

TEKNIIKAN JA LIIKENTEEN TOIMIALA

Sähkötekniikka

Sähkövoimatekniikka

INSINÖÖRITYÖ

MOOTTOREIDEN YLIJÄNNITESUOJAUS TAAJUUSMUUTTAJAKÄYTÖSSÄ

**Työn tekijä: Tuomas Heimonen
Työn valvoja: lehtori, DI Jari Ijäs
Työn ohjaaja: DI Petri Tiitinen**

Työ hyväksytty: __. __. 2008

**Jari Ijäs
lehtori, DI**



ALKULAUSE

Tämä sähkövoimatekniikan insinöörityö on tehty Konecranes Heavy Lifting Oy:n sähkölaitetehtaalle. Haluan kiittää työni ohjaajaa diplomi-insinööri Petri Tiitistä Konecranes Oy:stä hyvästä ohjauksesta ja saamastani avusta sekä kaikkia Konecranes CHE Support -osaston työntekijöitä. Lopuksi haluan kiittää lehtori, diplomi-insinööri Jari Ijästä Helsingin ammattikorkeakoulusta Stadiasta.

Hyvinkäällä 16.4.2008

Tuomas Heimonen

INSINÖÖRITYÖN TIIVISTELMÄ

Tekijä: Tuomas Heimonen	
Työn nimi: Moottoreiden ylijännitesuojaus taajuusmuuttajakäytössä	
Päivämäärä: 16.4.2008	Sivumäärä: 47 s.
Koulutusohjelma: Sähkötekniikka	Suuntautumisvaihtoehto: Sähkövoimatekniikka
Työn valvoja: lehtori, dipl.ins. Jari Ijäs	
Työn ohjaaja: dipl.ins. Petri Tiitinen	
<p>Tämä insinöörityö tehtiin Konecranes Heavy Lifting Oy:n sähkölaitetehtaalle. Työn tavoitteena oli löytää valmiita suodatinratkaisuja nostureissa käytettävien oikosulkumoottoreiden ylijännitesuojaukseen PWM-taajuusmuuttajakäytöissä, sekä tutkia ratkaisuja kokeellisesti mittauksilla.</p> <p>Työssä tutkittiin PWM-taajuusmuuttajakäytöissä ilmeneviä oikosulkumoottoreiden ylijänniteongelmia sekä olemassa olevia suodatinratkaisuja ylijänniterasituksien välttämiseksi. Ongelmaa ja suodattimia tutkittiin teoreettisesti sekä kokeellisesti nosturikäyttöjen kannalta. Kokeelliset mittaukset suoritettiin mittauslaboratoriossa kuormittamalla oikosulkumoottoria kuormapenkissä erimittaisilla moottorikaapeleilla, simuloiden nosturikäyttöille ominaisia tilanteita. Työssä esitellään moottoreiden ylijänniterasitukseen johtavia ongelmatekijöitä nosturikäytöissä ja sovelletaan siirtojohtoteoriaa taajuusmuuttajakäyttöön. Työssä esitetty teoria, käytäntö sekä mittaustulokset pätevät myös muihin taajuusmuuttajakäyttöihin.</p> <p>Työn alussa on esitelty tyypillisen siltanosturin rakenne ja taajuusmuuttajan toimintaperiaate. Tämän jälkeen ylijännitteen muodostuminen moottorilla on selitetty siirtojohtoteorian avulla. Lopuksi on tutkittu mittausten avulla nosturin sähkökäyttöihin soveltuvia du/dt-suodattimia ja moottorinsuojaukseen suunniteltua kuristinta. Mittaustuloksia on verrattu standardien antamiin ohjearvoihin ja arvioitu tutkittujen suodattimien toimintakykyä.</p> <p>Työn tuloksena saatiin uutta tietoa oikosulkumoottoreiden ylijännitesuojauksesta nosturikäytöissä sekä nostureissa mahdollisesti käytettävistä suodatinratkaisuista. Tuloksena saadun tiedon pohjalta voidaan arvioida mahdollisten suodattimien käyttötarvetta nostureissa. Työstä tehtyä testausraporttia voidaan käyttää tukena tulevissa jatkotutkimuksissa ja se mahdollistaa jatkotutkimuksen keskittämisen tehokkaasti.</p>	
Avainsanat: du/dt -suodatin, ylijännitesuojaus, siirtojohtoteoria	

ABSTRACT

Name: Tuomas Heimonen

Title: Motor Overvoltage Protection in Variable Speed Drives

Date: 16 April 2008

Number of pages: 47

Department: Electrical Engineering

Study Programme: Electrical Power Engineering

Instructor: Jari Ijäs, Senior Lecturer, M.Sc.

Supervisor: Petri Tiitinen, M.Sc.

This graduate study was carried out for Konecranes Heavy Lifting PLC electric's factory. The main goal for this thesis was to find a suitable filter solution for induction motor overvoltage protection to be used in crane applications. Suitable filter solutions and the overvoltage phenomenon were studied both theoretically and experimentally.

The experimental studies were executed in a laboratory environment, where an induction motor was driven in a load bench. Tests were carried out by simulating the characteristics of a normal crane application with three different cable lengths. Different factors that lead to the damaging overvoltage at the motor terminals in crane applications are presented and the overvoltage phenomenon is explained through the transmission line theory. The theory, practice and experimental results represented in this thesis may also be applied to other PWM frequency converter drives.

A typical overhead bridge crane and PWM frequency converter are introduced in the beginning of this thesis. Next, the overvoltage phenomenon is explained by applying the transmission line theory to frequency converter drives. Finally, two dv/dt-filters and one motor choke are studied experimentally. Experimental results are compared to reference values defined in international and national standards and the operation of these filter solutions are reviewed.

The results of this graduate study provide new information on induction motor overvoltage protection in crane applications. This new information enables the re-evaluation of the use of filters as protective devices in crane applications. The test report made of this study may be used as support for future studies and it helps in guiding these future studies effectively on important matters.

Keywords: dv/dt-filter, transmission line theory

SISÄLLYS

ALKULAUSE

TIIVISTELMÄ

ABSTRACT

SISÄLLYS

LYHENTEET

1	JOHDANTO	1
2	NOSTURI	2
2.1	Taajuusmuuttaja	4
2.1.1	<i>Tasasuuntaus</i>	5
2.1.2	<i>Vaihtosuuntaus</i>	6
2.2	Oikosulkumoottori	7
2.3	Nosturin sähkökäyttö	8
2.4	Moottorikaapelit	8
3	MOOTTOREIDEN YLIJÄNNITERASITUKSET	9
3.1	Jännitteen nousunopeus du/dt	10
3.2	Määräykset ja standardit koskien jännitteen nousunopeutta	11
4	SIIRTOJOHTOTEORIA PWM-TAAJUUSMUUTTAJAKÄYTÖSSÄ	12
4.1	Moottorikaapeli häviöttömänä siirtojohtona	13
4.2	Epäjatkuvuuskohta siirtojohdolla	14
4.3	Moottorin ja kaapelin korkeataajuusmallit	15
4.4	Yksinkertainen käsittelymalli	16
5	YLIJÄNNITESUOJAUS PWM-TAAJUUSMUUTTAJAKÄYTÖSSÄ	18
5.1	Taajuusmuuttajakäyttöön suunnitellut moottorit	18
5.2	Kuristin	19
5.3	Du/dt-suodatin	20
5.4	Sinisuodatin	20
5.5	Päätevastus	21

6	SUODATTIMEN VALINTA KÄYTTÖÄ VARTEN	22
6.1	Nosturikäytön tuomat vaatimukset suodattimelle	23
6.1.1	<i>Nostokoneiston kuormanlaskutilanne</i>	23
6.1.2	<i>Moottoreiden laajat käyttöalueet</i>	24
6.2	Suodattimien valinta tiettyyn käyttöön	25
7	SUODATTIMIEN TESTAAMINEN	25
7.1	Mittausjärjestelyt	26
7.1.1	<i>Mittauksiin käytetyt mittalaitteet</i>	26
7.1.2	<i>Mittauksiin käytetty testilaitteisto</i>	27
7.2	Tehdyt mittaukset	28
7.2.1	<i>Kuormanlaskutilanne</i>	28
7.2.2	<i>Jarrutustilanne huimamassalla</i>	28
7.2.3	<i>Suodattimien lämpötilakoe</i>	29
8	MITTAUSTULOKSET	29
8.1	Jännite moottorilla ilman suodatinta	30
8.1.1	<i>Jännitteen nousunopeus moottorin liittimillä</i>	32
8.1.2	<i>Kuormalaskutilanteen aiheuttama lisärasitus</i>	33
8.1.3	<i>Kaapelin pituuden vaikutus</i>	34
8.2	Du/dt-suodatin	36
8.2.1	<i>Kaapelin pituuden vaikutus</i>	38
8.2.2	<i>Vaihtojännitteen arvon ja taajuuden vaikutus</i>	39
8.3	Kuristin	41
8.4	Mittaustulosten vertailu	42
9	YHTEENVETO	44
	LÄHTEET	47

LYHENTEET

AWG 6	<i>American Wire Gauge 6</i> ; amerikkalainen johdinpinta-ala: 13,3 mm ²
D2H	<i>DynAHoist Vector II</i> , Konecranes Oy:n taajuusmuuttaja-malli
EMC	<i>Electromagnetic Compatibility</i> ; elektromagneettinen yhteensopivuus
EMI	<i>Electromagnetic Interference</i> ; elektromagneettinen häiriö
HNV-07	450/750 V nimellisjännitteelle tarkoitettu kaapeli
IGBT	<i>Insulated Gate Bipolar Transistor</i> , eristehilabipolaaritransistori
IEC	<i>International Electrotechnical Commission</i> ; kansainvälinen sähköalan standardeja säättävä organisaatio
NAMUR	<i>Normative Association for Measuring and Regulation Technology in the Chemical Industry</i> ; saksalainen kemianalan säännöksiä antava järjestö
NEMA	<i>National Electrical Manufacturers Association</i> ; pohjois-amerikkalainen tekniikan standardointijärjestö
PWM	<i>Pulse Width Modulation</i> , pulssinleveysmodulointi

1 JOHDANTO

Taajuusmuuttajat ovat yleistyneet teollisuuden sähkökäytöissä niiden mahdollistamien hyötyjen ja taloudellisten säästöjen takia. Taajuusmuuttajat ovat kehittyneet nopeasti ja niiden kehitykseen panostetaan jatkuvasti yhä enemmän. Niiden kehittyessä on kuitenkin ilmennyt joitakin käyttöihin liittyviä ongelmia. Syöttöverkkoon aiheutuvat harmoniset yliaallot ja ympäristöön säteilevät elektromagneettiset häiriöt ovat hyvin yleisiä ongelmia monissa taajuusmuuttajakäytöissä.

