin rajapinnasta, joten summautunut jännite on pienempi kuin kaksi kertaa välipiirinjännite. [7, s. 7.]



Kuva 11. Yhden kerran heijastunut jännitepulssi [7, s. 7].

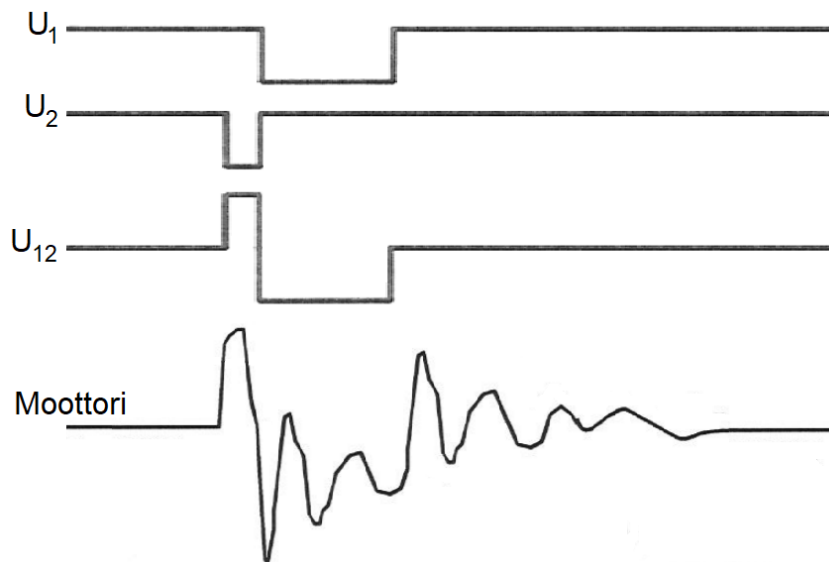
Kuvassa 11 jännitepulssi on selkeyden vuoksi piirretty terävin reunoin. Oikeassa tilanteessa jännitteen aaltomuoto on huomattavasti pyöristyneempi johtuen kaapelin suurtaajuisista häviöistä, jonka seurauksena jännitepulssilla ei ole yhtä terävät reunat kuin kuvassa. Teoreettisesti täydellisen heijastumisen myötä jännitepulssin arvo voi siis nousta kaksinkertaiseen välipiirin jännitteen arvoon. [7, s. 7.]

Moottorissa voi kuitenkin esiintyä huomattavasti suurempiakin ylijännitteitä kuin edellä esitetty kaksinkertainen välipiirin jännite. Kaapelin ominaisuuksista ja heijastumiskertoimesta riippuen on mahdollista, että edellinen pulssi ei ole ehtinyt vaimentumaan uuden jännitepulssin saapuessa moottorille, jolloin heijastunut pulssi ja uusi jännitepulssi summautuvat ja jännitteen arvo voi nousta jopa 3–4 kertaa välipiirin jännitteen suuruiseksi. Tämä on ns. double pulsing -ilmiö, joka on esitetty kuvassa 12. Kuvan mukainen tilanne syntyy, kun varaukseton aika ei ole riittävän pitkä, että edellinen pulssi olisi ehtinyt vaimentua ja taajuusmuuttajalta negatiivisena heijastunut pulssi saapuu moottorille samaan aikaan kuin uuden ohjauspulssin nouseva reuna. Näiden kahden pulssin yhteisvaikutuksesta syntyy kuvan mukainen double pulsing -ilmiö. [5.]



Kuva 12. Double pulsing -ilmiö [5].

Suuria ylijännitteitä aiheutuu myös tilanteessa, jossa pääjännitteen polariteetti muuttuu nopeasti. Taajuusmuuttajan ohjauslogiikka kytkee moottorisillan jokaisen vaiheen tehopuolijohdekytkimiä ohjelmansa mukaisesti muodostaakseen halutun taajuuden jännitteelle. Tehopuolijohdekytkimien ohjauksen seurauksena kahden vaiheen välille voi syntyä tilanne, jossa pääjännitteen polariteetti muuttuu nopeasti ja jännitteen muutos on kaksi kertaa välipiirin jännitteen suuruinen. Kuvassa 13 on esitetty tilanteen syntyminen.



Kuva 13. Pääjännitteen polariteetin nopean muutoksen aiheuttama jännitepiikki [5].

Näin suuri muutos pääjännitteessä saa heijastuessaan aikaiseksi huomattavan suuria ylijännitteitä, jopa suurempia kuin edellä esitetyssä double pulsing -ilmiössä. U_1 ja U_2 ovat vaihejännitteitä, ja U_{12} on niiden välinen pääjännite taajuusmuuttajan liittimillä. Sen alapuolella on vastaava pääjännite moottorin liittimillä. [5; 7, s. 14.]

3.3 Välipiirin jännite

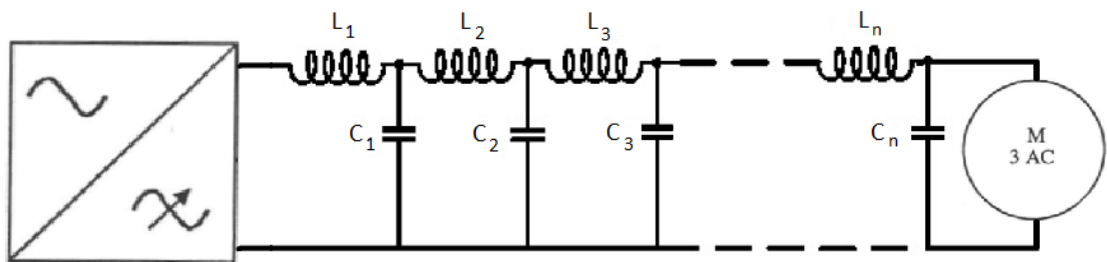
Välipiirin jännitteellä on suora vaikutus jännitepiikkeihin. Luvussa 2.3 esitettiin, kuinka välipiirin jännitteen taso määräytyy, kun verkkosiltana käytetään diodisiltaa. Tällöin välipiirin jännite määräytyy suoraan syöttöjännitteen mukaan yhtälön 1 mukaisesti. Välipiirin jännite voi kuitenkin nousta tätäkin korkeammaksi jarrutusilanteessa, jolloin moottori toimii generaattorina ja rupeaa syöttämään tehoa verkkoon päin. Tällöin välipiirin jännite nousee jarrukatkojan toimintapisteeseen saakka. Jarrukatkojan toimintapiste on valittu välipiirin kondensaattorien jännitekestoisuuden perusteella ja se voi vaihdella eri taajuusmuuttajien välillä. Oikosulkumoottorin toimiessa generaattorina se on ns. verkkomagne-toitu epätahtigenaattori. Eli vaikka moottori syöttääkin generaattoritasossa sähköä verkkoon päin, niin pidetään moottori kuitenkin magnetoituna syöttämällä sille magnetointivirta verkosta. Toisin sanoen taajuusmuuttaja syöttää jännitepulsseja koko ajan moottorille. [10, s. 24.] PWM-taajuusmuuttajan jännitepulssit ovat amplitudiltaan välipiirin jännitteen suuruisia eli mitä suurempi välipiirin jännite, niin sitä suurempia ovat myös jännitepiikit moottorin liittimissä.

3.4 Kaapelin vaikutus

Kaapelin ominaisuudet ja pituus vaikuttavat merkittävästi moottorin liittimissä aiheutuviin ylijännitteisiin. Jänniterasitukset pahenevat moottorikaapelin pituuden kasvaessa. Kaapelin vaikutusta jänniterasitukseen käsitellään siirtojohtoteorian mukaisesti. Siirtojohtoteoria pätee korkeataajuisia komponentteja sisältäville signaaleille pitkillä virtapiireillä, jolloin signaalin kulku-aika kaapelissa otetaan huomioon. [10, s. 12.]

3.4.1 Kaapelin ominaisuudet

Kaapelin tyypillä on ilmeinen vaikutus ylijännitteiden syntymiseen. Aiemmin on esitetty, kuinka heijastuskerroin määräytyy kaapelin ominaisimpedanssin ja moottorin ominaisimpedanssin funktiona. Kaapelin ominaisimpedanssi on täten merkittävä tekijä impedanssien sovituksessa moottorin kanssa. Kaapeli voidaan mallintaa kuvan 14 mukaisesti. Kaapelin yksi johdin kuvataan pitkänä linjana, joka on jaettu pieniin paloihin ja jossa on pitkä jono sarjaan kytkettyjä induktansseja ja rinnan kytkettyjä kapasitansseja. [11, s. 7.]



Kuva 14. Kaapelin sarjainduktanssi ja hajakapasitanssi pituusyksikköä kohti [11, s. 7].

Induktanssi ja kapasitanssi on sama jokaista pituusyksikköä kohti, jos oletetaan johdon olevan häviötön. Yleensä siirtojohdon häviöt ovat hyvin pienet, joten ne voidaan unohtaa ja käyttää yksinkertaistettua käsittelymallia. Näin ollen induktanssi ja kapasitanssi pituusyksikköä kohti määrittävät kaapelille ominaisimpedanssin. Kaapelin ominaisimpedanssi voidaan laskea yhtälöllä 6.

$$Z_0 = \sqrt{\frac{l}{c}} \quad (6)$$

Z_0 on kaapelin ominaisimpedanssi
 l on induktanssi pituusyksikköä kohti
 c on kapasitanssi pituusyksikköä kohti.

Kaapelin ominaisimpedanssi ei ole kaapelin pituudesta riippuvainen, vaan sen määrittää kaapelin rakenne ja eristys. [5.] Jokaisen jännitepulssin nouseva reuna lataa kaapelin induktanssin ja kapasitanssin, jolloin pulssin energia varastoituu kaapelin kapasitansseihin. Jos kaapelin kapasitanssiin varautunut energia ei ole ehtinyt purkautumaan ennen kuin uusi jännitepulssi kytketään, niin voi syntyä suuria jännitepiikkejä. [11, s. 7.]

3.4.2 Kaapelin pituus

Kaapelin ominaisimpedanssi on sama sen pituudesta riippumatta. Kaapelin pituuden vaikutus tulee kuitenkin esiin siinä vaiheessa, kun ajatellaan jännitepulssin etenemistä kaapelissa taajuusmuuttajalta moottorille. Jännitepulssi ei vaikuta saman aikaisesti kaikissa johtimen osissa, vaan sillä kestää jokin aika kulkea taajuusmuuttajalta moottorille. Tässä kohtaa kaapelin pituuden vaikutus on ilmeinen. Kaapelin pituuden lisäksi kulkuaikaan vaikuttaa oleellisesti jännitepulssin kulkunopeus. Kaapelin materiaalit ja rakenne määrittelevät sen, kuinka nopeasti jännitepulssi etenee. Kun tiedetään kaapelin ominaisarvot, voidaan jännitepulssin kulkunopeus laskea yhtälöllä 7.

$$v = \frac{c}{\sqrt{\mu_r \times \epsilon_r}} = \frac{1}{\sqrt{l \times c}} \quad (7)$$

v on jännitepulssin kulkunopeus
 c on valonnopeus
 μ_r on eristeen suhteellinen permeabiliteetti
 ϵ_r on eristeen suhteellinen permittiivisyys.

Valon nopeus on suurin nopeus, joka voidaan saavuttaa tyhjiössä. Valonnopeus on noin 300 000 000 m/s. Moottorikaapelin eriste voi olla esimerkiksi PVC eli polyvinyylikloridi, jonka suhteellinen permittiivisyys on noin 4. Tällöin jännitepulssin kulkunopeudeksi saadaan 150 000 000 m/s eli puolet valonnopeudesta. Vaikka nopeus on suuri, pitkiä kaapeleita käytettäessä jännitepulssin kulkuaika on pidempi kuin sen nousuaika, mikä mahdollistaa heijastumisilmiön ja ylijännitteiden syntymisen. Ylijännitteitä ei synny, jos kaapeli on niin lyhyt, että jännitepulssin kulkuaika kaapelin päästä päähän on lyhyempi kuin jännitepulssin nousuaika. Tämä johtuu siitä, että taajuusmuuttajalta heijastunut negatiivinen jännitepulssi etenee moottorille nopeammin kuin uusi jännitepulssi moottorilla ehtii nousta huippuarvoonsa. Negatiivinen jännitepulssi yhdistyy moottorilla positiiviseen jännitepulssiin vaimentaen sen heijastumista. [5; 10, s. 12–17.]