Tässä insinööriyössä perehdytään taajuusmuuttajan aiheuttamiin oikosulkumootoreiden ylijänniterasituksiin nosturikäytössä sekä tutkitaan olemassa olevia suodatinratkaisuja rasiustilanteiden estämiseksi. Ylijännitteen muodostumista ja suodattamista tutkitaan sekä teoreettisesti että kokeellisesti. Lisäksi käydään läpi syitä, jotka johtavat ylijännitteen muodostumiseen ja mahdollisesti moottorin tuhoutumiseen.

Kokeellisissa mittauksissa tutkitaan moottorin syöttöjännitettä sekä syöttöjännitteen taajuuden ja moottorikaapelin pituuden vaikutusta moottorilla ilmenevään ylijännitteeseen. Lisäksi mittauksissa simuloidaan nosturikäyttöille ominaisia tilanteita ja tutkitaan kahden eri suodattimen ja yhden moottorikuristimen toimintaa ylijännitesuojauksessa. Mittaustuloksia vertaillaan standardien antamiin ohjearvoihin.

IGBT-transistorin käytön yleistyessä taajuusmuuttajissa 1990-luvun alussa, taajuusmuuttajakäytöissä havaittiin ongelmia moottoreiden kestävyden kanssa. Moottoreiden staattorikäilyksissä havaittiin eristysvikoja ylijännitteen takia. Ylijänniteongelmaa taajuusmuuttajakäytöissä on tutkittu nykyään melko runsaasti ja myös joitakin ratkaisuja ylijänniteongelman välttämiseksi on kehitetty.

Taajuusmuuttajan aiheuttama moottorin ylijänniteongelma mielletään yleisesti liittyvän käyttöihin, joissa moottoria syötetään pitkillä kaapeleilla. Pitkien ja normaalipituisten kaapeleiden välille ei vedetä selvää rajaa ja kaapeleiden mieltäminen pitkiksi on lukijasta ja käytöstä riippuvainen. Nykyään taajuusmuuttajakäyttöön suunniteltujen moottoreiden käyttö on yleistynyt hyvin voimakkaasti ja moottoreiden vioittumiset vähentyneet tämän myötä. Nykyaikaisten moottoreiden käytön lisäksi erilaisia suodatinratkaisuja on kehitetty

moottoreiden suojaamiseksi vaativissa olosuhteissa. Ylijännitesuojauksen lisäksi suodattimilla on myös muitakin käyttötarkoituksia, joista esimerkkinä elektromagneettisten häiriöiden suodattaminen ja moottorin laakerivirtojen ehkäisy.

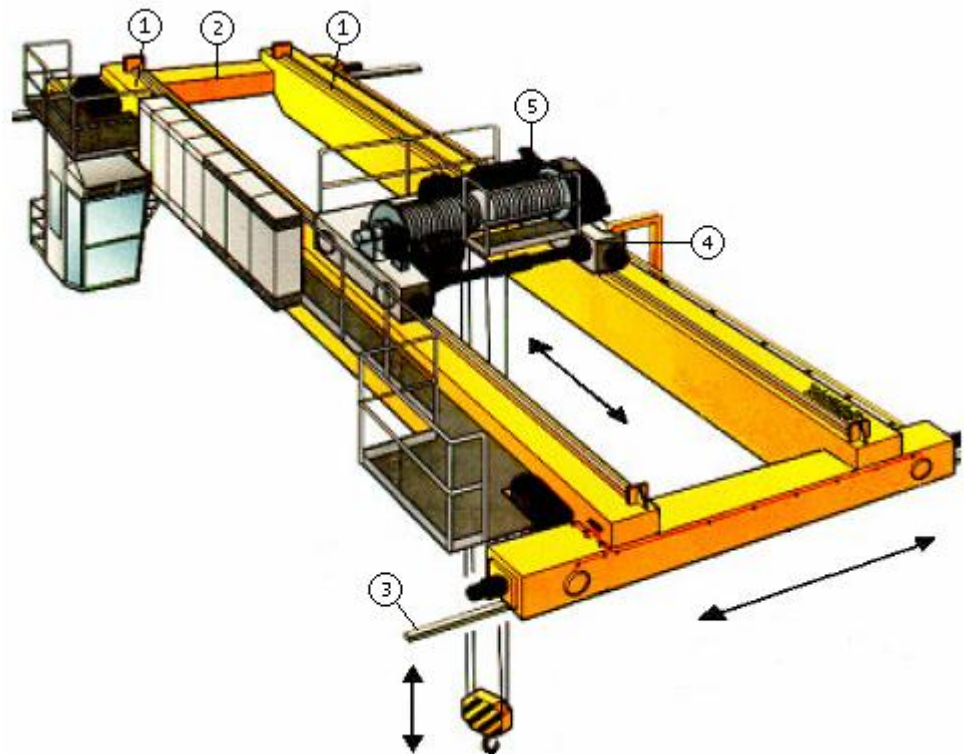
Nykyaikana teollisuusnostureiden nosto- ja siirtoliikkeet toteutetaan taajuusmuuttajakäyttöjen avulla. Nostureissa käytetään muihin teollisuuden sähkökäyttöihin verrattuna normaalia pidempiä kaapeleita moottoreiden ja taajuusmuuttajien välillä, minkä lisäksi yhdellä taajuusmuuttajalla voidaan ohjata useita moottoreita samanaikaisesti. Nostureissa onkin ilmennyt ongelmia moottoreiden ylijännitteiden takia. Tätä varten uusissa nostureissa käytetään taajuusmuuttajakäyttöön suunniteltuja moottoreita. Paremmin suojattujen moottoreiden käyttö ei kuitenkaan aina riitä ja moottorivaurioita voi tapahtua edelleen. Lisäksi vanhoissa modernisoitavissa nostureissa aikaisemmin tyristorikäytettyjä ja erilaisia verkkosyöttöisiä moottoreita halutaan käyttää taajuusmuuttajakäyttöisenä, joten niiden eristystaso on huomattavasti nykyaikaisia moottoreita alhaisempi.

Moottoreilla ilmenevä ylijännite nosturikäytössä johtuu pääosin jännitevälipiirillisen taajuusmuuttajan toimintatavasta, nosturikäytön luonteesta sekä moottorikaapeleiden pituuksien yhteisvaikutuksesta. Ylijänniteilmiö on selitettävissä soveltaen siirtojohtoteoriaa taajuusmuuttajakäyttöön. Siirtojohtoteorian mukaisesti taajuusmuuttajan syöttämät jyrkät tasajännitepulssit heijastuvat moottorilla suuren impedanssieron takia, aiheuttaen ylijännitteen muodostumisen moottorilla.

2 NOSTURI

Nosturit ovat merkittävässä asemassa lähes kaikessa teollisuudessa. Ne mahdollistavat raskaiden kappaleiden siirtämisen nopeasti ja tehokkaasti. Erilaisia nostureita onkin hyvin paljon erilaisten käyttötarkoitusten mukaan. Satamissa pyritään liikuttamaan nopeasti kontteja ja rahtia erikoisnostureilla. Prosessiteollisuudessa nosturi saattaa olla osa prosessia ja on avaintekijä prosessin toiminnassa. Nosturi voi myös olla osa varastointia ja toimia täysin automaattisesti varastossa liikuttaen esimerkiksi suuria paperirullia itsenäisesti.

Nostureiden rakenteet vaihtelevat hyvin paljon, mutta omaavat kuitenkin samat toiminnot. Nostokoneistolla nostetaan kuormaa ja siirtokoneistoilla siirretään nosturin eri osien paikkaa. Sähkökäytön kannalta suurin osa nostureiden toiminnoista on samanlaisia, vaikka nosturit olisivatkin erilaisia.



Kuva 1. Sillanosturi ja sen eri liikesuunnat [1]

Teollisuudessa yleisin käytetty nosturityyppi on rakennuksen katon rajassa kiskoilla kulkeva sillanosturi (kuva 1). Sillanosturi koostuu pääkannattimista, päädyistä, vaunusta ja nostokoneistosta. Pääkannattajat (kuva 1:1) kantavat itse nosturia ja sillä nostettavaa kuormaa. Päätyjen (kuva 1:2) ja pääkannattimien muodostamaa yhteistä rakennetta kutsutaan nosturin sillaksi. Useissa tapauksissa sillalla voidaan tarkoittaa myös koko nosturia. Päädyissä olevat kantopyörät mahdollistavat sillan liikkumisen rakennuksen kiskostoa (kuva 1:3) pitkin.

Nosturin vaunu (kuva 1:4) sisältää nostokoneiston, ja se liikkuu sillalla pääkannattajia pitkin. Joissakin nostureissa sillalla voi olla useita vaunuja ja vaunuissa voi nostokoneiston lisäksi olla sähkökaappeja. Vaunussa oleva nostokoneisto (kuva 1:5) koostuu nostomoottorista, vaihteesta, köysitelasta, köydestä, koukusta ja mekaanisesta jarrusta. Nosturin koon, kuormituksen ja mallin mukaan nostokoneistoja ja moottoreita voi olla useita. Nostokoneiston

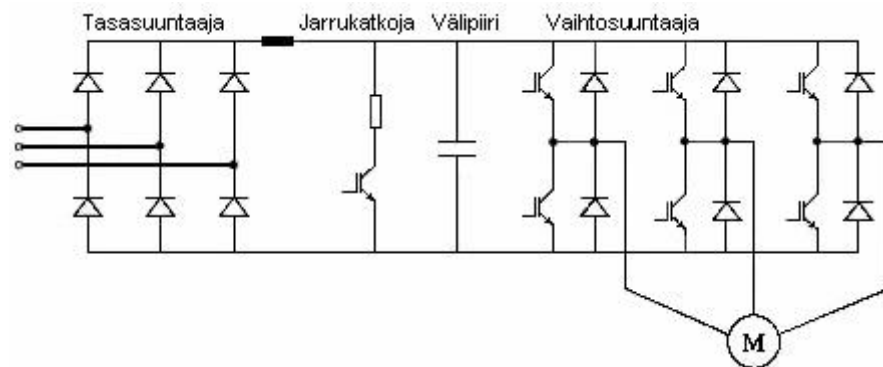
lisäksi vaunussa voi olla myös erilaisia koneistoja riippuen nosturin tavasta ottaa kuormasta kiinni. Yleisin tapa ottaa kuormasta kiinni on kuitenkin perinteinen koukku.

Sähköiset kojeet sijaitsevat pääosin sähkökaapeissa, lukuun ottamatta moottoreita sekä turvallisuuteen ja mittaamiseen tarkoitettuja antureita ja rajakytkimiä. Kuvan 1 mukaisessa siltanosturissa sähkökaapit sijaitsevat sillan päällä. Joissakin tapauksissa sähkökaapit vaativat runsaasti tilaa, eikä niitä voida sijoittaa lähelle moottoreita. Tällöin valtaosa sähkökojeista joudutaan sijoittamaan hyvinkin kauas itse nosturista, joskus jopa rakennuksen eri osaan.