Täydellisessä heijastumisessa jännitepulssin amplitudi voi kaksinkertaistua. Täydellinen heijastuminen vaatii kaapelilta tietyn mitan sen lisäksi, että moottorin ja kaapelin rajapinnassa on täydellinen epäsovitus. Tällöin puhutaan kriittisestä kaapelin pituudesta. Kriittiseen kaapelin pituuteen vaikuttaa tehopuolijohteiden kytkentäajat. Mitä hitaampi kytkentäaika on, sitä hitaampi on jännitepulssin nousuaika. Kun jännitepulssin nousuaika on hitaampi, kriittisen kaapelin pituus on pidempi. Jännitepulssin nousuajan lisäksi

kriittiseen kaapelin pituuteen vaikuttaa jännitepulssin kulkunopeus. Jännite kaksinkertaistuu, kun jännitepulssi ehtii nousta huippuarvoonsa ennen kuin vaimentava jännitepulssi ehtii saapua vaimentamaan ylijännitettä. Täydelliseen heijastukseen vaadittava kulkumatka jännitepulssille eli kriittinen kaapelin pituus voidaan laskea yhtälöllä 8.

$$L_{kr} = \frac{t_r \times v}{2} \quad (8)$$

L_{kr} on kriittinen kaapelin pituus
 t_r on jännitepulssin nousuaika
 v on jännitepulssin kulkunopeus.

IGBT-transistorin kytkentäaika eli jännitepulssin nousuaika on tyypillisesti suuruusluokkaa 50–200 ns. Ajatellaan esimerkiksi edellisessä kohdassa esitettyä PVC-eristeistä moottorikaapelia, jolloin jännitepulssin kulkunopeudeksi saatiin noin puolet valonnopeudesta. Sijoittamalla lukuarvot yhtälöön 8, saadaan IGBT-transistoreilla toteutetulla moottorisillalla kriittiseksi kaapelin pituudeksi vain 3,75–15 metriä. [5.]

Yli kaksinkertaisia ylijännitteitä pääsee syntymään, kun edellinen jännitepulssi ei ole vielä vaimentunut uuden jännitepulssin saapuessa, jolloin ne summautuvat keskenään aiheuttaen suuria ylijännitteitä moottorin liittimissä. Näissä tilanteissa kaapelissa on edellisen jännitepulssin aiheuttama jäännösvaraus eli kaapelin kapasitanssit ovat edelleen varautuneita uuden jännitepulssin saapuessa. Moottorin impedanssin ollessa huomattavasti kaapelin ominaisimpedanssia suurempi tapahtuu jännitepulssin heijastuminen ja kaapelin ollessa riittävän pitkä ei taajuusmuuttajalta heijastunut negatiivinen pulssi enää kulkea takaisin moottorille vaimentamaan ylijännitteen syntymistä. Heijastuneet jännitepulssit jäävät värähtelemään taajuusmuuttajan ja moottorin välille, kunnes ovat lopulta vaimentuneet kokonaan.

Yhden värähdysjakson aikana jännitepulssi kulkee kaapelin pituuden neljä kertaa, eli sen polariteetti vaihtuu kertaalleen heijastuessa taajuusmuuttajalta ja toisella kerralla palautuu samaksi kuin lähtiessään. Kaapelin vaimennuksesta puhuttaessa tulee kaapelin ominaisvärähtelytaajuuden merkitys esille. Kaapelin ominaisvärähtelytaajuudella on vaikutus kaapelin jäännösvarauksen suuruuteen. Jännitepulssin kulkunopeus ja kaapelin pituus määrittävät kaapelille ominaisvärähtelytaajuuden, joten kaapelin ominaisarvoilla on jännitepulssin kulkunopeuden kautta ilmeinen vaikutus. Taajuusmuuttajan ja moottorin

ominaisarvot eivät vaikuta siihen. Kaapelin ominaisvärähtelytaajuus voidaan laskea yhtälöllä 9.

$$f_{osc} = \frac{1}{T} = \frac{1}{4 \times t_p} = \frac{v}{4L} = \frac{1}{4L\sqrt{L \times C}} \quad (9)$$

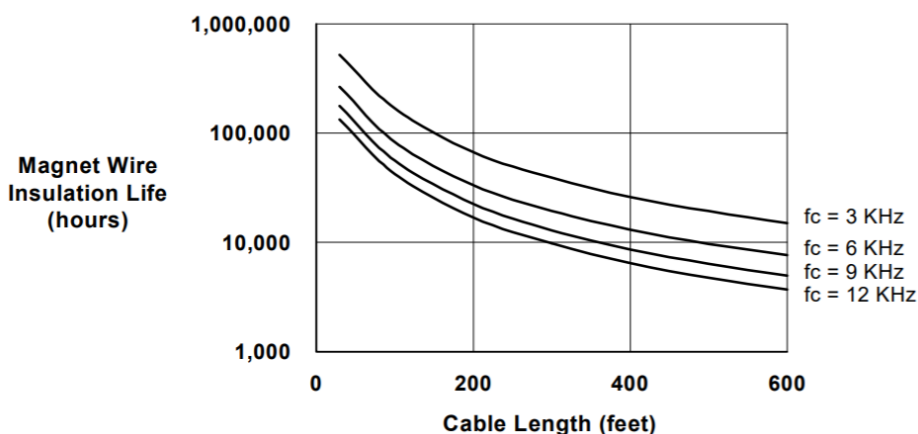
f_{osc} on kaapelin ominaisvärähtelytaajuus
 T on yksi värähdysjakso
 t_p on jännitepulssin kulku-aika
 L on kaapelin pituus
 v on jännitepulssin kulkunopeus
 l on induktanssi pituusyksikköä kohti
 c on kapasitanssi pituusyksikköä kohti.

Yhtälöstä nähdään, että kaapelin ominaisvärähtelytaajuus pienenee kaapelin pituuden kasvaessa. Tämä tarkoittaa, että kaapelin pidentyessä jännitteen värähtely on pitkäkestoisempaa. Jännitepulssin värähtely vaimenee sitä nopeammin, mitä suurempi kaapelin ominaisvärähtelytaajuus on. [5.] Värähtelyn vaimentuminen pohjautuu virranhahtiin. Virranhahti kasvattaa johtimen resistanssia ja sitä kautta myös vaimennusta. Virranhahti on taas värähtelytaajuuden funktio, joten värähtelytaajuuden kasvaminen nopeuttaa värähtelyn vaimentumista. [7, s. 11.]

3.5 Kytkeätaajuus

Kytkeätaajuudella on merkittävä vaikutus moottorissa syntyville jänniterasituksille. Tehopuolijohteiden nopeat kytkeäajat mahdollistavat suurien kytkeätaajuuksien käytön. Nopeiden kytkeäaikaisten seurauksena jännitepulssien nousunopeudet ovat erittäin nopeita, josta aiheutuvat haitat on esitetty aiemmin. Suurella kytkeätaajuudella moottorin virta on sinimuotoisempaa, mikä on hyvä asia moottorin toiminnallisuuden kannalta. Siinä on kuitenkin haittapuolensa, koska suuri kytkeätaajuus yhdistettynä pitkiin moottorikaapeleihin lisää ylijännitteiden syntymisen todennäköisyyttä huomattavasti. Tämä perustuu luonnollisesti siihen, että mitä nopeammin taajuusmuuttaja kytkee uuden jännitepulssin, niin sitä suuremmalla mahdollisuudella moottorikaapelin kapasitanssit ovat edelleen varautuneita eli edellisen jännitepulssin värähtely ei ole ehtinyt vaimentumaan, jolloin ne summautuvat aiheuttaen korkeita ylijännitteitä.

KytKentätäajuus vaikuttaa moottorin eristyksen elinikään. Kuvassa 15 on esitetty kytKentätäajuuden ja kaapelin pituuden vaikutus perinteisen pyörölangalla käämityn moottorin eristyksen elinikään. Moottorin eristyksen elinikä riippuu tietenkin moottorin tyypistä sekä eristyksen vahvuudesta, mutta kuvaa voidaan pitää suuntaa antavana.



Kuva 15. KytKentätäajuuden ja kaapelin pituuden vaikutus eristyksen elinikään [5].

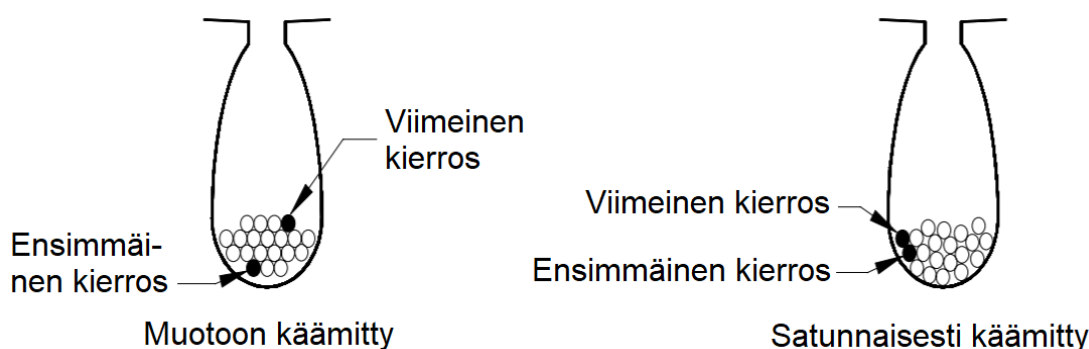
Kuvassa 15 huomioitavaa on, että eristyksen elinikä lyhenee huomattavasti kytKentätäajuuden ja kaapelin pituuden kasvaessa. Esimerkiksi kaapelin pituuden ollessa 150 jalkaa eli noin 46 metriä ja kytKentätäajuuden ollessa 3 kHz on eristyksen elinikä noin 100 000 tuntia. Saman pituisella kaapelilla kytKentätäajuuden ollessa 12 kHz elinikä on vain noin 25 000 tuntia eli vain neljänneksen verrattuna pienempään kytKentätäajuuteen. [6.]

3.6 Jänniterasitusten seuraukset

Nopeat jännitteen nousunopeudet ja niistä seuraavat jänniterasitukset aiheuttavat suurimmat rasitukset moottorin eristykselle. On myös havaittu, että ne voivat lisätä laakerivaurioita. Taajuusmuuttajan jännitepulssien korkean du/dt -arvon seurauksena moottorin staattorin ja roottorin välille syntyy jännite-ero, jonka seurauksena laakerin yli indusoituu jännite ja virta pääsee kulkemaan laakereiden kautta aiheuttaen niihin kulumista. Laakerivauriot ovat kuitenkin estettävissä melko yksinkertaisilla toimenpiteillä. Asentamalla järjestelmä oikeaoppisesti saadaan laakerijännite niin alhaiseksi, ettei virta pääse kulkemaan laakereiden kautta. Kaapelointi ja kunnollinen maadoitus ovat tärkeitä tekijöitä laakerivirtojen ehkäisemiseksi. [5.]

Taajuusmuuttajan syöttämät jyrkkäreunaiset jännitepulssit voivat aiheuttaa osittaispurkauksia eristykseen, jotka johtavat lopulta läpilyöntiin ja moottorin vikaantumiseen. Eristevauriot voivat syntyä pääeristykseen, vaiheväliseristykseen, vyyhtiväliseristykseen tai johdineristykseen. Pääeristys eristää käämin moottorin rungosta ja vaiheväliseristys kahden eri vaiheen käämit toisistaan. Pääeristys, vaiheväliseristys ja vyyhtiväliseristys on yleensä riittävän vahva kestämään jänniterasituksia. Lika ja kosteus voivat kuitenkin heikentää eristystä, jolloin osittaispurkaukset ja läpilyönti on mahdollinen niissäkin. Johdineristyksen jännitelujuus on edellä mainittuja pienempi, joten se on potentiaalinen paikka vikaantumiselle. [7, s. 17.]