2.1 Taajuusmuuttaja

Säädettävät vaihtosähkömoottorikäytöt ovat nykyaikana taajuusohjattuja. Tällöin oikosulkumoottorille syötettävää vaihtojännitettä muuttamalla voidaan moottorin pyörimisnopeutta ja sen tuottamaa vääntömomenttia säätää portaattomasti ja toisistaan riippumatta. Oikosulkumoottoreita voidaan ohjata taajuusmuuttajalla, joka muuttaa vaihtojännitteen amplitudia ja taajuutta halutuksi. Ohjaamalla taajuusmuuttajan toimintaa voidaan moottorilla tuottaa vakiovääntömomentti kierrosnopeudesta riippumatta.

Yleisin teollisuudessa ja nostureissa käytetty taajuusmuuttajatyyppe on jännitevälipiirillinen PWM-taajuusmuuttaja (*Pulse Width Modulation*; pulssinleveysmodulointi), jossa kolmivaiheinen vaihtojännite muodostetaan vaihtosuuntaajalla tasajännitettä pilkkomalla. Nykyaikana taajuusmuuttajissa käytetään sähköisinä kytkiminä nopeita IGBT-transistoreja (*Insulated Gate Bipolar Transistor*; eristehilabipolaaritransistori). Kuvassa 2 on esitetty normaalin diodisillalla tasasuuntaavan taajuusmuuttajan periaatekytkentä.



Kuva 2. Jännitevälipiirillisen taajuusmuuttajan periaatekytkentä [2, s. 21]

Taajuusmuuttajan tärkeimmät toiminnalliset komponentit ovat: tasasuuntaaja, välipiiri ja vaihtosuuntaaja. Kolmivaiheisesta vaihtojännitteestä muodostetaan tasasuuntaajalla välipiiriin yksi tasajännite, joka vaihtosuuntaajalla pilkotaan moottorille sopivaksi vaihtojännitteeksi erilevyisillä tasajännitepulsseilla. Jarrukatkoja kytkee moottoria jarrutettaessa välipiiriin jarruvastukset, joiden avulla moottorista vapautuva energia muutetaan lämmöksi.

2.1.1 Tasasuuntaus

Taajuusmuuttajan tasasuuntaus toteutetaan pääsääntöisesti verkkokommutoivalla kuusipulssidiodisillalla tai ohjatulla transistorisillalla. Tasasuuntaustavan määrittää taajuusmuuttajan käyttötarkoitus ja siltä vaadittavat ominaisuudet. Diodisillalla toteutetulla taajuusmuuttajalla voidaan verkosta ainoastaan ottaa tehoa, kun taas transistorisillan avulla taajuusmuuttajalla voidaan myös syöttää tehoa takaisin verkkoon. Energiatehokkuuden ja sähkökäytön hyötysuhteiden ollessa nykyaikana erittäin tärkeitä aiheita, ovat transistorisilloilla toteutetut tasasuuntaajat yleistymässä nostureissa käytettävissä taajuusmuuttajissa.

Verkkokommutoivalla diodisillalla tapahtuvassa tasasuuntauksessa välipiiriin muodostuva tasajännite määräytyy suoraan taajuusmuuttajaa syöttävän verkon jännitteestä. Kun käytetään diodisiltaa, välipiiriin muodostuva tasajännite on

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

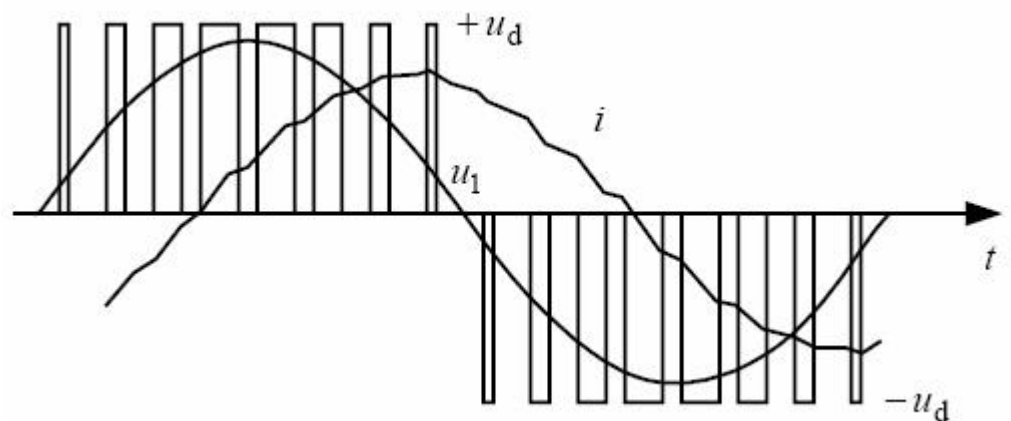
missä U_s on syöttävän verkon pääjännitteen tehollisarvo. Välipiirin tasajännite ei ole täysin vakio. Tasajännite muuttuu syöttävän verkon tilan mukaan sekä taajuusmuuttajan kuormitustason ja tehon kulkusuunnan mukaan. Välipiirissä olevilla kondensaattoreilla pyritään suodattamaan jännite tasaiseksi, jonka lisäksi ne toimivat taajuusmuuttajan energiavarastona.

Nostureissa sähkökäyttöihin sitoutunut energia jarrutetaan käyttämällä moottoria generaattorina, jolloin moottoriin ja kuormaan sitoutunut liike-energia syötetään takaisin taajuusmuuttajalle. Käytöstä vapautuva ylimääräinen energia kulkeutuu välipiiriin, jossa jarrukatkojaa ohjaamalla energia muutetaan jarruvastuksissa lämmöksi.

Kun tasasuunnataan ohjatulla transistorisillalla, voidaan transistorien toimintapistettä ohjaamalla säätää välipiiriin muodostuvan tasajännitteen tasoa. Välipiirissä oleva tasajännite voi ohjaustavasta riippuen olla suurempi tai pienempi kuin diodisilta käytettäessä. Transistorisillalla jarrutuksesta vapautuva energia voidaan syöttää takaisin verkkoon, joten jarruvastuksia eikä jarrukatkoja tarvita. [3.]

2.1.2 Vaihtosuuntaus

Taajuusmuuttajan vaihtosuuntaus perustuu välipiirin tasajännitteen pilkkomiseen. Kolmivaiheinen vaihtojännite muodostetaan johtamalla ajallisesti erimittaisia, mutta amplitudiltaan yhtä korkeita tasajännitepulsseja moottorille. Tätä kutsutaan pulssinleveysmoduloinniksi, jota on havainnollistettu kuvassa 3. Pulssikuviota muuttamalla voidaan tasajännitepulsseista muodostuvan vaihtojännitteen u_1 taajuutta ja tehollisarvoa muuttaa halutuksi.



Kuva 3. Taajuusmuuttajan syöttämä pääjännite, sen perusaalto u_1 ja moottorin virta i [2, s. 22]

Taajuusmuuttajan kytkentätaajuudella tarkoitetaan vaihtosuuntaajan transistorisillan kytkentänopeutta. IGBT-transistorien ja suurien kytkentätaajuuksien avulla pystytään johtamaan lyhytkestoisempia jännitepulsseja sekä muodostamaan tiheämpiä pulssikuvioita. Pulssien määrän kasvaessa ja niiden kestojen lyhentyessä vaihtojännitteen tehollisarvo muistuttaa yhä enemmän siniaaltoa. Suurilla kytkentätaajuuksilla pystytään ehkäisemään moottorin aiheuttamia meluhaittoja, jonka lisäksi kuormalle syötetty virta muistuttaa yhä enemmän siniaaltoa. [3.]

2.2 Oikosulkumoottori

Oikosulkumoottori on ylivoimaisesti käytetyin moottorityyppi nosturikäytöissä niiden kustannustehokkaan valmistuksen ja vähäisen huoltotarpeen ansiosta. Oikosulkumoottorin rakenne on hyvin yksinkertainen ja sen toimintavarmuus erittäin hyvä. Oikosulkumoottori kuuluu epätahtimoottoreihin, joissa staattorikäilyksessä pyörivä magneettikenttä aiheuttaa induktion kautta oikosuljettuun roottorikäilykseen virran. Pyörivän magneettikentän ja roottorin häkkikäilyksessä kulkevan virran ansiosta roottoriin kohdistuu vääntömomentti, joka saa roottorin akselin pyörimään. Moottorin pyörimisnopeutta voidaan säätää muuttamalla sille syötettävän vaihtojännitteen taajuutta ja amplitudia.

Nosturikäytöissä moottorit suunnitellaan käytettäväksi useissa eri käyttötarkoituksissa. Erilaisten mekaanisten vaihteiden ja taajuusmuuttajien avulla samaa moottoria voidaan käyttää useilla eri tavoilla. Kuvassa 4 on esitetty nosturissa käytettävän moottorin tyypillinen arvokilpi, josta käy ilmi moottorin erilaiset käyttötavat ja niitä vastaavat arvot.

MF16ZS200N265AB5078XRIP55		NR 1078623	  LR 253821
Y	60Hz 380-415V	D 100Hz 380-415V	
	45 kW S3-60	75 kW S3-60	
83A 1760r/min		142A 2970r/min	
COS φ 0.85 I ₀ 32		COS φ 0.82 I ₀ 58	
6 MIN ON 4OFF			
Y	70Hz 440-480V	D 120Hz 440-480V	
	52 kW S3-60	90 kW S3-60	
83A 2060r/min		142A 3570r/min	
COS φ 0.85 I ₀ 32		COS φ 0.84 I ₀ 58	
3 PH TAMB 40°C INS.CL. H/F ENCLTEFC			

X16394 MF16ZS200N265AB5078X
 KCl Spectra 147235-55/2/CZ0012/2/0/CA
 MF16ZS200N265AB5078XRIP55



Kuva 4. Tyypillisen nosturissa käytettävän moottorin kilpi [3]

Kaikissa nosturin liikkeissä on mekaaninen jarru, jolla pidetään kuorma ja moottori paikoillaan silloin kun nosturia ei käytetä. Taajuusmuuttaja ohjaa mekaanisen jarrun toimintaa ja avaa sen vasta kun turvallinen työskentely on taattu. Lisäksi moottoreissa on ylikuumentumisen varalta termistorit, jotka katkaisevat käytön moottorin käydessä liian kuumana. [3.]