Moottorin käämintätavalla on suuri merkitys eristyksen vaurioitumisen kannalta. Suurissa moottoreissa suositetaan yleensä muotokuparikäämistä. Muotokuparikäämissä johtimet ovat tankomaisia, jotka ovat aseteltu siistiin järjestykseen staattoriuraan. Pienissä moottoreissa käämintä on toteutettu yleensä lankakuparilla. Lankakuparia käytettäessä voidaan myös asettaa käämilangat siistiin järjestykseen, jolloin vyyhdin jokainen kierros on käärittä edellisen käännöksen viereen. Tällä varmistetaan, että vyyhdin jokainen kierros on kosketuksissa vain edelliseen ja seuraavaan kierrokseen, jolloin potentiaaliero pysyy pienenä kierrosten välillä. Usein käämintä toteutetaan kuitenkin niin, että käämilangat ovat satunnaisessa järjestyksessä staattoriurassa. Tällaisessa tapauksessa on mahdollista, että saman käämin ensimmäinen kierros voi olla kosketuksissa sen viimeisen kierroksen kanssa. Jännitteen epätasaisen jakautumisen ja korkeiden ylijännitteiden seurauksena potentiaaliero ensimmäisen ja viimeisen kierroksen välillä voi kasvaa liian suureksi johdineristykselle. Kuvassa 16 on esimerkki, jossa käämilangat on käämitty muotoon tai satunnaiseen järjestykseen. [11, s. 15–16.]



Kuva 16. Muotoon käämitty vyyhti ja satunnaiseen järjestykseen käämitty vyyhti [6].

Muotokuparikäämejä käytettäessä edellä esitetty tilanne ei pääse syntymään. Tästä syystä muotokuparikäämit ovat yleistyneet moottoreissa. Muotokuparikäämityksen valmistuskustannukset ovat kuitenkin korkeammat verrattuna satunnaiseen järjestykseen koneellisesti käämittyjen pyörölankakäämien kustannuksiin, jonka vuoksi pienissä moottoreissa harvoin käytetään muotokuparikäämejä. [7, s. 18.]

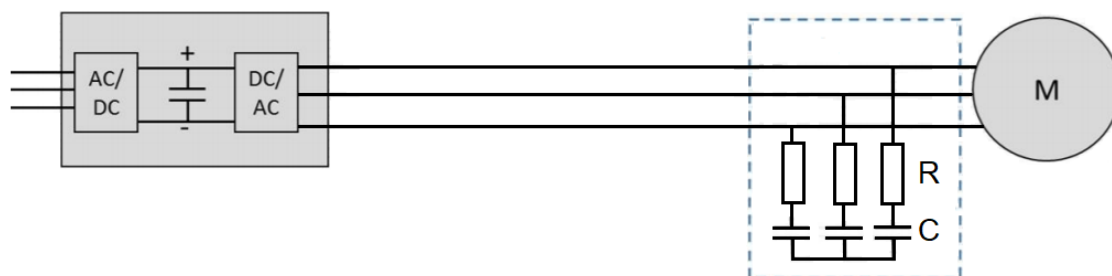
3.7 Jänniterasitusten ehkäisy

Taajuusmuuttajakäyttöihin on saatavilla sitä varten suunniteltuja moottoreita, joiden eristeet ovat vahvempia ja kestävät näin ollen taajuusmuuttajan aiheuttamat jänniterasitukset. Tällaiset moottorit ovat luonnollisesti tavallisia moottoreita kalliimpia sekä saattavat olla suurempia, koska vahvemmat eristeet vaativat lisätilaa. Kaikissa tapauksissa taajuusmuuttajakäyttöön suunniteltu moottori ei ole paras ratkaisu, jolloin kyseeseen tulee erilaiset suodatus menetelmät. [10, s. 18–19.] Suodatus on välttämätön etenkin silloin, kun modernisoidaan vanha DOL-käyttö taajuusmuuttajakäytöksi. Tällöin moottori on todennäköisesti suunniteltu matalataajuiselle sinimuotoiselle verkkojännitteelle, eikä todennäköisesti kestäisi kauaa taajuusmuuttajakäytössä. Suodatus voi tulla kuuloon myös silloin, vaikka moottori olisikin suunniteltu taajuusmuuttajakäyttöön. Moottorin elinikää saadaan pidennettyä suodattamalla ylijännitteet. Lisäksi etenkin pitkiä moottorikaapeleita käytettäessä jännitteen aaltomuotoa saadaan parannettua suodattamalla, jolloin moottori toimii paremmin. [6, s. 23.] Tässä luvussa esitellään yleisimmät suodatin ratkaisut ylijännitteiden syntymisen estämiseksi.

3.7.1 Pääteimpedanssi

Pääteimpedanssi on yksinkertaisin tapa estää ylijännitteiden syntyminen moottorin liittimissä. Pääteimpedanssin toiminta perustuu impedanssien sovittamiseen keskenään. Sen tehtävä on siis sovittaa moottorin ominaisimpedanssi vastaan kaapelin ominaisimpedanssia. Kun impedanssi moottorin liittimillä vastaa kaapelin ominaisimpedanssia tai impedanssiero on hyvin pieni, jännitepulssin heijastumista ei tapahdu ja suurilta ylijännitteiltä vältytään. Täydellinen sovitus vaatisi, että moottorin ja kaapelin ominaisuudet tiedetään tarkasti jokaisen asennuksen kohdalla ja pääteimpedanssi olisi mitoitettu sen mukaan. Täydellinen sovitus ei ole tarpeen, joten samaa pääteimpedanssia voidaan

käyttää useissa eri tilanteissa. Pääteimpedanssi vaatii asennustilaa moottorilla, joten sen käyttö nosturissa ei aina ole mahdollista tilanpuutteen vuoksi. [6, s. 24.] Yksinkertaisimmillaan moottorin rinnalle voidaan kytkeä pelkkä vastus, jonka resistanssi määräytyy kaapelin ominaisimpedanssin perusteella. Pelkän vastuksen käyttö ei ole kuitenkaan järkevä ratkaisu, sillä sen aiheuttama tehohäviö on niin suuri. Järkevämpi ratkaisu impedanssien sovittamisessa on kuvan 17 mukainen kondensaattorin ja vastuksen sarjaan kytkentä. [5.]

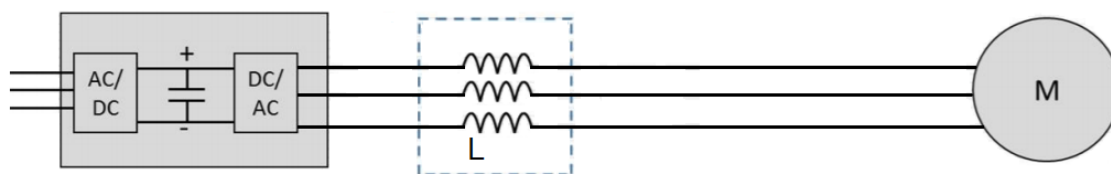


Kuva 17. Pääteimpedanssi [10, s. 22].

Jännitepulssi näkee kondensaattorin oikosulkuna ja vastus, jonka arvo on lähellä kaapelin ominaisimpedanssia, on hetkellisesti kytketty moottorin rinnalle estäen ylijännitteiden syntymisen. Kun kondensaattori latautuu, niin piirin läpi kulkeva virta pienenee eli vastuksen häviöt rajoittuvat vain jännitepulssin nousevan reunan mittaisiksi. Tehohäviö on tällöin huomattavasti pienempi verrattuna pelkästään moottorin rinnalle kytkettyyn vastukseen. [11, s. 21.]

3.7.2 Kuristin

Toinen yksinkertainen suodatin ratkaisu on kuristin. Kuristin kytketään moottorin kanssa sarjaan moottorikaapelin alkupäähän. Kuristin (kuva 18) koostuu kolmesta kelasta, jokaiselle vaiheelle oma. Kelan induktanssi vastustaa sen läpi kulkevan virran nopeaa muutosta ja hidastaa jännitepulssin nousuaikaa. [12, s. 156.]



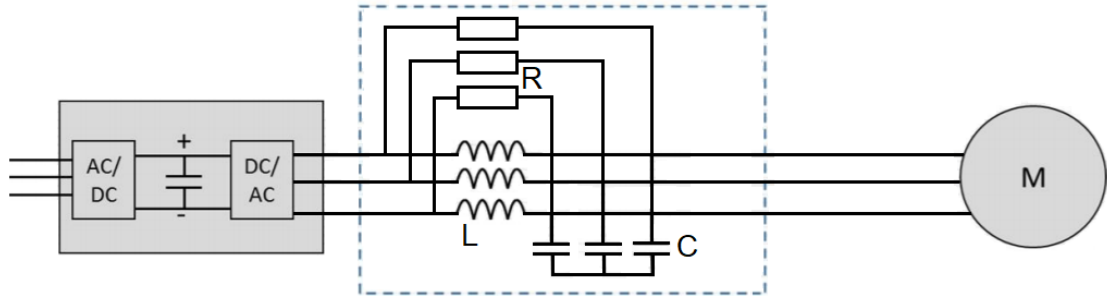
Kuva 18. Kuristin [13].

Jännitepulssin nousuajan ollessa pidempi voidaan käyttää pidempiä kaapeleita. Kuristimen toiminta heikkenee kaapelin pituuden kasvaessa. Jännitepulssin nousuaika on yksi vaikuttava tekijä kriittiseen kaapelin pituuteen. Kuristimen avulla saadaan jännitepulssin nousuaikaa hidastettua, jolloin kriittinen kaapelin pituus myös kasvaa. Ylijännitteitä pääsee kuitenkin muodostumaan taas, kun kaapelin kriittinen pituus ylitetään. Pahimmassa tapauksessa kuristin jopa lisää moottorille aiheutuvaa jänniterasitusta. Kuristin pienentää jännitteen nousunopeutta kasvattamalla jännitepulssin leveyttä, mutta jännitepulssin amplitudi pysyy samana. Tällaisessa tilanteessa jänniterasitukset ovat suurempia kuin mitä ne olisivat ilman kuristinta.

Kuristimen käyttö heikentää sähkökäytön hyötysuhdetta. Kuristin aiheuttaa jännitteen aleneman taajuusmuuttajan ja moottorin välille. Jännitteen aleneman seurauksena moottorin tehokerroin pienenee, mikä lisää lämpöhäviöitä ja moottorin hyötysuhde huononee. Jännitteen aleneman takia moottori ei siis kykene tuottamaan nimellismomenttia ylittämättä sen nimellisvirtaa. Kuristin on suhteellisen edullinen ja sopii hyvin käytettäväksi tietyissä tilanteissa, mutta se ei ole varteenotettava ratkaisu kaikissa tilanteissa, etenkin käytettäessä erityisen pitkiä moottorikaapeleita. [6, s. 22.]

3.7.3 Du/dt-suodatin

Hieman kuristinta kalliimpi, mutta kuitenkin melko edullinen ratkaisu on du/dt-suodatin. Du/dt-lyhenne tarkoittaa jännitteen muutosta suhteessa aikaan eli jännitteen muutosnopeutta. Du/dt-suodatin (kuva 19) on niin ikään taajuusmuuttajan lähtöön asennettava laite, joka koostuu kuristimista, mutta sen lisäksi myös kondensaattoreista ja mahdollisista vastuksista.

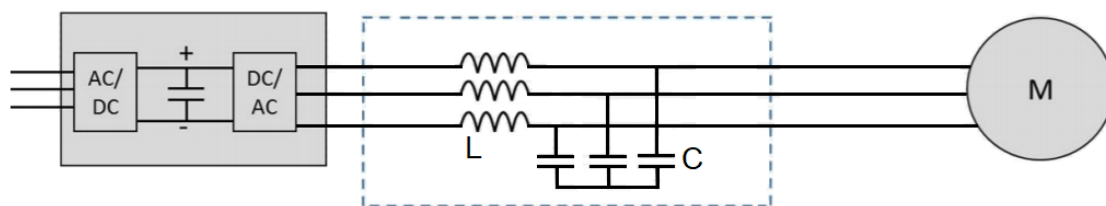


Kuva 19. du/dt -suodatin [13].

du/dt -suodatin on niin kutsuttu alipäästösuodatin. Sen suodatinpiirin resonanssitaajuus on viritetty vaimentamaan tiettyä taajuutta korkeammat taajuuskomponentit, eli sen resonanssitaajuuden on oltava moninkertainen taajuusmuuttajan kytkentätaajuuteen nähden. Suodatinpiirin ansiosta du/dt -suodatin pienentää jännitteen du/dt -arvoa tehokkaammin kuin pelkkä kuristin. du/dt -suodattimella saadaan tyypillisesti du/dt -arvo laskettua alle $500 \text{ V}/\mu\text{s}$, mikä puolestaan laskee jo huomattavasti heijastuvan huippujännitteen amplitudia ja nousunopeutta moottorin liittimillä. Heijastuvan huippujännitteen pienentyessä myös jännitteen värähtely on vähäisempää taajuusmuuttajan ja moottorin välillä parantaen jännitteen aaltomuotoa. du/dt -suodattimesta aiheutuva jännitteen alenema taajuusmuuttajan ja moottorin välillä on niin vähäinen, että sillä ei yleensä ole juurikaan merkitystä. [7, s. 26; 11, s. 20.]