2.3 Nosturin sähkökäyttö

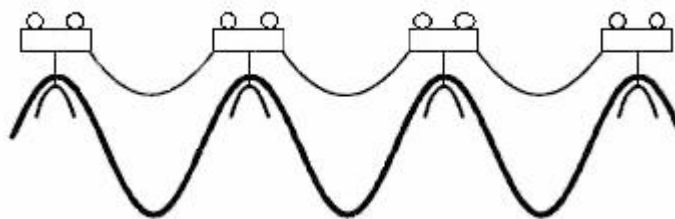
Nosturissa sähkökäytöllä tarkoitetaan PWM-taajuusmuuttajan ja oikosulkumoottorin yhdistelmää, jolla sähköinen energia muutetaan mekaaniseksi energiaksi. Taajuusmuuttajan avulla saavutetaan huomattavia säästöjä energiakustannuksissa perinteisiin liukurengasmootoreihin ja tyristorisäätöihin verrattuna. Taajuusmuuttajien avulla nostureiden ominaisuuksia ja käyttötapoja on lisäksi saatu parannettua merkittävästi.

Nosturikäyttöä varten räätälöityjen taajuusmuuttajien avulla nosturilla voidaan työskennellä hyvin tarkasti ja sulavasti. Lisäksi taajuusmuuttajien ympärille voidaan toteuttaa hyvin tehokas ja monipuolinen kokonaisuus, jolla nosturin käytöstä saadaan nopea ja tuotantoa tehostava ratkaisu. Nosturille voidaan asettaa erilaisia käyttöön liittyviä rajoituksia, joilla taataan turvallinen työskentely kaikissa tilanteissa. Eri toimintoja voidaan myös automatisoida.

Yhdellä taajuusmuuttajalla voidaan nosturikäytöissä syöttää useita moottoreita samanaikaisesti, kuten nostureiden siirtoliikkeissä usein tapahtuu. Lisäksi taajuusmuuttajia voidaan käyttää yhteiskäytössä, jolloin ne kommunikoivat keskenään ja toimivat yhdessä halutulla tavalla. Erilaiset säätömahdollisuudet ja taajuusmuuttajien räätälöitävyys mahdollistavatkin hyvin monimutkaisten toimintojen toteuttamisen nostureissa.

2.4 Moottorikaapelit

Nostureissa käytetään monia erilaisia kaapeleita taajuusmuuttajien ja moottoreiden välillä olosuhteiden mukaisesti. Nosturin eri osien liikkumisen ja suurien liikevälien johdosta kaapelointi pitää toteuttaa jollakin joustavalla ja suuria matkoja sallivalla tavalla. Nostovaunun kaapelointi onkin yleensä toteutettu ns. festoon-kaapelointina, jossa kaapelit roikkuvat nippuina satuloiden päällä (kuva 5).



Kuva 5. Festoon-kaapelointi [4]

Taajuusmuuttajavalmistajat suosittelevat yleisesti käytettävän häiriösuojattu- ja moottorikaapeleita. Suojatut kaapelit auttavat ehkäisemään kaapelista tulevaa sähkömagneettista säteilyä ja moottorissa ilmeneviä maavuotovirtoja. Maavuotovirtojen on havaittu aiheuttavan moottorin laakereille ennenaikaista kulumista ja vioittumista. Häiriösuojattu pyöreä kaapeli on sähköisesti symmetrinen, minkä takia itse kaapelissa ei synny eri vaiheiden välille epäsymmetrisiä häiriöitä. Suojatut kaapelit eivät kuitenkaan taivu kunnolla, joten niiden käyttö ei sovellu liikkuvuutta ja joustavuutta vaativiin nostureihin. Lisäksi useat taajuusmuuttajavalmistajat rajoittavat suojattujen kaapeleiden sallittuja enimmäispituuksia enemmän kuin suojaamattomien kaapeleiden enimmäispituuksia niiden suuremman hajakapasitanssin takia.

Suojattujen kaapeleiden soveltumattomuuden takia nostureissa käytetäänkin enimmäkseen suojaamattomia kaapeleita. Taajuusmuuttajan ja moottorin välillä yleisin kaapelityyppi on suojaamaton lattakaapeli. Suojaamaton lattakaapeli onkin epäsymmetriansa takia myös sähköisesti hyvin epäsymmetrinen ja voi aiheuttaa eri vaiheiden välille eromuotoisia häiriöitä. Ottaen huomioon nosturin eri osien suuret liike-etäisyydet ja kojeiden pitkät välimatkat, taajuusmuuttajan ja moottorin välillä saattaa olla useita satoja metrejä kaapelia. Onkin hyvin yleistä, että taajuusmuuttajan ja moottorin välillä olevan kaapelin malli vaihtuu nosturin eri osissa. [4.]

3 MOOTTOREIDEN YLIJÄNNITERASITUKSET

IGBT-transistorin yleistyttyä taajuusmuuttajissa alkoi teollisuudessa ja etenkin nostureissa ilmetä ongelmia moottoreiden ennenaikaisen kulumisen ja vikaantumisen kanssa. Moottori saattoi vioittua hyvinkin nopeasti ja käämitys tuhoutui jo muutamien käyttötuntien aikana. Kuvatuissa ongelmatapauksissa moottoreiden käämityksien eristystason huomattiin heikenneen liian alhaiseksi ja käämien vioittuneen läpilyöntien takia.

Ongelmaa tarkasteltaessa moottoreiden liittimiltä on mitattu usein hyvin suuria jännitteitä, jotka ovat olleet jopa kolminkertaisia taajuusmuuttajan välipiirin tasajännitteeseen nähden. Ongelmat rajoittuivat pääsääntöisesti niihin käyttöihin, joissa taajuusmuuttajan ja moottorin välillä olevien kaapeleiden mitat olivat pitkiä. Käytännössä tämä tarkoittaa useiden kymmenien metrien mittaisia kaapeleita. Lisäksi suuria ongelmia ilmeni nostureissa, joissa yhdellä taajuusmuuttajalla syötettiin useita moottoreita samanaikaisesti.

Jänniterasitusten on havaittu aiheuttavan erilaisia vaurioita moottorin eristyksiin osittaispurkauksien kautta, joissa suuren potentiaalieron takia elektroneja purkaantuu ilman ja eristemateriaalin läpi alempaan potentiaaliin. Osittaispurkaukset vanhentavat ja kuluttavat eristeitä, johtaen lopulta läpilyöntiin. Läpilyönnejä voi tapahtua käämien ja rungon välillä, eri vaihekäämien välillä, vyyhtien välillä tai jopa saman vaihekäämin eri kierrosten välillä. Jänniterasitusten ilmeneminen ja niistä seuraavien vaurioiden laatu vaihtelee hyvin paljon moottorin käämityksen ja useiden erilaisten eristystapojen mukaan. Lisäksi lian, kosteuden ja erilaisten haitallisten aineiden ilmeneminen moottorin sisällä saattaa edesauttaa vikojen ilmenemistä. [5.]

3.1 Jännitteen nousunopeus du/dt

Jännitteen nousunopeudella eli du/dt -arvolla tarkoitetaan taajuusmuuttajan moottorille syöttämän jännitepulssin nousunopeutta. Jännitteen nousunopeus määräytyy pääosin taajuusmuuttajan IGBT-transistorien toimintanopeudesta sekä kaapelin vaimentavasta vaikutuksesta. Kaapelin sisältämä impedanssi vaimentaa hiukan nousunopeutta, joten du/dt -arvo ei ole sama taajuusmuuttajan lähdössä ja moottorin liittimillä. PWM-taajuusmuuttajien vaihtosuuntauksessa käytetyt IGBT-transistorit kykenevätkin toimimaan hyvin nopeasti, aiheuttaen taajuusmuuttajan ulostuloliittimillä jännitepulssille du/dt -arvoksi

$$1-5 \frac{kV}{\mu s}.$$

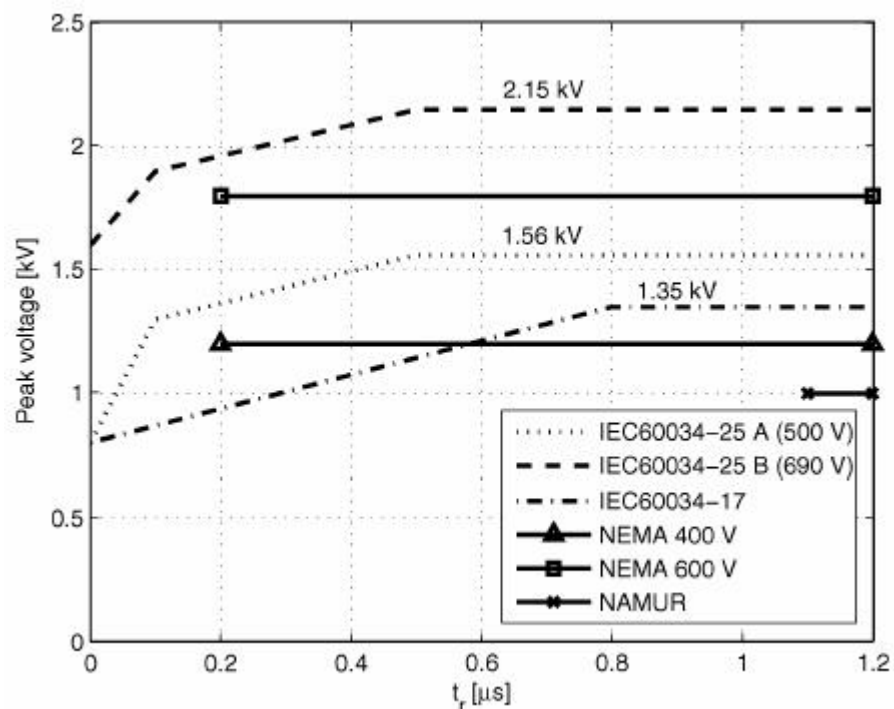
IGBT-transistorin toimintanopeus ei ole täysin vakio, joten eri jännitepulssien välillä on eroja. Lisäksi eri transistorien välillä voi olla huomattavia eroja. [6, s. 3.]

Suuri jännitteen nousunopeus saattaa aiheuttaa läpilyönnin saman käämin eri kierrosten tai jopa peräkkäisten kierrosten välillä. Näissä tilanteissa jännite kasvaa niin voimakkaasti, ettei se ehdi vaikuttamaan vielä vierekkäisellä käämin kierroksella. Aiheuttaen näin suuren potentiaalieron ja mahdollisen läpilyönnin. Vyyhden sisällä tapahtuvan läpilyönnin mahdollisuus kasvaa vyyhden ollessa ns. sekaisin käämitty, jolloin vyyhden ensimmäinen ja viimeinen kierros voivat olla hyvin lähellä toisiaan. [5.]

3.2 Määräykset ja standardit koskien jännitteen nousunopeutta

Taajuusmuuttajan moottorille syöttämälle jännitteelle ei ole annettu varsinaisia rajoituksia kansainvälisissä standardeissa koskien jännitteen nousunopeutta. Jännitteen nousunopeudelle ja huippujännitteille annetaan kuitenkin suosituksia muutamassa IEC-standardissa. IEC TS 60034-17 -standardin suositukset koskevat verkkosyöttöisiä, tietyille taajuuksille suunniteltuja moottoreita. Taajuusmuuttajakäyttöön suunniteltuja moottoreita käytettäessä tulisi soveltaa IEC TS 60034-25 -standardia.

Kansainvälisten standardien antamien suositusten lisäksi löytyy useita kansallisia sekä paikallisia järjestöjä, jotka antavat omia suosituksiaan tai rajoituksia jännitteen nousunopeudelle ja huippujännitteille. Yhdysvalloissa määräävä NEMA-järjestö (*National Electrical Manufacturers Association*) ja saksalainen NAMUR (*Normative Association for Measuring and Regulation Technology in the Chemical Industry*) antavat joitakin omia ohjearvoja koskien jännitteen nousunopeutta ja huippujännitettä.



Kuva 6. Standardien ja järjestöjen antamia rajoituksia koskien moottorilla havaittavia huippujännitteitä nousuajan suhteen [7]

Kuvassa 6 on esitetty eri järjestöjen ja standardien antamat rajoitukset jännitteen nousunopeuden suhteen. NEMA ja IEC käsittelevät taajuusmuuttajakäyttöön tarkoitettuja moottoreita niiden nimellisjännitteiden mukaisesti ja

normaaleja verkkosyöttöisiä moottoreita yhtenä ryhmänä. Esimerkiksi saksalainen NAMUR suosittelee moottorin mallista ja nimellisjännitteistä riippumatta suurimmaksi jännitteen nousunopeudeksi

$$500 \frac{V}{\mu s}$$

ja huippujännitteeksi 1 000 V. [6, s. 52 - 53.]

4 SIIRTOJOHTOTEORIA PWM-TAAJUUSMUUTTAJAKÄYTÖSSÄ

Siirtojohtoteoria on radio- ja tiedonsiirtotekniikassa kauan käytetty tarkastelumalli, jonka avulla pystytään käsittelemään monia sovelluksissa ilmeneviä ongelmia ja ratkaisemaan niitä. Siirtojohtoteorialla voidaan myös käsitellä taajuusmuuttajakäytöissä ilmeneviä ylijänniteongelmia. Tässä insinööriyössä esitellään siirtojohtoteoriaa soveltaen sitä taajuusmuuttajakäyttöön. Tarkoituksena on ymmärtää paremmin mahdolliseen moottorivaurioon johtavan ylijännitteen muodostuminen.

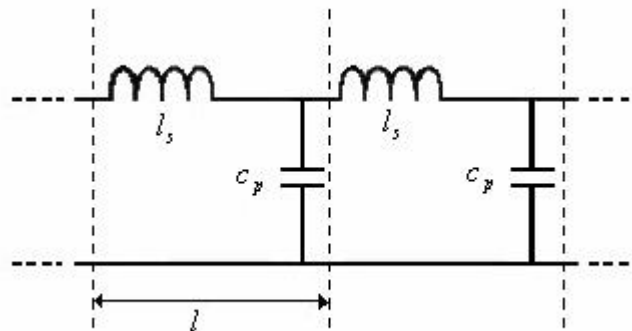
Perinteisissä piirianalyysimalleissa jännitteen ja sen muutosten oletetaan vaikuttavan kaikissa johtimen kohdissa samanaikaisesti, eikä johtimen fyysisistä pituuksia oteta huomioon. Signaalilla kuitenkin kestää jokin aika kulkea johtimen päästä päähän, useissa tapauksissa tätä ei tarvitse ottaa huomioon ja tilannetta voidaan tarkastella piirianalyysillä. On kuitenkin havaittu, ettei piirianalyysillä saada kuvattua kaikkia tilanteita tarpeeksi hyvin. Näissä tilanteissa jännite vaihtelee voimakkaasti samassa ajassa kuin signaalilla kestää kulkea johtimen toiseen päähän. Toisin sanoen, piirianalyysimalli ei päde signaalin sisältäessä taajuuskomponentteja, joiden aallonpituus on samaa kokoluokkaa kuin johtimen fyysinen pituus. Tämän takia korkeataajuisille signaaleille ja fyysisesti pitkille virtapiireille on kehitelty siirtojohtoteoria, jossa signaalin kulkuaika johtimessa otetaan huomioon.

Siirtojohtoteoriassa signaalilla on jokin kulkuaika, joten sille voidaan määrittää myös tarkka paikka siirtojohtolla ja kuvata signaalin voimakkuutta jokaisessa siirtojohton kohdassa. Taajuusmuuttajakäytössä moottorin kaapeli toimii siirtojohtona ja sitä pitkin kulkeva signaali on taajuusmuuttajan syöttämä jännite, joka koostuu erilevyisistä jyrkistä tasajännitepulsseista. Siirtojohtoteoriaa taajuusmuuttajakäytössä onkin helpointa käsitellä tarkastelemalla yhden jännitepulssin kulkua taajuusmuuttajalta kaapelia pitkin moottorille.

Tarkastelun helpottamiseksi taajuusmuuttajan ja moottorin välinen siirtojohto tai kaapeli oletetaan häviöttömäksi. Kaapelista tarkastellaan vain yhtä vaihejohtinta.

4.1 Moottorikaapeli häviöttömänä siirtojohtona

Siirtojohto voidaan jakaa äärettömän lyhyisiin osiin, jotka ovat toisiinsa nähden identtiset. Näin ollen koko siirtojohto koostuu vain näistä osista. Häviöttömän siirtojohtojon jokaisella osalla on toisiinsa nähden yhtä suuri sarjainduktanssi l_s ja hajakapasitanssi c_p mittayksikköä / kohti. Kuvassa 7 on nähtävissä kaksi siirtojohtojon identtistä osaa.



Kuva 7. Häviöttömän siirtojohtojon sijaiskytkentä

Johtimen ominaisista induktansseista ja kapasitansseista voidaan määrittää johtimen ominaisimpedanssi Z_0 , joka on johtimen pituudesta riippumaton. Siirtojohtoteoriassa ominaisimpedanssi kuvaa johtimessa samaan suuntaan kulkevan jännite- ja virta-aallon suhdetta toisiinsa. Johtimessa voi kulkea vastakkaisiin suuntiin eteneviä aaltoja, jotka summautuvat vain niiden ollessa samassa kohdassa johdinta. Ohitettuaan toisensa aallot jatkavat kulkua alkuperäisiin suuntiinsa muuttumattomina. Sekä jännite- että virta-aallot voidaan olettaa tässä tarkastelussa pulsseiksi. Johtimen ominaisimpedanssi määritetään siirtojohtojon ominaisten hajakapasitanssin c_p ja sarjainduktanssin l_s avulla:

$$Z_0 = \sqrt{\frac{l_s}{c_p}}. \quad (2)$$

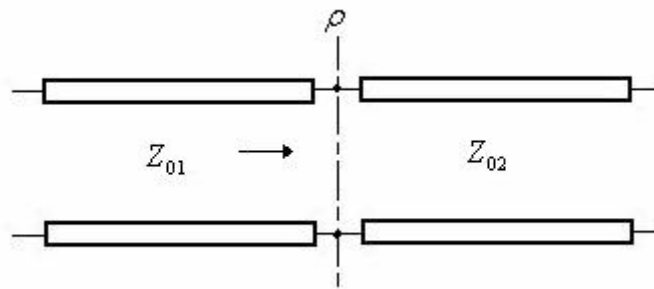
Siirtojohdolla jännite- ja virtapulsseilla on tietty nopeus, jolla ne kulkevat johdinta pitkin. Jännite- ja virtapulssien kulkunopeus v_p määritetään myös siirtojohdolle ominaisen hajakapasitanssin ja sarjainduktanssin avulla:

$$v_p = \frac{1}{\sqrt{C_p L_s}}. \quad (3)$$

Jännitepulssien kulkunopeus on sama kaikissa siirtojohtoon kohdissa ja näin ollen vakio kyseiselle siirtojohdolle. [8, s. 429 - 449.]

4.2 Epäjatkuvuuskohta siirtojohdolla

Kun kaksi ominaisimpedansseiltaan erilaista siirtojohtoa liitetään toisiinsa, syntyy niiden välille liitoskohta, jossa myös ominaisimpedanssi muuttuu. Ominaisimpedanssin muutos näkyy siirtojohtoa pitkin kulkeville jännite- ja virtapulssille epäjatkuvuuskohtana. Epäjatkuvuuskohdassa jännitepulssista osa kulkee läpi ja osa heijastuu takaisin, vaihtaen kulkusuuntaansa. Heijastuneesta osasta syntyy erillinen jännitepulssi, jonka leveys on sama kuin alkuperäisellä jännitepulssilla. Ominaisimpedanssin muutos tarkoittaa myös siirtojohtoa pitkin kulkevien jännite- ja virtapulssien kulkunopeuden muuttuvan epäjatkuvuuskohdassa.



Kuva 8. Kahden erilaisen siirtojohtoon välinen liitoskohta

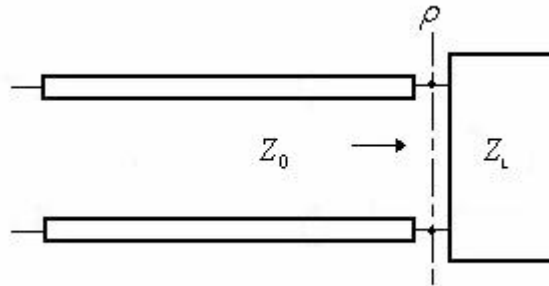
Kuvassa 8 on esitetty kahden erilaisen siirtojohtoon välinen liitoskohta, jossa ominaisimpedanssi vaihtuu. Epäjatkuvuuskohtaa voidaan kuvata heijastuskertoimella ρ , joka määrittää heijastuvan jännitepulssin suuruuden alkuperäisestä taajuusmuuttajan syöttämästä jännitepulssista. Heijastuskertoimen jännitepulssille määritetään siirtojohtojen ominaisimpedanssien avulla ja pulssin kulkusuunta tulee ottaa huomioon.

Jännitepulssin kulkiessa ensimmäisestä johtimesta (Z_{01}) toiseen johtimeen (Z_{02}), heijastuskertoimen on

$$\rho = \frac{Z_{02} - Z_{01}}{Z_{02} + Z_{01}}, \quad (4)$$

missä Z_{01} on ensimmäisen johtimen ominaisimpedanssi ja Z_{02} toisen johtimen ominaisimpedanssi. Heijastuskertoimet voivat saada arvon $-1 \dots 1$.