3.7.4 Sinisuodatin

Sinisuodatin on myös taajuusmuuttajan lähtöön asennettava laite, joka nimensä mukaisesti tekee taajuusmuuttajan syöttämästä jännitteestä sinimuotoista. Sekin on alipäästösuodatin ja rakenteeltaan hyvin samankaltainen kuin du/dt -suodatin, mutta sen komponentit on mitoitettu eri tavalla. Sen induktanssi ja kapasitanssi arvot ovat paljon suuremmat verrattuna du/dt -suodattimeen, eikä tämän takia välttämättä tarvitse erillisiä vaimennusvastuksia. Näin ollen sinisuodatin voi koostua pelkistä kuristimista ja kondensaattoreista kuvan 20 mukaisesti. [13.]



Kuva 20. Sinisuodatin [13].

Sinisuodattimen tarkkaan toteutettu mitoitus mahdollistaa korkeataajuisien virtojen suodattamisen pois tehden jännitteen aaltomuodosta sinimuotoisen. Sen seurauksena moottori ei altistu ylijännitteille, koska jännite ei sisällä korkeataajuisia komponentteja. Sinisuodattimen resonanssitaajuus mitoitetaan huomattavasti pienemmäksi kuin du/dt -suodattimen. Resonanssitaajuus viritetään moottoria syöttävän jännitteen taajuuden ja taajuusmuuttajan kytkentätaajuuden välille. Resonanssitaajuuden täytyy olla huomattavasti pienempi kuin taajuusmuuttajan kytkentätaajuus, että korkeataajuiset komponentit saadaan suodatettua. Resonanssitaajuuden on kuitenkin oltava riittävän suuri, ettei se myöskään ole liian lähellä moottoria syöttävän jännitteen taajuutta. Resonanssitaajuuden mitoitukseen liittyvien haasteiden takia sinisuodattimen käyttö rajoittuu sovelluksiin, joissa käytetään suuria kytkentätaajuuksia eikä näin ollen sovellu aina nosturissa käytettäväksi. [10, s. 20–21.]

Sinisuodattimen käyttö soveltuu parhaiten herkkiin sovelluksiin, jossa halutaan pienentää taajuusmuuttajan aiheuttamia EMC-häiriöitä tai moottorin aiheuttamaa melua. Sinisuodattimen käyttö mahdollistaa myös hyvin pitkien moottorikaapeleiden käytön, jopa useiden satojen metrien mittaisten kaapeleiden. Sinisuodattimessa on kuitenkin paljon rajoittavia tekijöitä edellä mainittujen mitoitusteknisten haasteiden lisäksi. Kuristimien suurten induktanssiarvojen takia jännitehäviö nimellisvirralla on suuri rajoittaen moottorin maksimimomenttia, eivätkä sinisuodattimet sen takia sovellu suurta dynaamista suorituskykyä vaativiin sovelluksiin. Lisäksi suurten kuristimien ja kondensaattoreiden takia sinisuodatin on hyvin kookas ja painava sekä hankintakustannuksiltaan kallis. Näiden rajoittavien tekijöiden ja haittapuolien takia sinisuodattimien käyttö nostureissa on harvinaista. [11, s. 20–21.]

4 Mittaukset

Ylijännitteiden syntymistä tutkittiin oskilloskoopilla tehdyillä mittauksilla. Mittaukset suoritettiin Konecranesin moottoritestauslaboratoriossa. Mittauksilla todennettiin teoriaosassa esitettyjä tilanteita. Mittauksissa käytettiin pitkiä moottorikaapeleita, jotta jännitepulssin heijastusilmiö saatiin esille. Mittaukset tehtiin ensin ilman du/dt-suodatinta, jotta pystyttiin varmistamaan, että ylijännitteitä esiintyy moottorin liittimillä. Sen jälkeen samat mittaukset suoritettiin tutkittavilla du/dt-suodattimilla. Suodattimien kanssa tehtyjä mittauksia verrattiin ilman suodatinta tehtyihin mittauksiin, jotta suodattimien toimivuus pystyttiin varmistamaan.

4.1 Mittalaitteet

Mittaukset asettivat tiettyjä vaatimuksia mittalaitteille. Erityisesti huomioita oli kiinnitettävä mitattavan signaalin eli jännitepulssin nousunopeuteen sekä amplitudiin. Mitattavien jännitepulssien amplitudi voi nousta reilusti yli kilovoltin. Tästä syystä oli käytettävä erotettavaa ja vaimentavaa mittapäätä, jossa on riittävän suuri jännitekestoisuus. Lisäksi oli varmistettava, että mittapään sekä oskilloskoopin kaistanleveys on riittävä. Näissä mittauksissa mitattavan signaalin nousunopeuden määritteli IGBT:n kytkentäaika, eli sen voitiin olettaa olevan noin 50–200 ns. Oskilloskoopin ja mittapäiden kaistanleveyden oli oltava riittävä, että se näyttää mitattavan signaalin aaltomuodon oikein. Mittauksissa käytettiin 7 kV:n mittapäitä, joiden vaimennussuhde on 1:1000. Mittapäiden kaistanleveys on 70 MHz. Kaistanleveys riittää huomattavasti nopeampienkin nousunopeuksien mittaamiseen eli se oli varsin riittävä mitattaessa taajuusmuuttajan syöttämää jännitettä. Mittauksissa käytettiin kaksikanavaista oskilloskooppia, jonka kaistanleveys on 200 MHz, eli myös se riitti hyvin, vaikka mitattaisiin molempia kanavia samaan aikaan. Mittauksissa käytettiin myös tehoanalysaattoria, jolla mitattiin suodattimen aiheuttamaa jännitteenalenemää. Edellä mainitut seikat huomioiden mittalaitteiksi valikoituivat seuraavat:

- Fluke 199C ScopeMeter Color 200 MHz 2.5 GS/s
- Testec TT-SI 9010 Differential Probe 70 MHz 7 kV 1:1000
- Fluke Norma 5000 Power Analyzer.

4.2 Testijärjestelyt ja laitteisto

Mittauksissa käytetyt du/dt-suodattimet on mitoitettu niin, että ne täsmäävät uuden taajuusmuuttajasarjan teknisten arvojen kanssa. Suodattimen teknisiin arvoihin vaikuttaa se, käytetäänkö taajuusmuuttajaa nosto- vai siirtoliikkeessä. Nostoliikkeessä voidaan tarvita hyvinkin suuria nopeuksia kentänheikennysalueella, mikä vaatii suuremman kytkentätaajuuden käyttämisen. Siirtoliikkeessä niin suuria nopeuksia ei käytetä, joten kytkentätaajuus voi olla pienempi. Tästä syystä taajuusmuuttajalle on erilliset suodattimet nosto- ja siirtoliikkeelle. Mittauksissa tutkittiin kahden eri valmistajan suodattimia. Suodattimia A ja B käytettiin referenssinä mittauksissa. Suodattimet C ja D ovat uusia malleja, ja niiden toimintaa verrattiin referenssituotteisiin. Taulukossa 1 on esitetty testattavien laitteiden olennaisia arvoja. Suodattimet on mitoitettu testissä käytettyä taajuusmuuttajaa varten.

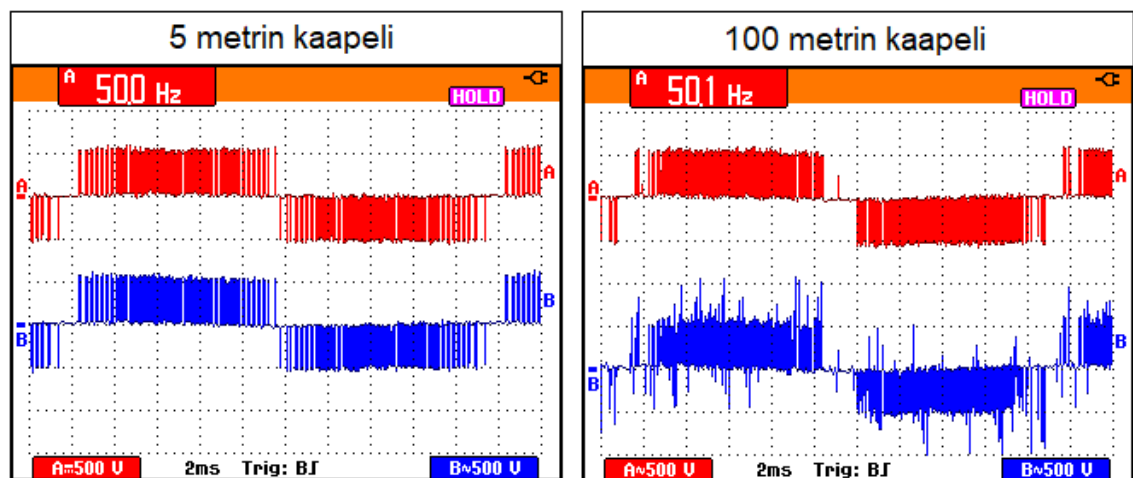
Taulukko 1. Testattavien laitteiden olennaisia arvoja.

Laite	Sovellus	U [V]	I [A]	f _{sw} [kHz]	f _{out} [Hz]
Taajuusmuuttaja	Siirtoliike	380–480	8,2	4	0–180
	Nostoliike	380–480	7,6	7	0–300
Du/dt-suodatin A	Siirtoliike	230–500	8,2	4	50–150
Du/dt-suodatin B	Nostoliike	230–500	7,8	7	50–320
Du/dt-suodatin C	Siirtoliike	230–500	8,2	4	50–150
Du/dt-suodatin D	Nostoliike	230–500	7,6	7	50–320

Mittauksissa käytetty 2,25 kW:n oikosulkumoottori oli asennettu kuormapenkkiin. Kuormapenkissä testimoottorin ja kuormakoneen akselit olivat kytketty yhteen. Kuormakoneen avulla testimoottoria pystyttiin käyttämään sekä moottorina että generaattorina. Mittauksissa käytettiin pääsääntöisesti 50 ja 100 metrin moottorikaapeleita. 100 metrin kaapeli saatiin kytkemällä kaksi 50 metrin kaapelia sarjaan. Kaapeleiden liitos tehtiin riviliittimillä. Yhdessä mittauksessa käytettiin 5 metrin moottorikaapelia. Suodatinmittauksissa du/dt-suodatin liitettiin puolen metrin mittaisella kaapelilla taajuusmuuttajaan. Moottorikaapelina käytettiin häiriösuojaamatonta lattakaapelia.