Kun siirtojohtoon liitetään jokin kuorma, kuten moottori, syntyy johtimen ja kuorman välille samanlainen liitoskohta kuin kahden siirtojohtimen liitoksessa (kuva 9). Heijastuskertoimen riippuu myös samalla tavalla ominaisimpedanssien erosta.



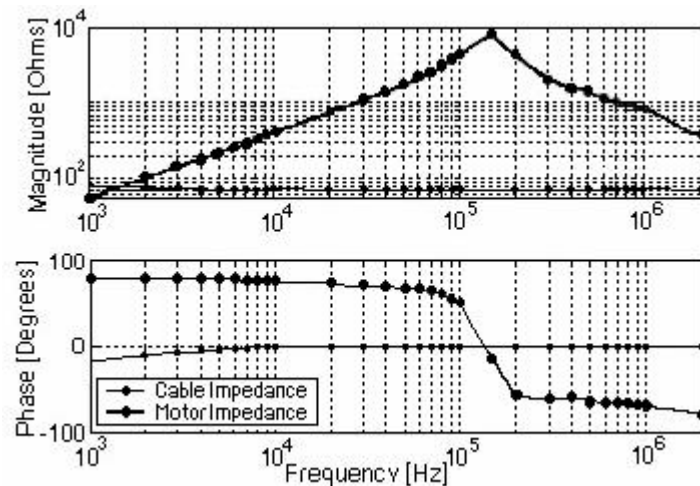
Kuva 9. Siirtojohtimen ja kuorman välinen liitoskohta

Johdon ominaisimpedanssin ja kuorman impedanssin Z_L ollessa erisuuret, epäjatkuvuuskohdan jännitepulssin heijastuskertoimen voidaan määrittää yhtälön (3) avulla. Negatiivinen heijastuskertoimen aiheuttaa heijastuvan jännitepulssin muuttumisen negatiiviseksi. [8, s. 460.]

4.3 Moottorin ja kaapelin korkeataajuusmallit

Taajuusmuuttajan syöttämät jännitepulssit ovat hyvin jyrkkiä ja niiden muutosnopeudet ovat suuria. Tämä tarkoittaa sitä, että jännitepulssit sisältävät paljon korkeataajuisia yliaaltoja. Moottoreille tehtyjen, kokeellisesti todistettujen korkeataajuusmallien mukaisesti moottoreiden impedanssi muuttuu voimakkaasti taajuuden suhteen. Tyypillisten moottorikaapeleiden impedanssin on todettu olevan lähes riippumattomia taajuudesta. Moottorin ja kaapelin välisen suuren impedanssieron takia taajuusmuuttajan syöttämien jännitepulssien korkeataajuiset komponentit heijastuvat siirtojohtoteorian mukaisesti moottorilla.

Kuvassa 10 on nähtävissä kolmen hevosvoiman moottorin ja AWG 6 (*American Wire Gauge 6*; yhdysvaltalainen johdinpinta-ala, $13,3 \text{ mm}^2$) kaapelin impedanssit taajuuden funktiona. Huomattavaa on, että moottorin impedanssi kasvaa hyvin voimakkaasti korkeilla taajuuksilla, aiheuttaen suuren impedanssieron moottorin ja sitä syöttävän kaapelin välille.



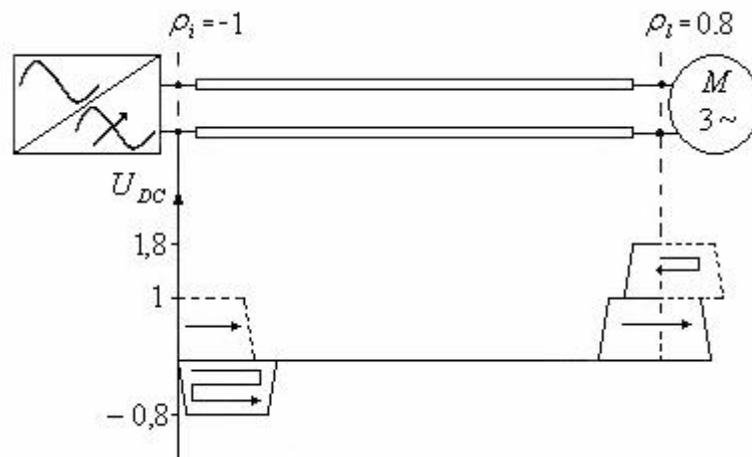
Kuva 10. Kolmen hevosvoiman moottorin ja suojaamattoman AWG 6 kaapelin impedanssi taajuuden funktiona. Lisäksi esitettyä vaihesiirtokulma [9]

Moottorin impedanssin muuttuessa voimakkaasti taajuuden kasvaessa, ei moottorille voida määrittää mitään yksiselitteistä heijastuskerrointa perinteisen siirtojohtoteorian mukaisesti. Tämä johtuu taajuusmuuttajan syöttämien jännitepulssien sisältämisestä useista eri taajuuskomponenteista. Haluttaessa tarkkoja tuloksia mallinnuksella, pitää taajuuden vaikutus ottaa huomioon. [9.]

4.4 Yksinkertainen käsittelymalli

Vaikka taajuus vaikuttaa moottorin impedanssiin voimakkaasti, voidaan perinteisellä ja yksinkertaisella siirtojohtoteorian käsittelymallilla havainnollistaa jännitepulssien värähtelyä taajuusmuuttajan ja moottorin välillä. Mallissa ei oteta huomioon taajuuden vaikutusta moottorin impedanssiin, vaan moottorin impedanssin oletetaan olevan vakio ja erittäin suuri moottorikaapelin impedanssiin verrattuna. Tämä oletus johtaa moottorilla jännitteen heijastuskertoimeksi yleensä jonkin arvon $0,8 - 1$. Taajuusmuuttajan heijastuskertoimeksi valitaan aina -1 , näin ollen kaikki taajuusmuuttajalle tulevat jännitepulssit heijastuvat takaisin moottorille ja vaihtavat etumerkkiä.

Kuvassa 11 on esitetty yhden jännitepulssin heijastuminen taajuusmuuttajan ja moottorin välillä. Taajuusmuuttaja syöttää välipiiristään yksittäisen jännitepulssin jonka korkeus on U_{DC} . Jännitepulssista osa heijastuu moottorilla. Heijastuneesta jännitepulssin osasta muodostuu oma pulssi, joka saa arvokseen $0,8 U_{DC}$. Heijastunut jännitepulssi ja moottorille menevä jännitepulssi ovat hetkellisesti samassa paikassa virtapiiriä, joten ne summautuvat. Summautunut jännite kasvaa hetkellisesti moottorilla, saaden arvoksi $1,8 U_{DC}$. Heijastunut jännitepulssi heijastuu uudestaan taajuusmuuttajalla, jossa se muuttuu negatiiviseksi. Negatiivinen jännitepulssi kulkee moottorille ja ilmenee moottorilla myös negatiivisena jännitteenä. Heijastunut jännitepulssi värähtelee moottorin ja taajuusmuuttajan välillä kunnes se on vaimentunut.



Kuva 11. Jännitepulssin värähtelyä kuvaava yksinkertainen käsittelymalli, jossa on häviötön siirtojohto

Kun kaapeli on niin pitkä, että jännitepulssin kulku-aika johtimen päästä päähän on suurempi kuin sen nousuaika, tapahtuu jännitteen heijastuminen edellä mainitulla tavalla heijastuskertoimien mukaisesti. Tästä aiheutuu voimakas värähtely moottorin jännitteessä, koska positiiviset ja negatiiviset jännitepulssit kulkeutuvat vuorotellen moottorille.

Kun käytetään hyvin lyhyitä moottorikaapeleita, moottorilla ei muodostu niin suurta ylijännitettä kuin pitkiä kaapeleita käytettäessä. Tässä tilanteessa taajuusmuuttajalta heijastuva negatiivinen jännitepulssi kerkeää kulkemaan takaisin moottorille ennen kuin jännite moottorin navoissa ennättää nousta liian korkeaksi. Näin ollen negatiivinen jännitepulssi summautuu moottorilla olevaan positiiviseen jännitepulssiin, pienentäen mahdollista ylijännitettä. Kaapelin ominaisuudet vaikuttavat suoraan jännitepulssin kulku-aikaan ja

taajuusmuuttajan IGBT-transistorin toimintanopeus jännitepulssin nousuajaksi, joten sopivia kaapeleiden mittoja on vaikea määrittää. Käytännössä nykyaikaisilla taajuusmuuttajilla ja kaapeleiden ominaisuuksilla nämä kaapelien pituudet vaihtelevat kymmenestä metrillä useisiin kymmeniin metreihin.

Perinteisen siirtojohtoteorian mukaisesti suurin mahdollinen jännite moottorilla impedanssieron ollessa lähes ääretön on $2 U_{DC}$. Jännitteen kasvaminen korkeammaksi on kuitenkin mahdollista, jos taajuusmuuttaja ehtii syöttämään uuden jännitepulssin ennen kuin edellinen jännitepulssi on kerinnyt vaimentumaan täysin. Tällöin heijastunut ja uusi jännitepulssi summautuvat hetkellisesti moottorilla. [10; 11.]

5 YLIJÄNNITESUOJAUS PWM-TAAJUUSMUUTTAJAKÄYTÖSSÄ

Ylijännitteiltä suojautumiseen taajuusmuuttajakäytöissä on kehitetty erilaisia ratkaisuja, joiden kustannukset ja käyttötavat aiheuttavat rajoituksia käyttöihin. Ylijännitteiltä voidaan suojautua pitämällä moottorikaapelit mahdollisimman lyhyinä ja sijoittamalla taajuusmuuttaja moottorin lähelle. Tämä on harvoin mahdollista nosturikäytöissä, joten nostureissa käytetään lähes poikkeuksetta taajuusmuuttajakäyttöön suunniteltuja moottoreita. Tarpeen vaatiessa voidaan käyttää myös ylijännitesuojaukseen erillisiä suodattimia moottorin ja taajuusmuuttajan välissä.

Moottorin ylijännitesuojaukseen taajuusmuuttajakäytössä käytetään usein erilaisia suodattimia, joiden toiminta perustuu alipäästösuodatukseen. Alipäästösuodatuksessa signaalista suodatetaan korkeataajuiset komponentit ja päästetään läpi vain haluttua taajuutta matalammat komponentit mahdollisimman muuttumattomina. Alipäästösuotimen kulmataajuudella määritetään se taajuus, jota korkeammat taajuuskomponentit suodatetaan pois signaalista.

5.1 Taajuusmuuttajakäyttöön suunnitellut moottorit

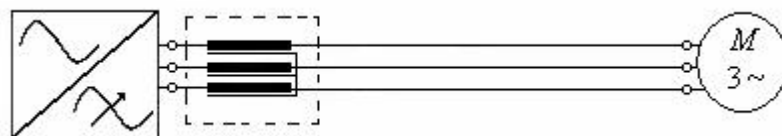
Eräs helppo tapa lähestyä ongelmaa on harkita taajuusmuuttajakäyttöön tarkoitettujen moottorin käyttöä. Kyseiset moottorit ovat suunniteltu suurempia jänniterasituksia varten ja soveltuvat myös yhtä hyvin normaaleihin verkosyöttöisiin käyttöihin. Moottorin käämeissä käytetyt johtimet on suojattu paremmalla eristeellä, jolloin läpilyöntikestävyys ja eristeen ikä kasvavat.

Taajuusmuuttajakäyttöön tarkoitettu moottori ei nosta kokonaiskustannuksia merkittävästi verrattuna perinteiseen verkkosyöttöiseen moottoriin. Joissakin tapauksissa vastaan tulee kuitenkin tilanteita, jolloin halutaan käyttää vanhaa moottoria. Vanhoja moottoreita voidaan käämiä uudestaan paremmalla eristeellä, mutta käytäntö rajoittaa toteutusta. Yleensä parempi eristemateriaali on myös paksumpaa, ja käämi tarvitsee tällöin enemmän tilaa, joten uudelleenkäämitys ei ole aina mahdollista. Lisäksi uudelleenkäämitys luo lisäkustannuksia. Tällöin uuden moottorin hankinta saattaa olla kannattavinta.

Vaikka moottori olisikin suunniteltu taajuusmuuttajakäyttöä varten, ei se kuitenkaan takaa ongelman kadonnan. Lisäeristys vaatisi pahimmissa tapauksissa eristyksen jännitelujuuden moninkertaistamista. Parempaa käämitystä voidaankin pitää ennaltaehkäisevänä keinona ja varotoimenpiteenä, joka myös riittää suureen osaan käytöistä.

5.2 Kuristin

Yleisin ns. suodatinratkaisu on lisätä sarjaan taajuusmuuttajan ja moottorin välille kolmivaiheinen kuristin. Kuristimella tarkoitetaan taajuusmuuttajan ulostulopuolelle suunniteltua käämiä (kuva 12). Kuristimia käytetään usein myös verkon puolella yliaaltojen suodattamiseen. Kolmivaiheinen kuristin on yleensä kolmepylväinen, jonka sydänmateriaalina on rauta. Samanlaisia kuristimia käytetään myös erilaisten suodattimien pohjaratkaisuna, jolloin kuristimeen lisätään ylimääräisiä vastuksia ja kondensaattoreita.



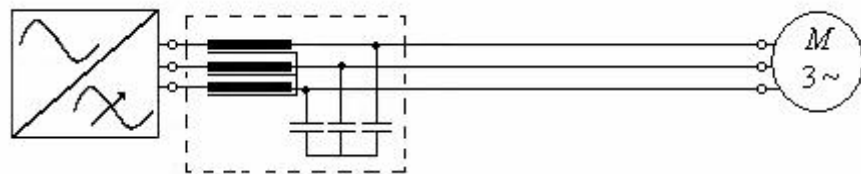
Kuva 12. Kuristin

Kuristin pyrkii rajoittamaan virran muutosnopeutta, jonka kautta myös jännitteen nousunopeutta. Kuristimien on myös havaittu rajoittavan kaapelikapasitanssien aiheuttamia kaapelin latausvirtoja ja moottorin laakerivirtoja. Joissakin tapauksissa kuristimien on havaittu pahentavan jänniterasitusilmiötä, pitkittäen jännitteen voimakasta värähtelyä. Tämä johtuu pääosin vääräntyyppisen kuristimen käytöstä ja sen virheellisestä valinnasta. [6, s. 96 - 98.]

5.3 Du/dt-suodatin

Moottoreiden käämien ylijänniterasituksia ja jännitteen nousunopeutta voidaan rajoittaa tehokkaasti du/dt-suodattimella. Du/dt-suodatin on alipäästösuodatin, joka suodattaa PWM-jännitteestä korkeataajuisia komponentteja näin loiventaen jännitepulssien jyrkkyyttä. Jännitepulssien ollessa loivempia moottorilla heijastuvien korkeataajuisien komponenttien määrä on laskenut merkittävästi, eivätkä moottorin kokemat jänniterasitukset ole suuria.

Suodatin koostuu yleensä kolmivaiheisesta kuristimesta, kondensaattoreista sekä mahdollisesti vastuksista. Du/dt-suodattimien rakenteet voivat vaihdella ja niistä onkin olemassa erilaisia ratkaisuja. Kuvan 13 osoittama rakenne on yleisin du/dt-suodatinmalli.



Kuva 13. Yleinen du/dt-suodatinmalli

Du/dt-suodattimet mitoitetaan käyttöjen mukaan niiden resonanssitaajuuden avulla, joissa resonanssitaajuus on aina mitoitettu suuremmaksi kuin taajuusmuuttajan kytkentätaajuus. [6, s. 99 - 101.]

5.4 Sinisuodatin

Sinisuodattimia käytetään taajuusmuuttajan syöttämän PWM-jännitteen tehokkaaseen suodattamiseen, tuloksena lähes puhdas sinimuotoinen jännite. Sinisuodattimet ovatkin tehokkaimpia käytettyjä suodatintyyppejä moottorin ylijännitesuojauksessa. Taajuusmuuttajan ulostulojännitteestä saadaan sinimäistä päästämällä vain jännitteen perustaajuus läpi ja suodattamalla muut taajuuskomponentit. Moottorille syötetty jännite ei näin ollen sisällä korkeataajuisia komponentteja, eikä moottorille pääse kohdistumaan ylijänniterasituksia. Sinisuodattimilla pyritään lisäksi poistamaan moottorista tulevia korkeataajuisia meluhaittoja tilanteissa, joissa moottori sijaitsee lähellä ihmisiä ja aiheuttaa selviä haittoja. Esimerkkejä tällaisista tapauksista ovat tuuletus- ja rullaporraskäytöt.

Sinisuodattimet ovat tehokkaita alipäästösuodattimia, joiden resonanssitaajuus mitoitetaan moottorille syötettävän jännitteen perustaajuuden ja taajuusmuuttajan kytkentätaajuuden välille:

$$f_{out} < f_0 < f_{sw}, \quad (5)$$

missä f_{out} on vaihtojännitteen perusaallon taajuus, f_0 suodattimen resonanssitaajuus ja f_{sw} taajuusmuuttajan kytkentätaajuus.

Vaimentaakseen tehokkaasti suurtaajuuskomponentteja suodattimen resonanssitaajuuden pitää olla huomattavasti pienempi kuin taajuusmuuttajan kytkentätaajuuden. Kuitenkaan suodatin ei saa olla resonanssissa perustaajuuden ympäristössä, joten resonanssitaajuuden tulee olla merkittävästi suurempi kuin perustaajuuden. Näistä mitoitusteknisistä seikoista johtuen sinisuodattimien käyttö rajoittuu useissa tilanteissa normaalia korkeammille kytkentätaajuuksille. [6, s. 101 - 103.]

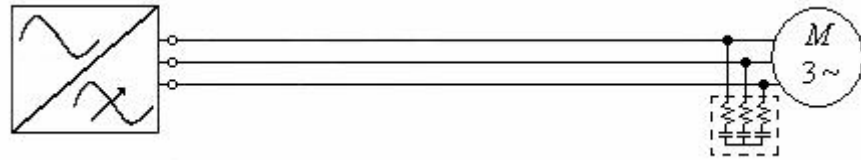
Sinisuodattimien hankintakustannukset ovat korkeat, minkä lisäksi niiden häviötehot voivat olla merkittävät. Sinisuodattimet pienentävät huomattavasti moottorin rautahäviöitä taajuusmuuttajakäytössä, joten niiden lisäämä häviöteho koko käytön kannalta ei kasva paljoa. Käyttötarkoitus ja suodattimien käyttöön kohdistuvat rajoitukset ovat kuitenkin muuttumassa. Edistäviä tekijöitä ovat sinisuodattimien voimakas kehitys, ja toisaalta myös häviötehoja on saatu laskettua merkittävästi erilaisilla rakenteellisilla ratkaisuilla. Yksinkertaisimmillaan sinisuodatin on samanlainen kuin du/dt-suodatin (kuva 13), mutta sen resonanssitaajuus on mitoitettu huomattavasti pienemmälle taajuudelle. Lisäksi sen suodatuskyky on parempi kuin du/dt-suodattimilla.

5.5 Päätevastus

Moottorin impedanssi voidaan sovittaa samanlaiseksi tai lähes samanlaiseksi kuin sitä syöttävän kaapelin impedanssi sopivalla päätevastuksella. Päätevastuksia kutsutaan useilla eri nimityksillä, joista yleisin sovitusvastus. Impedanssieron ollessa pieni, moottorilla muodostuva ylijännite pienenee.

Päätevastuksia käytetään hyvin monissa muissakin sovelluksissa kuorman sovittamiseen. Radiotekniikassa antennit mitoitetaan ja sovitetaan radiolle, koska ilman antennin sovittamista suurin osa vastaanotetusta ja lähetetystä tehosta ei välity radiolle tai antennille suuren impedanssieron takia.

Pääsääntöisesti pääte- ja sovitusvastukset suunnitellaan vain tiettyjä laitteita ja käyttäjiä varten. Moottorin impedanssia pystytään muuttamaan lisäämällä sen liittimiin tai mahdollisimman lähelle liitintä päätevastus, joka yleensä on jonkinlainen RC- tai RLC-piiri (kuva 14).



Kuva 14. Päätevastus

Yleensä samaa moottorin päätevastusta voidaan käyttää usealla erikokoisella moottorilla, koska niillä ei pyritä sovittamaan moottoria täysin samanlaiseksi kuin moottorikaapeli. Tällöin niitä voidaan käyttää hyvin useissa erilaisissa tilanteissa, eivätkä ne aseta suuria rajoituksia käytön kannalta. Päätevastukset tarvitset tilaa ja niiden sijoittaminen moottorin liittimille on tiettyissä tapauksissa lähes mahdotonta, joten niitä ei voida käyttää useissa nosturikäytöissä.

6 SUODATTIMEN VALINTA KÄYTTÖÄ VARTEN

Moottoreiden ylijännitesuojaukseen on kehitetty erilaisia suodatinratkaisuja. Suodattimilla on moottorin ylijännitesuojauksen lisäksi myös muitakin käyttötarkoituksia ja hyötyjä. Erilaisilla suodattimilla ja suodatinrakenteilla onkin erilaisia hyötyjä PWM-taajuusmuuttajan käytöstä aiheutuviin haittoihin. Näistä esimerkkeinä moottoreiden laakerivirrat, EMI-suojaus (*Electromagnetic Interference*; sähkömagneettinen häiriö) ja moottorikaapeleiden latausvirrat.