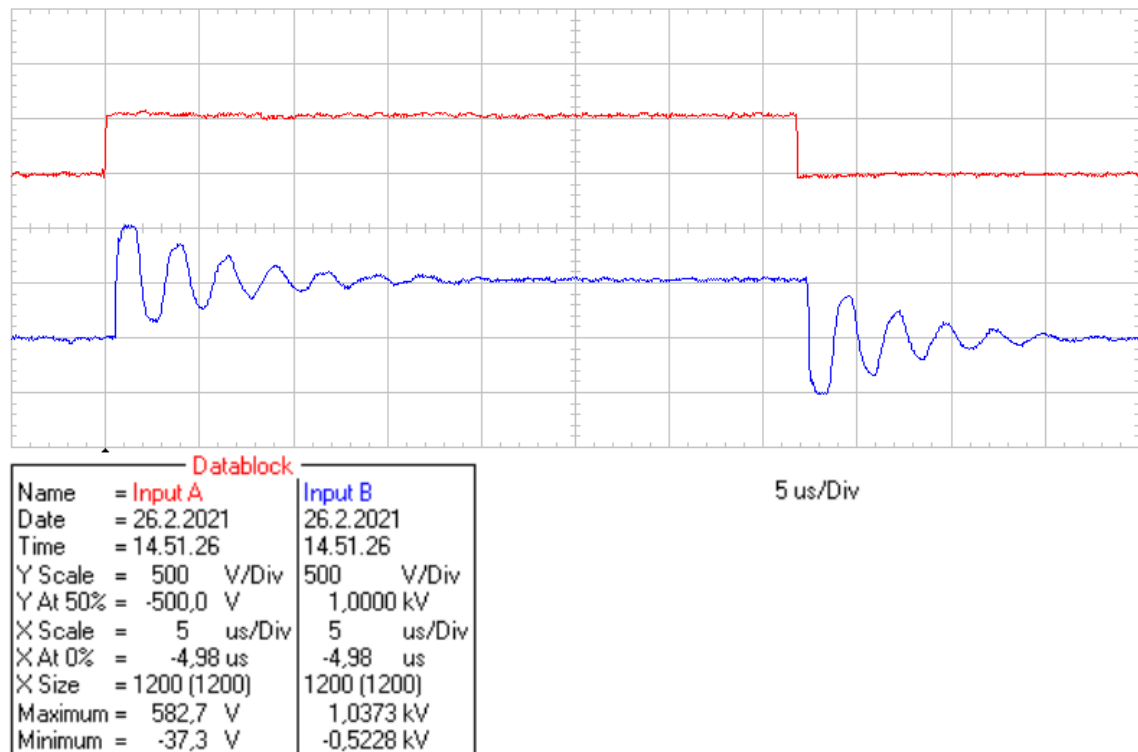
4.3 Mittaukset ilman suodatinta

Mittaukset suoritettiin ensin ilman suodatinta, jotta nähtiin lähtötilanne ja pystyttiin varmistamaan ongelman olemassaolo. Lähtötilanne oli myös tarpeen selvittää senkin takia, että suodattimien hyötyä pystyttiin arvioimaan. Kuvassa 21 on vertailun vuoksi mitattu yksi pääjännitteen jakso 5 metrin ja 100 metrin moottorikaapeleilla. Kuvasta voidaan havaita, että lyhyellä kaapelilla ylijännitteitä ei synny, mutta pitkällä kaapelilla jännitteet nousevat huomattavan korkeiksi.



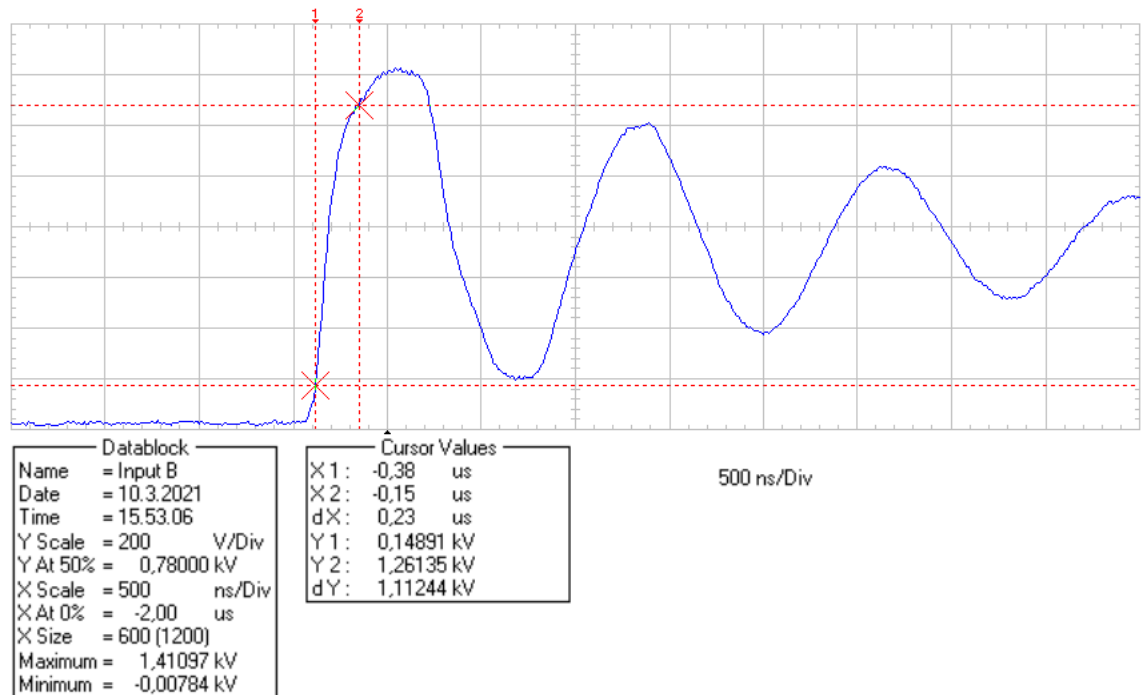
Kuva 21. Pääjännitteen yhden jakson aaltomuoto mitattuna samanaikaisesti taajuusmuuttajan liittimiltä (punainen) ja moottorin liittimiltä (sininen). Vasemmanpuoleinen mitattu 5 metrin kaapelilla ja oikeanpuoleinen 100 metrin kaapelilla. Taajuus 50 Hz.

Yksittäistä jännitepulssia tarkasteltaessa heijastusilmiö on helposti havaittavissa, kun käytetään pitkiä moottorikaapeleita. Kuvassa 22 on mitattuna yksittäinen jännitepulssi taajuusmuuttajan sekä moottorin liittimistä. Jännitepulssin nouseva reuna aiheuttaa heijastuksen moottorin liittimillä, jonka seurauksena jännitteen huippuarvo on lähes kaksinkertainen moottorilla. Heijastunut aalto jää värähtelemään hetkeksi, kunnes lopulta vaimenee ja jännite asettuu oikealle tasolle. Vastaava tilanne syntyy uudestaan taas jännitepulssin laskevan reunan kohdalla. Kuvassa on nähtävissä myös, kuinka jännite moottorilla nousee hieman myöhemmin verrattuna taajuusmuuttajaan. Tämä johtuu siitä, että jännitepulssilla kestää tietty aika kulkea taajuusmuuttajalta moottorille, kun välissä on 100 metrin moottorikaapeli.



Kuva 22. Yksittäinen jännitepulssi mitattuna samanaikaisesti taajuusmuuttajan liittimiltä (punainen) ja moottorin liittimiltä (sininen). Moottorikaapelin pituus 100 metriä.

Nosturikäytössä on kiinnitettävä huomiota myös välipiirin jännitteen vaihteluihin. Siirtoliikkeessä siirrettävän kuorman liike-energia pyrkii jatkamaan liikettään eteenpäin jarrutustilanteessa, jolloin moottori toimii hetkellisesti generaattorina ja välipiirin jännite nousee. Jarrutukset ovat kuitenkin lyhyt kestoisia, tyypillisesti vain joitakin sekunteja, joten siirtoliikkeessä ei esiinny pitkäkestoisia välipiirin jännitteen nousuja. Nostoliikkeessä sen sijaan tulee erityisesti huomioida tilanne, jolloin kuormaa lasketaan. Kuormaa laskettaessa moottorin pyörimissuunta ja momentti ovat saman suuntaisia, jolloin moottori toimii generaattorina ja välipiirin jännite nousee. Nostokorkeudesta riippuen kuormanlaskutilanteet voivat kestää jopa joitakin minuutteja. Välipiirin jännite voi suurimmillaan nousta jarrukatkojan toimintapisteeseen saakka. Testattavassa taajuusmuuttajassa jarrukatkoja aktivoitui välipiirin jännitteen noustessa 750 volttiin. Välipiirin jännitteen noustessa taajuusmuuttajan kytkemien jännitepulssien amplitudi kasvaa, jolloin myös moottorin liittimissä heijastuva ylijännite kasvaa samassa suhteessa. Kuvassa 23 on mitattu yksittäinen jännitepulssi moottorin liittimillä, kun välipiirin jännite on noussut jarrukatkojan toimintapisteeseen.



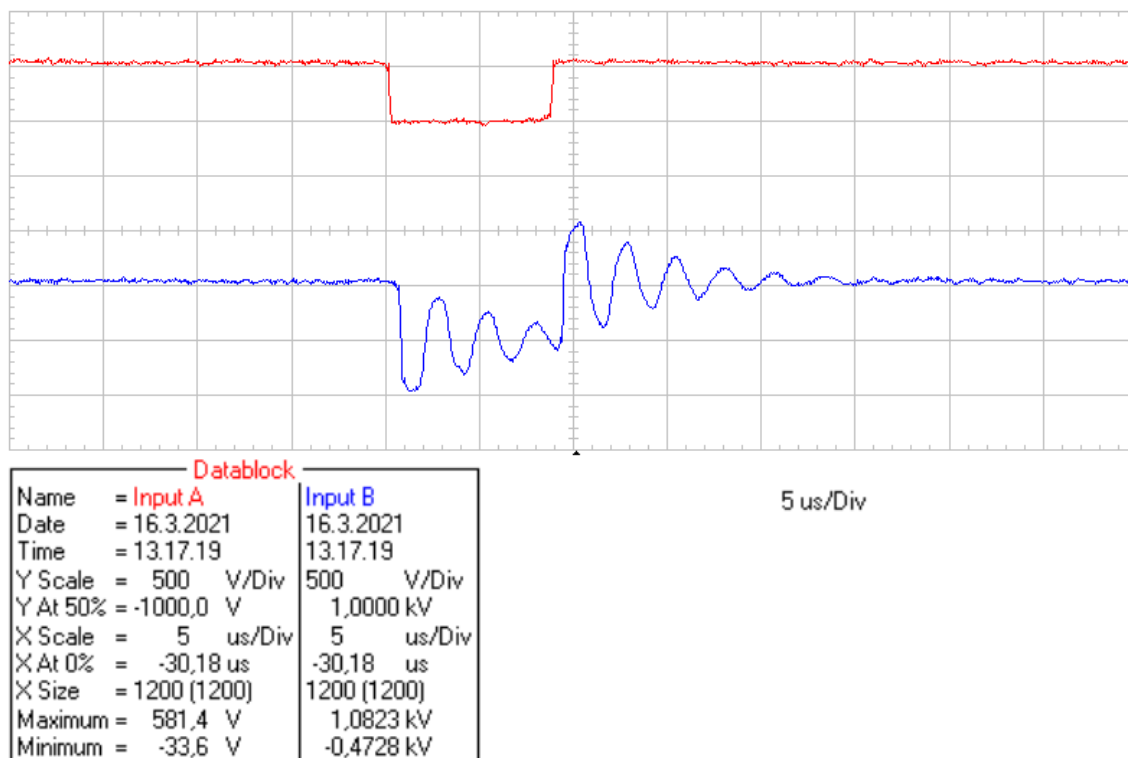
Kuva 23. Jännitteen nousunopeus mitattuna moottorin liittimiltä käytettäessä 50 metrin moottorikaapelia ja välipiirin jännitteen ollessa 750 V.

Kuvasta nähdään, että jännite nousee todella lyhyessä ajassa huippuarvoonsa, joka on n. 1411 V. Kuvassa aika-asteikko on 500 ns/ruutu. Kursoreita käyttämällä jännitteen nousunopeus saadaan laskettua aiemmin esitetyn yhtälön 4 mukaisesti, jolloin nousunopeudeksi saadaan

$$du/dt = \frac{1112,44 \text{ V}}{0,23 \mu\text{s}} = 4837 \text{ V}/\mu\text{s}$$

välipiirin jännitteen ollessa 750 V ja moottorikaapelin pituus 50 metriä. Jännitteen huippuarvo on huomattavan suuri ja yhdistettynä todella nopeaan nousunopeuteen se aiheuttaa voimakkaita rasituksia moottorin eristeille.

Syötettäessä moottoria yli 100 Hz:n taajuuksilla, suuria ylijännitteitä aiheutti myös se, että edellisen pulssin värähtely ei ollut vaimentunut kokonaan uuden jännitepulssin kytkeytyessä. Kuvassa 24 on nähtävissä tilanne, jossa edellisen jännitepulssin laskevan reunan ja seuraavan jännitepulssin nousevan reunan välinen varaukseton aika on niin lyhyt, että edellisen pulssin värähtely ei ole ehtinyt kokonaan vaimentumaan.



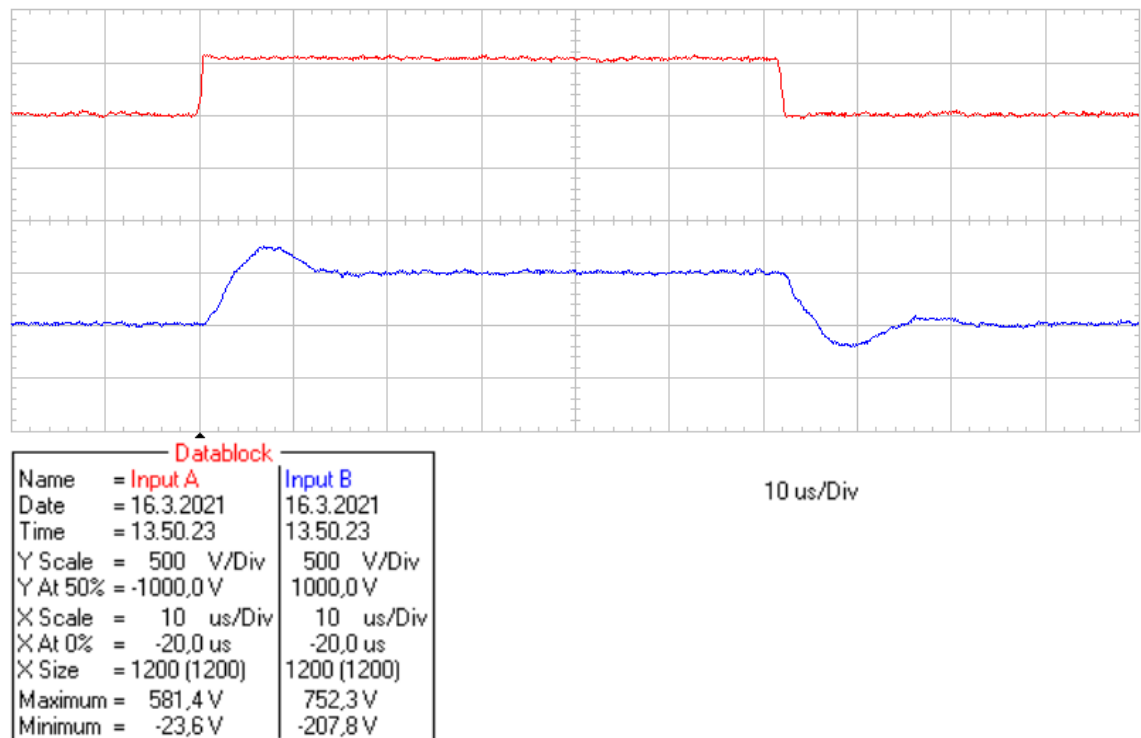
Kuva 24. Jännitteen voimakasta värähtelyä ajettaessa 100 Hz:n taajuudella. Moottorinkaapelin pituus 100 metriä.

Suurilla taajuuksilla jännitteen voimakkaan ja pitkäkestoisen värähtelyn seurauksena jännitteen huippuarvo nousi jopa yli 1200 V:n välipiirin jännitteen ollessa 540 V, eli jännite oli jopa yli kaksinkertainen verrattuna välipiirin jännitteeseen.

4.4 Mittaukset du/dt-suodattimilla

4.4.1 Referenssisuodattimet

Suodattimet A ja B ovat valmistajalta, jonka suodattimia on aiemminkin käytetty nostureissa. Suodattimien suorituskykyä käytettiin referenssinä uusien suodattimien suorituskykyä tarkasteltaessa. Kuvassa 25 on mitattu yksittäinen jännitepulssi taajuusmuuttajan sekä moottorin liittimistä suodattimella A. Verrattaessa kuvaa 22 ja kuvaa 25 nähdään moottorin liittimillä mitatussa jännitteessä selkeä parannus, kun käytetään suodatinta.

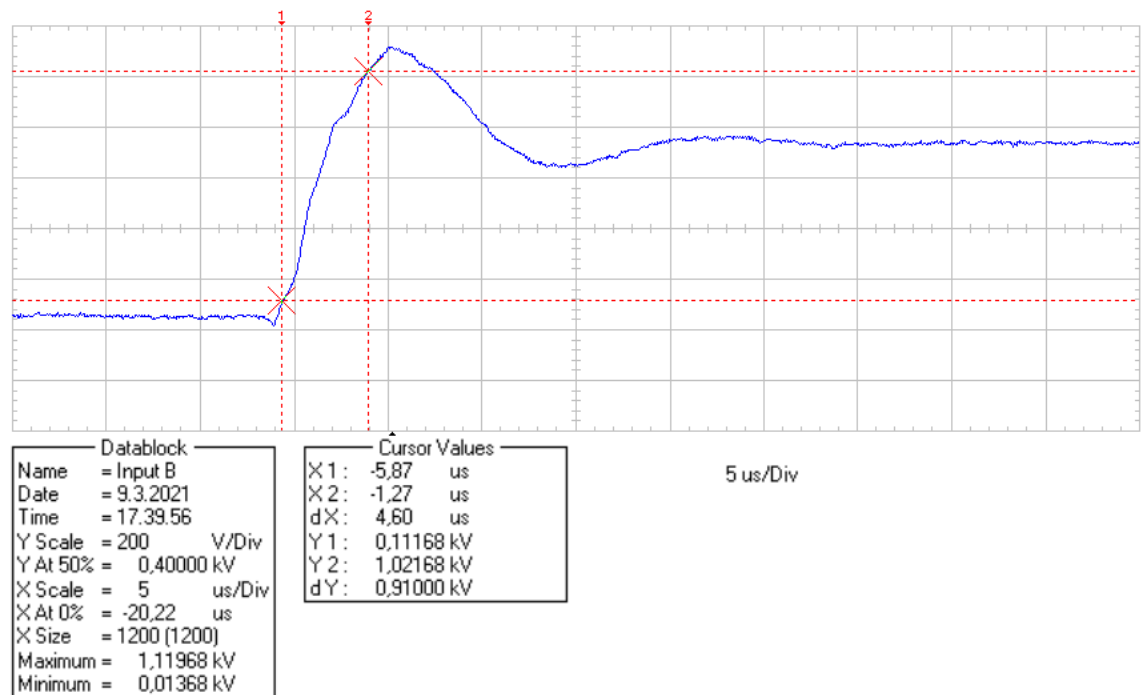


Kuva 25. Yksittäinen jännitepulssi mitattuna samanaikaisesti taajuusmuuttajan liittimiltä (punainen) ja moottorin liittimiltä (sininen), kun du/dt -suodatinta A on kytkettynä. Moottorikaapelin pituus 100 metriä.

Suodatinta käytettäessä jännitteen ylitys moottorilla on hyvin pieni verrattuna välipiirin jännitteeseen. Pieni ylitys tapahtuu kuitenkin aina, kun kyseessä on pulssimainen signaali. Suurimmat jännitteet syntyvät moottorin toimiessa generaattorina, jolloin välipiirin jännite on noussut huippuarvoonsa. Kuvassa 26 on suodattimella A mitattu suurin jännitepiikki, jonka huippuarvo on n. 1120 V. Kuvan aika-asteikko on 5 $\mu\text{s}/\text{ruutu}$. Kursoreita käyttämällä jännitteen nousunopeudeksi saadaan laskettua

$$du/dt = \frac{910 \text{ V}}{4,6 \mu\text{s}} = 198 \text{ V}/\mu\text{s}$$

välipiirin jännitteen ollessa 750 V ja moottorikaapelin pituus 100 metriä. Jännitteen nousunopeus on huomattavasti alhaisempi kuin ilman suodatinta. Nousunopeuden ollessa alhainen se ei rasita moottoria niin paljon. Jännitepiikin huippuarvo on myös n. 300 V alhaisempi kuin ilman suodatinta.

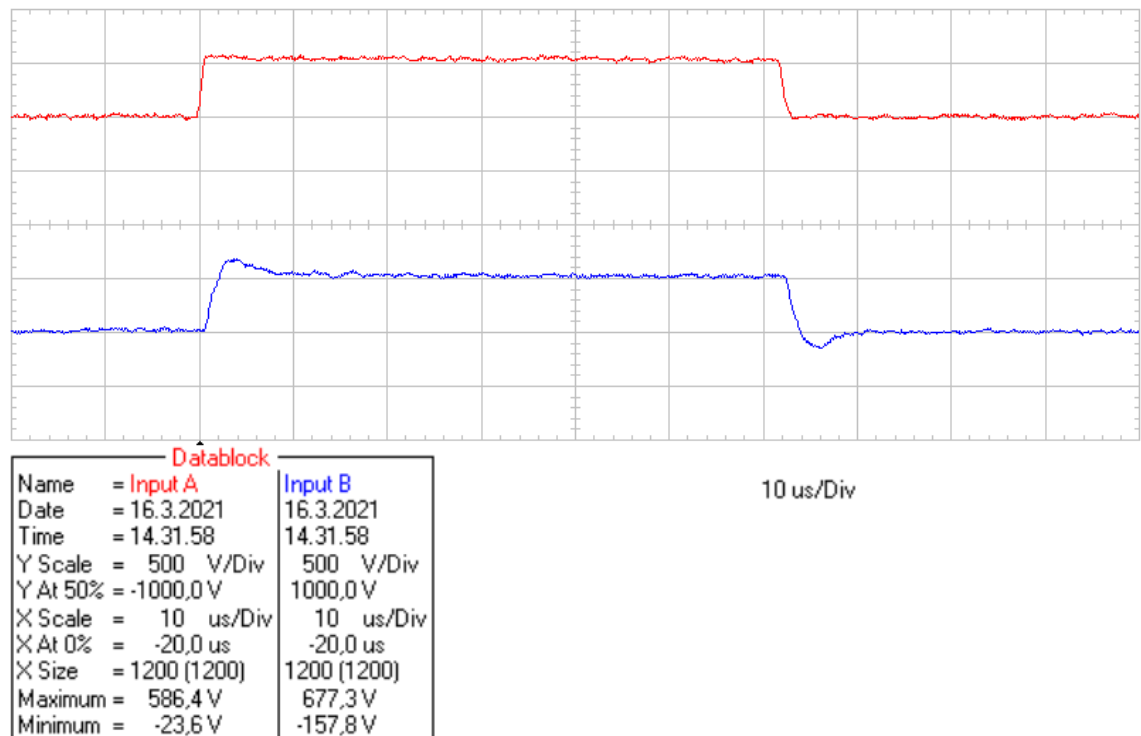


Kuva 26. Jännitteen nousunopeus mitattuna moottorin liittimiltä, kun du/dt -suodatin A on kytketty. Moottorikaapelin pituus 100 metriä ja välipiirin jännite 750 V.

Suodattimien aiheuttama jännitteen alenema mitattiin testattavan moottorin nimellistointipisteessä, jolloin jännite on 400 V taajuuden ollessa 100 Hz. Kuormakoneen avulla kuormitettiin testattavaa moottoria siten, että suodattimen nimellisvirta saavutettiin. Suodattimella A jännitteen alenema oli suurimmillaan 2,0 % ja suodattimella B suurimmillaan 2,1 %.

4.4.2 Testattavat suodattimet

Suodattimille C ja D suoritettiin samat mittaukset kuin referenssisuodattimille. Kuvassa 27 on mitattu yksittäinen jännitepulssi taajuusmuuttajan sekä moottorin liittimistä suodattimella C. Kuvasta voidaan havaita, että jännite moottorilla nousee hieman jyrkemmin, kun sitä verrataan referenssinä käytettyyn suodattimeen A. Jännitteen ylitys on kuitenkin hyvin pieni ja jännite asettuu nopeasti oikealle tasolle.

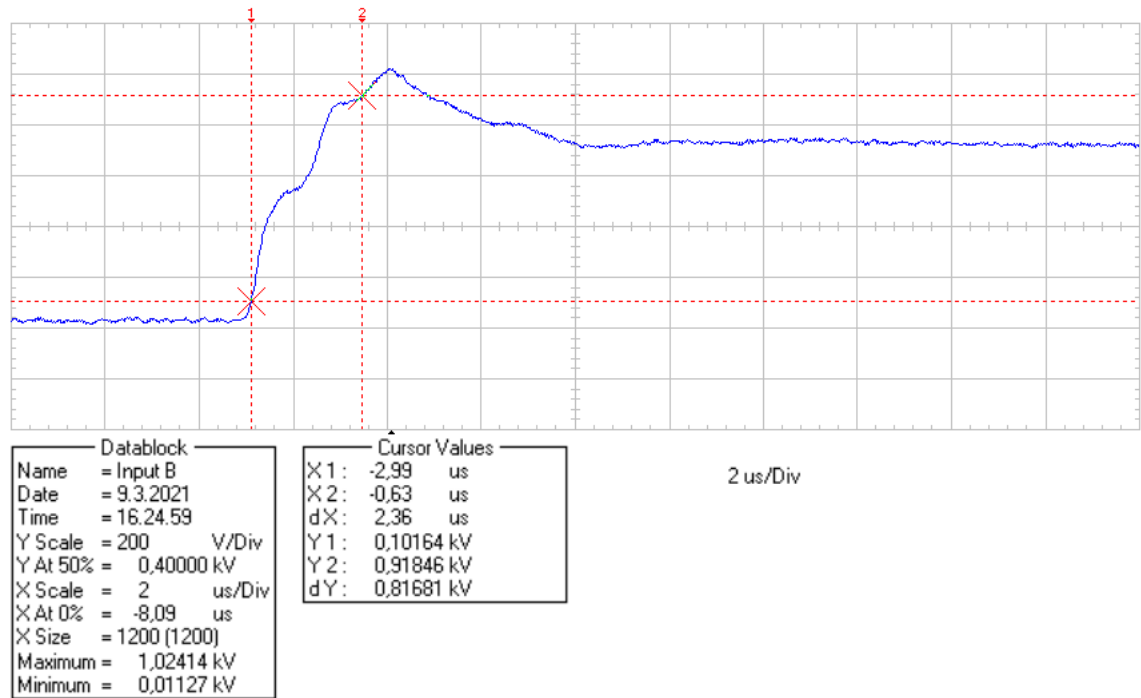


Kuva 27. Yksittäinen jännitepulssi mitattuna samanaikaisesti taajuusmuuttajan liittimiltä (punainen) ja moottorin liittimiltä (sininen), kun du/dt -suodatin C on kytkettynä. Moottorikaapelin pituus 100 metriä.

Uusilla suodattimilla mitatut suurimmat jännitepiikit ovat pienempiä verrattuna referenssisuodattimiin. Kuvassa 28 on suodattimella A mitattu suurin jännitepiikki, jonka huippuarvo on n. 1024 V. Kuvan aika-asteikko on 2 μs /ruutu. Kursoreita käyttämällä jännitteen nousunopeudeksi saadaan laskettua

$$du/dt = \frac{816,81 \text{ V}}{2,36 \mu s} = 346 \text{ V}/\mu s$$

välipiirin jännitteen ollessa 750 V ja moottorikaapelin pituus 100 metriä. Huomataan, että jännitteen nousunopeus on hieman suurempi kuin referenssi suodattimella. Se on kuitenkin riittävän alhainen, joten sillä ei ole suurta merkitystä. Tärkeämpää on, että jännitteen huippuarvo ei nouse liian suureksi. Uusilla suodattimilla jännitepiikkien suurimmat huippuarvot olivat n. 100 V pienempiä kuin referenssisuodattimilla.



Kuva 28. Jännitteen nousunopeus mitattuna moottorin liittimiltä, kun du/dt-suodatin C on kytketty. Moottorikaapelin pituus 100 metriä ja välipiirin jännite 750 V.

Uusien suodattimien aiheuttama jännitteen alenema mitattiin moottorin nimellistoimintapisteessä samalla tavalla kuin referenssisuodattimilla. Kuormaa säädettiin siten, että suodattimien nimellisvirta saavutettiin. Suodattimella C jännitteen alenema oli suurimmillaan 1,5 % ja suodattimella D suurimmillaan 1,7 %, eli jännitteen alenemat ovat hieman pienemmät kuin referenssisuodattimilla.

5 Mittaustulokset

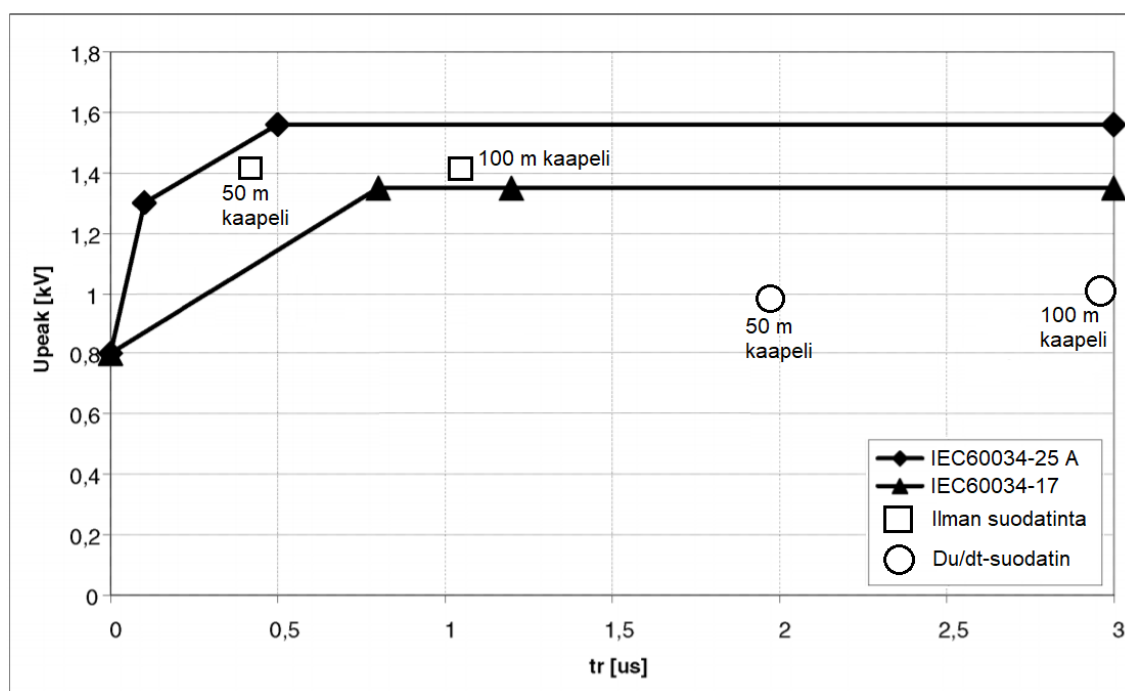
Ilman suodatinta tehdyissä mittauksissa oli selkeästi nähtävissä, että huomattavia ylijännitteitä esiintyy moottorin liittimillä, kun moottoria syötetään taajuusmuuttajalla ja käytetään pitkiä moottorikaapeleita. Jännitteen nousunopeus oli myös huomattavan suuri, tuhansia voltteja mikrosekunnissa, ja jännitteessä esiintyi pitkäkestoista värähtelyä. Kaikki testatut du/dt-suodattimet ehkäisivät tehokkaasti moottorille aiheutuvia jänniterasituksia. Suodattimet pienensivät selvästi jännitepiikkien amplitudia sekä nousunopeutta, eikä jännitteessä tapahtunut värähtelyä suodatinta käytettäessä. Taulukossa 2 on esitetty suurimmat mitatut jännitepiikit eri tilanteissa ilman suodatinta sekä suodattimien kanssa. Kaikki mittaustulokset ovat nähtävissä liitteessä 1.

Taulukko 2. Mittaustulokset.

Suodatin	Kaapeli [m]	U _{DC} [V]	U _{PEAK} [V]	U _{PEAK} / U _{DC}	Du/dt [V/μs]
Ilman suodatinta	50	540	1150	2,13	3587
	50	750	1411	1,88	4837
	100	540	1224	2,27	2174
	100	750	1413	1,88	2521
Du/dt-suodatin A	50	540	782	1,45	207
	50	750	1058	1,41	276
	100	540	818	1,51	147
	100	750	1120	1,49	198
Du/dt-suodatin B	50	540	760	1,41	215
	50	750	1038	1,38	251
	100	540	780	1,44	149
	100	750	1084	1,45	191
Du/dt-suodatin C	50	540	730	1,35	549
	50	750	989	1,32	605
	100	540	772	1,43	292
	100	750	1024	1,37	346
Du/dt-suodatin D	50	540	730	1,35	451
	50	750	986	1,31	610
	100	540	763	1,41	264
	100	750	1013	1,35	327

Ilman suodatinta jännitepiikin huippuarvo saattoi olla jopa yli kaksinkertainen suhteessa välipiirin jännitteeseen johtuen jännitteen pitkäkestoisesta värähtelystä. Suurimmat jännitepiikit syntyivät tilanteessa, jossa moottori toimi generaattorina ja välipiirin jännite nousi arvoon 750 V. Kaikki testatut suodattimet ehkäisivät selvästi jänniterasituksia. Referenssisuodattimet A ja B alensivat huippujännitteen maksimiarvoa 21–36 % verrattuna ilman suodatinta mitattuihin jännitteen maksimiarvoihin. Uudet suodattimet C ja D vähensivät huippujännitteitä vieläkin tehokkaammin, alentaen jännitteen maksimiarvoa 28–38 % verrattuna ilman suodatinta mitattuihin arvoihin. Jännitteen nousunopeus oli alhaisin referenssi suodattimilla A ja B, mutta jännitteen alenema oli hieman suurempi kuin uusilla suodattimilla C ja D. Jännitteen nousunopeus oli kuitenkin riittävän alhainen myös uusilla suodattimilla. Suodattimilla A ja B jännitteen alenema oli suurimmillaan 2–2,1 %, kun taas suodattimilla C ja D se oli suurimmillaan 1,5–1,7 %. Jännitteen alenema on niin pieni, ettei se alenna merkittävästi moottorin maksimimomenttia.

Suodattimien toimivuutta voidaan arvioida standardien avulla. Kuvassa 29 on esitetty IEC standardien asettamat suositusarvot sekä mittauksissa esiintyneet suurimmat jännitepiikit ilman suodatinta ja uusilla du/dt-suodattimilla.



Kuva 29. Ilman suodatinta ja uusien du/dt-suodattimien mittaustulokset vertailtuna standardien asettamiin suositusarvoihin [15].

Eurooppalainen standardointiorganisaatio IEC (*International Electrotechnical Commission*) on säätänyt suositusarvoja jännitteen nousunopeudelle ja jännitepiikin huippuarvolle. Standardin IEC 60034-17 suositusarvot koskevat perinteisiä verkkokäyttöisiä moottoreita ja standardin IEC 60034-25 A suositusarvot koskevat taajuusmuuttajakäyttöön suunniteltuja alle 500 V moottoreita. [15.] Kuvasta 29 nähdään, että ilman suodattinta jännitepiikit ylittävät standardin IEC60034-17 asettamat suositusarvot, joten suodattimen käyttö on välttämätöntä tilanteissa, jossa perinteistä verkkokäyttöön suunniteltua moottoria halutaan syöttää taajuusmuuttajalla ja käytetään pitkiä moottorikaapeleita. Etenkin 50 metrin kaapelilla ylitys on huomattava johtuen erittäin nopeasti jännitteen nousuajasta. Jännitepiikit pysyvät kuitenkin standardin IEC60034-25 A asettamien suositusarvojen alapuolella, joten suodattimen käyttö ei ole välttämätöntä, kun moottori on suunniteltu taajuusmuuttajakäyttöön. Uusien suodattimien C ja D jännitepiikkien huippuarvo ja nousuaika olivat niin lähekkäin toisiaan, ettei niitä ollut syytä erikseen kuvaan. Huomataan, että uusien suodattimien kanssa jännitepiikit jäivät alle standardien suositusarvojen. Näin ollen suodattimien kanssa voidaan myös perinteistä verkkokäyttöistä moottoria syöttää taajuusmuuttajalla, vaikka käytettäisiinkin pitkiä moottorikaapeleita.

6 Yhteenveto

Insinööriyön tavoite oli selvittää soveltuvatko uudet du/dt-suodattimet nosturikäyttöön. Tavoitteeseen pääsemiseksi tutustuttiin jänniterasitusten teoriaan sekä suoritettiin kokeelliset mittaukset suodattimille. Työn pohjalta voidaan todeta, että taajuusmuuttajan aiheuttamat jänniterasitukset ovat todellinen ongelma nostureissa. IGBT-transistorien kytkentäajat ovat lyhyitä, joten taajuusmuuttajan kytkemän jännitepulssin nousunopeus on suuri. Suuren jännitteen nousunopeuden ja heijastusilmiön seurauksena moottorin liittimillä ilmenee suuria ylijännitteitä etenkin pitkiä moottorikaapeleita käytettäessä. Nosturin rakenteet ovat suuria, joten pitkien moottorikaapeleiden käyttö on tavallista. Suuri jännitteen nousunopeus ja huippuarvo aiheuttavat rasituksia moottorin eristeille.

Ilman suodatinta tehdyt mittaukset tukivat teoriaosiossa esitettyjä asioita, jotka vaikuttavat jänniterasitukseen moottorilla. Lyhyellä kaapelilla ylijännitteitä ei ilmene, mutta kaapelin pidentyessä jänniterasitukset pahentuvat. Tässä työssä mittaukset suoritettiin 50 ja 100 metrin moottorikaapelilla. Molemmilla kaapeleilla jännitepiikkien huippuarvo saattoi nousta jopa yli kaksinkertaiseksi suhteessa välipiirin jännitteeseen. Jännitteen nousu yli kaksinkertaiseksi syntyi tilanteessa, jossa kahden perättäisen jännitepulssin välinen varaukseton aika ei ollut riittävän pitkä, jolloin edellisen jännitepulssin värähtely ei ollut ehtinyt vaimentumaan ennen kuin uusi jännitepulssi kytkeytyi. Jännitteen värähtelytaajuus pienenee kaapelin pidentyessä, eli jännitteen värähtely on pitkäkestoisempaa mitä pidempi kaapeli on. Suurimmat jännitepiikit esiintyivät, kun käytettiin 100 metrin kaapelia. Kaapelin pidentyessä jännitteen nousunopeus kuitenkin laskee kaapelin vaimentavan vaikutuksen johdosta. 50 metrin kaapelilla jännitepiikit olivat lähes yhtä suuria, mutta jännitteen nousunopeus huomattavasti suurempi. Suurin vaikutus jännitepiikkeihin oli välipiirin jännitteellä. Koska jännitepiikkien huippuarvo on suoraan verrannollinen välipiirin jännitteeseen, suurimmat jännitepiikit syntyivät välipiirin jännitteen noustessa sen maksimiarvoon eli jarrukatkojan toimintapisteeseen saakka.

Mittaukset osoittivat, että du/dt-suodattimien käyttö pienentää huomattavasti taajuusmuuttajan aiheuttamia jänniterasituksia. Ongelma ei poistu kokonaan, sillä du/dt-suodattimet eivät tee jännitteestä puhdasta sinimuotoista sähköä, vaan jännite on edelleen pulssimaista. Kahden eri suuruisten impedanssien rajapinnassa tapahtuu aina heijastusta, kun signaali on pulssimainen. Du/dt-suodattimella jännitteen nousunopeus ja ylitys

saadaan kuitenkin pidettyä riittävän alhaisena, ettei se rasita moottoria liikaa. Kaikki tässä työssä testatut du/dt-suodattimet alittivat standardin IEC 60034-17 suositusarvot koskien jännitteen huippuarvoa ja nousunopeutta. Tämä tarkoittaa, että jännitteen nousunopeus ja huippuarvo ovat riittävän alhaiset, että myös perinteistä verkkokäyttöön suunniteltua moottoria voidaan syöttää taajuusmuuttajalla, kun käytetään du/dt-suodattinta. Suodattimien aiheuttama jännitteen alenema oli du/dt-suodattimille tyypilliseen tapaan alhainen. Kaikkien tässä työssä testattujen suodattimien aiheuttama jännitteen alenema oli niin pieni, että se ei merkittävästi alenna moottorin maksimimomenttia.

Insinööriyön mittaukset suoritettiin niin, että vain yhtä moottoria syötettiin taajuusmuuttajalla. Lisäksi käytettiin vain yhtä kaapelityyppiä. Testissä käytettiin 2,25 kW:n moottoria. Pienellä moottorilla on huomattavan suuri impedanssi verrattuna kaapelin ominaisimpedanssiin, joten heijastuskerroin on myös suuri. Kaapelityyppi oli häiriösuojaamaton lattakaapeli, joka on epäsuotuisa epäsymmetrisyytensä vuoksi. Näin ollen voidaan olettaa jänniterasitusten olleen suuria. Jatkotutkimuksia suodattimille voidaan suorittaa syöttämällä useampaa moottoria samanaikaisesti yhdellä taajuusmuuttajalla sekä tehdä testejä eri moottori- ja kaapelityypeillä. Lisäksi suodattimien lämpenemä jatkuvassa käytössä ja mekaaninen kestoisuus tulee selvittää. Nosturissa mekaanista rasitusta aiheutuu esimerkiksi tärinästä.

Insinööriyö osoitti, että uudet du/dt-suodattimet ehkäisevät riittävän tehokkaasti jänniterasituksia. Uudet du/dt-suodattimet eivät alentaneet jännitteen nousunopeutta yhtä paljon kuin referenssinä käytetyt du/dt-suodattimet, mutta alensivat jännitepiikkien huippuarvoa paremmin. Jännitteen nousunopeus sekä huippuarvo uusilla suodattimilla on niin alhainen, että se ei rasita moottorin eristeitä. Näiltä osin voidaan todeta, että uudet du/dt-suodattimet soveltuvat nosturissa käytettäväksi ja mahdollistavat pitkien moottorikaapeleiden käytön.

Lähteet

- 1 Brand Portal. 2020. Material Bank. Yrityksen sisäinen dokumentti. Konecranes Oyj.
- 2 Halminen, Arto. 2007. Johdatus nosturi tekniikkaan. Yrityksen sisäinen dokumentti. Konecranes Oyj.
- 3 Kupila, Eero. 2019. Säädetyt käytöt 1. ja 3. Luentomoniste. Metropolia Ammattikorkeakoulu.
- 4 Kallio, Kai. 2003. Nopeustakaisinkytketty säätö nosturin sähkökäytössä. Diplomityö. Tampereen teknillinen yliopisto.
- 5 Ristola, Arja. 2019. Taajuusmuuttajakäytöt 1–10. Luentomoniste. Metropolia Ammattikorkeakoulu.
- 6 Effects of AC Drives on motor insulation. 1997. Verkkoaineisto. ABB Industrial Systems, Inc. <<https://library.e.abb.com/public/fec1a7b62d273351c12571b60056a0fd/voltstress.pdf>>. Luettu 2.1.2021.
- 7 Martin, Janne. 1998. Moottorin jänniterasitukset taajuusmuuttajakäytössä nosturissa. Diplomityö. Teknillinen korkeakoulu.
- 8 Kiel, Edwin. 2008. Drive solutions. Berlin: Springer.
- 9 Electrics Product Information. 2007. Power Drive System Basics. Yrityksen sisäinen dokumentti. Konecranes Oyj.
- 10 Heimonen, Tuomas. 2008. Moottoreiden ylijännitesuojaus taajuusmuuttajakäytössä. Insinööri työ. Helsingin Ammattikorkeakoulu Stadia. Doria-tietokanta.
- 11 Variable speed drives and motors. 2006. Motor Insulation Voltage Stresses Under PWM Inverter Operation. Technical guide. 3rd ed. London: GAMBICA/REMA Working Group.
- 12 Guzinski, Jaroslaw; Abu-Rub, Haitham & Strankowski, Patryk. 2015. Variable Speed AC Drives with Inverter Output Filters. E-kirja. John Wiley & Sons, Ltd.
- 13 Kampen, Dennis & Weicker, Martin. 2020. Effect of Passive Inverter Output Motor Filters on Drive Systems. Konferenssipaperi. IEEE Xplore.

- 14 Oleschuk, Valentin; Ermuratskii, Vladimir & Berzan, Vladimir. 2014. Elimination of subharmonics in spectra of output voltage of drive inverters with space vector PWM. Konferenssipaperi. IEEE Xplore.
- 15 Hanigovszki, Norbert; Landkildehus, Jorn & Bjaadbjerg, Frede. 2007. Output filters for AC adjustable speed drives. Konferenssipaperi. IEEE Xplore.

Mittaustulokset

Ilman suodatinta						
Kaapeli [m]	U _{DC} [V]	f [Hz]	f _{sw} [kHz]	U _{PEAK} [V]	U _{PEAK} / U _{DC}	Du/dt [V/μs]
50	540	50	4	1059	1,96	4023
50	540	50	7	1065	1,97	3890
50	750	50	4	1406	1,87	5239
50	750	50	7	1404	1,87	5368
50	540	100	4	1110	2,06	3806
50	540	100	7	1140	2,11	4295
50	750	100	4	1401	1,87	4967
50	750	100	7	1411	1,88	4837
50	540	150	4	1127	2,09	4060
50	540	150	7	1139	2,11	3540
50	540	300	7	1150	2,13	3587
100	540	50	4	1041	1,93	3066
100	540	50	7	1048	1,94	2966
100	750	50	4	1403	1,87	2699
100	750	50	7	1400	1,87	2597
100	540	100	4	1169	2,16	1947
100	540	100	7	1153	2,14	2336
100	750	100	4	1402	1,87	2502
100	750	100	7	1413	1,88	2521
100	540	150	4	1174	2,17	1930
100	540	150	7	1168	2,16	2584
100	540	300	7	1224	2,27	2174

Du/dt-suodatin A						
Kaapeli [m]	U _{DC} [V]	f [Hz]	f _{sw} [kHz]	U _{PEAK} [V]	U _{PEAK} / U _{DC}	Du/dt [V/μs]
50	540	50	4	782	1,45	207
50	750	50	4	1046	1,39	241
50	540	100	4	782	1,45	207
50	750	100	4	1058	1,41	276
50	540	150	4	774	1,43	201
100	540	50	4	818	1,51	147
100	750	50	4	1092	1,46	167
100	540	100	4	815	1,51	144
100	750	100	4	1120	1,49	198
100	540	150	4	808	1,50	146

Du/dt-suodatin B						
Kaapeli [m]	U _{DC} [V]	f [Hz]	f _{sw} [kHz]	U _{PEAK} [V]	U _{PEAK} / U _{DC}	Du/dt [V/μs]
50	540	50	7	760	1,41	215
50	750	50	7	1016	1,35	290
50	540	100	7	746	1,38	251
50	750	100	7	1038	1,38	279
50	540	150	7	728	1,35	240
50	540	300	7	740	1,37	195
100	540	50	7	780	1,44	149
100	750	50	7	1064	1,42	196
100	540	100	7	772	1,43	166
100	750	100	7	1084	1,45	191
100	540	150	7	760	1,41	154
100	540	300	7	778	1,44	160

Du/dt-suodatin C						
Kaapeli [m]	U _{DC} [V]	f [Hz]	f _{sw} [kHz]	U _{PEAK} [V]	U _{PEAK} / U _{DC}	Du/dt [V/μs]
50	540	50	4	725	1,34	536
50	750	50	4	988	1,32	649
50	540	100	4	730	1,35	549
50	750	100	4	989	1,32	605
50	540	150	4	715	1,32	526
100	540	50	4	772	1,43	292
100	750	50	4	1024	1,37	346
100	540	100	4	748	1,39	374
100	750	100	4	1017	1,36	395
100	540	150	4	733	1,36	364

Du/dt-suodatin D						
Kaapeli [m]	U _{DC} [V]	f [Hz]	f _{sw} [kHz]	U _{PEAK} [V]	U _{PEAK} / U _{DC}	Du/dt [V/μs]
50	540	50	7	730	1,35	451
50	750	50	7	981	1,31	597
50	540	100	7	728	1,35	516
50	750	100	7	986	1,31	610
50	540	150	7	701	1,30	492
50	540	300	7	697	1,29	372
100	540	50	7	763	1,41	264
100	750	50	7	1013	1,35	327
100	540	100	7	748	1,39	243
100	750	100	7	1011	1,35	317
100	540	150	7	720	1,33	240
100	540	300	7	724	1,34	250