Moottorikaapeli toimii korkeataajuisien komponenttien takia ympäristöön elektromagneettista säteilyä aiheuttavana antennina. Kaapelista tuleva säteily voi aiheuttaa ympäristössä oleville sähkölaitteille toimintahäiriöitä ja haitata radiotaajuuksilla toimivia viestintälaitteita. Erilaisia suodattimia voidaankin käyttää taajuusmuuttajan ulostuloliittimillä haluttaessa parempaa EMI-suojausta ja EMC-tasoa (*Electromagnetic Compatibility*; elektromagneettinen yhteensopivuus).

Taajuusmuuttajakäytöissä moottorin laakereiden läpi kulkevat maavuotovirrat voivat aiheuttaa laakerivaurioita ja niiden ennenaikaisia kulumisia. Erilaisen suodattimien onkin havaittu pienentävän laakerivirtoja sekä pitkien moottorikaapeleiden yhteydessä ilmeneviä ns. kaapeleiden latausvirtoja. Kaapelin latausvirta johtuu kaapelin sisältämän kapasitanssin hetkittäisestä latautumisesta, joka voi aiheuttaa taajuusmuuttajan ylivirtasuojauksen laukeamisen hetkellisen ylivirran takia. [7.]

6.1 Nosturikäytön tuomat vaatimukset suodattimelle

Nosturikäytöt luovat omat vaatimuksensa käytettäville suodattimille. Suodattimien ominaisuudet ja nosturikäytön vaatimukset eroavat toisistaan hyvinkin paljon. Nosturikäytöille on ominaista hyvin laajat käyttöalueet ja vain pieniä muutoksia käytöissä sallitaan. Lisäksi nostureissa oikosulkumoottorit toimivat jarrutustilanteissa ja kuormaa laskettaessa generaattoreina, joka luo normaaleihin taajuusmuuttajakäyttöihin verrattuina suuremmat vaatimukset.

Nostureissa moottorin ja taajuusmuuttajan välillä olevat kaapelit voivat vaihdella muutamista kymmenistä metreistä aina jopa useisiin satoihin metreihin. Kaapeleiden pituuksiin ei voida vaikuttaa, kun kyseessä on jokin tietynlainen nosturityyppi ja tilankäytön ollessa hyvin rajallista. Lisäksi yhdellä taajuusmuuttajalla ohjataan yleensä yhtä aikaa useita samanlaisia moottoreita, jolloin siirtojohtoteorian kannalta syntyy vaativa ja monimutkainen virtapiiri.

6.1.1 Nostokoneiston kuormanlaskutilanne

Nostureiden nostokoneistoilla käsitellään hyvin suuria kuormia ja kuormien nostokorkeudet voivat olla useita kymmeniä metrejä, joten nostettuihin kuormiin sitoutuu suuria määriä potentiaalienergiaa. Tämä potentiaalienergia vapautuu kuormaa laskettaessa. Moottoreissa olevat mekaaniset jarrut on tarkoitettu vain moottorin ja kuorman paikalla pitämiseen sekä turvallisuuden ylläpitämiseen. Kuormaa laskettaessa sen laskunopeutta säädellään jarruttamalla käyttöä moottorilla. Moottori muuttaa täten kuorman sitoutunutta potentiaalienergiaa sähköiseksi energiaksi, syöttäen energian takaisin taajuusmuuttajalle toimien generaattorina.

Kun kuormaa aletaan laskea, annetaan taajuusmuuttajalle suuntakomento, jolloin se vapauttaa moottorin mekaanisen jarrun ja alkaa syöttää moottorille asetteluarvojen mukaista jännitettä. Moottorin akseli pyrkii pyörimään

staattorikäämyksessä pyörivän magneettikentän takia. Kun mekaaninen jarru avataan, ylös nostettuun kuormaan vaikuttava maanvetovoima aiheuttaa moottorille kiihdyttävän momentin. Moottorin akselille vaikuttava kiihdyttävä momentti taas aiheuttaa roottorin pyörimisen suuremmalla nopeudella kuin staattorin pyörivä magneettikenttä. Kun roottori pyörii nopeammin kuin staattorissa pyörivä magneettikenttä, oikosulkumoottori toimii generaattorina ja tuottaa sähkötehoa.

Kun oikosulkumoottori toimii generaattorina, ottaa se syöttävästä verkosta vielä magnetointivirtaa samanaikaisesti syöttäen sähkötehoa taajuusmuuttajalle. Jos taajuusmuuttajan tasasuuntausyksikkö on toteutettu diodisillalla, ylimääräinen energia varastoituu välipiiriin. Välipiiriin syötetty ylimääräinen energia aiheuttaa välipiirin jännitetason kasvamisen kunnes välipiirissä oleva jarrukatkoja alkaa toimia. Kun jarrukatkoja alkaa toimia, jarruvastuksien läpi kulkee virta ja jarrukatkoja muuttaa välipiirissä olevaa energiaa lämmöksi. Jarrukatkoja toimii suoraan välipiirin jännitetason mukaan ja se lakkaa toimimasta välipiirin jännitteen laskettua alle sen toimintapisteen.

Kun oikosulkumoottori toimii nosturikäytössä generaattorina, muodostetaan moottorille syötetty magnetointivirta ja vaihtojännite välipiiristä syötettävillä tasajännitepulsseilla. Välipiirin jännitetaso on korkealla kun kuormaa laskeetaan, joten moottorille aiheutuvat jänniterasitukset ovat korkeammat. Suurissa nostureissa kuorman laskeminen lattiatasolle saattaa kestää useita minuutteja, joten normaaliin tilanteeseen verrattuna kasvaneet jänniterasitukset voivat olla myös hyvin pitkäaikaisia.

6.1.2 Moottoreiden laajat käyttöalueet

Konecranes on kansainvälinen nosturivalmistaja ja se toimittaa nostureita ympäri maailmaa, joten myös kansalliset käyttöolosuhteet tulee ottaa huomioon. Esimerkiksi Pohjois-Amerikassa käytetään hyvin yleisesti 690 V:n pääjännitteelle suunniteltuja moottoreita, joka tulee ottaa huomioon suodattimien käytössä.

Joissakin tapauksissa nosturin siirtoliikkeitä ja nosturin toimintaa halutaan nopeuttaa ajamalla moottoria normaalia suuremmilla pyörimisnopeuksilla. Moottoreille syötettävän vaihtojännitteen taajuus voi nosturikäytössä olla jopa 120 Hz, joten kaikkien nostureissa käytettävien suodattimien tulisia sallia 120 Hz:n taajuuden käyttäminen.

6.2 Suodattimien valinta tiettyyn käyttöön

Suodatinvalmistajat rajaavat hyvin tarkasti suodattimien käyttöolosuhteet johtuen suodattimien mitoittamisesta ja toimintatavasta. Ylijännitesuojaukseen käytetyt suodattimet ovat alipäästösuodattimia, joten ne mitoitetaan jollekin tietylle taajuusalueelle. Ilmoitettuja taajuusalueita ei saa alittaa tai ylittää ilman valmistajan ohjeistusta. Suodattimen käyttötarkoituksen mukaisesti sen tulee täyttää siltä vaadittavat kriteerit ja sen pitää olla kyseiseen käyttöön sopiva.

Yleisesti suodattimille ilmoitetaan

- pääjännitteen nimellisarvo U_N
- sallittu vaihtojännitteen taajuus f
- nimellisvirta I_N
- suurin ja pienin sallittu kytkentätaajuus f_{SW}
- ympäristön lämpötila T_{AMB} .

Lisäksi suodattimille voidaan ilmoittaa joitakin tiettyjä käyttöön liittyviä rajoituksia ja suorituskäyttöön viittaavaa tietoa:

- suurin sallittu kaapelimita taajuusmuuttajan ja moottorin välillä
- ylikuormitettavuus
- suodatuskykyyn liittyvä suurin suodattimen läpi päästämä du/dt -arvo
- suodatuskykyyn liittyvä suurin suodattimen läpi päästämä jännitteen huippuarvo.

7 SUODATTIMIEN TESTAAMINEN

Tarkempaa tarkastelua varten hankittiin kaksi du/dt -suodatinta sekä yksi moottorin ylijännitesuojaukseen suunniteltu kuristin. Suodattimet ja kuristin valittiin virta- ja jännitearvoiltaan toisiaan vastaaviksi (500 V, 15 A). Kaikki mittaukset suoritettiin samalla tavalla sekä suodattimien kanssa, että ilman suodattimia. Suodattimien ja kuristimen toimintaa tutkittiin mittaamalla oskilloskoopilla huippujännitteitä moottorin liittimiltä tilanteissa, joilla pyrittiin simuloimaan tyyppillistä nosturikäyttöä. Lisäksi suodattimien lämpötiloja tarkkailtiin mittausten ajan ja lopuksi suoritettiin erilliset mittaukset lämpenemästä ja ylikuormitettavuudesta.

7.1 Mittausjärjestelyt

Suodattimet ja kuristin sijoitettiin kahden metrin päähän taajuusmuuttajasta metalliseen koteloon, jonka ilmankiertoa rajoitettiin pitämällä sen kansi suljettuna tai raollaan. Suodattimet ja kuristin tulisi sijoittaa mahdollisimman lähelle taajuusmuuttajaa, joten ne kytkettiin samanlaisella kahden metrin pituisella kaapelilla taajuusmuuttajaan. Moottorin ja tutkittavan laitteen välisen kaapelin pituutta muutettiin kytkemällä samanlaisia 50 metriä pitkiä kaapeleita sarjaan. Kaapeleiden liittäminen toisiinsa toteutettiin riviliittimillä. Käytetty kaapeli oli normaalia pyöreätä suojaamatonta 2,5 mm² HNV-07 kumikaapeleita, jonka johtimet ovat kuparia.

Mittaukset suoritettiin kolmella eri kaapelin pituudella: 50 m, 100 m ja 200 m. Jokaisella kaapelin pituudella suoritettiin mittaukset kolmella eri vaihtojännitteen taajuudella ja niitä vastaavilla jännitteen tehollisarvoilla: 20 Hz 55 V, 50 Hz 131 V ja 120 Hz 310 V. Nostureissa taajuusmuuttajan kytkentätaajuus pidetään vakiona, joten myös mittauksissa käytettiin nostureiden tapaan kytkentätaajuutena kaikkien mittauksien ajan 3,6 kHz.

7.1.1 Mittauksiin käytetyt mittalaitteet

Tutkittaessa moottorin liittimillä tapahtuvia ylijänniteilmiöitä tulee ottaa tiettyjä asioita huomioon niin turvallisuuden kuin laitevahinkojen varalta. Mitattavat huippujännitteet voivat olla hyvin suuria. Erityisesti tämä pitää huomioida mittalaitteiden jännitekestoisuuksia tarkasteltaessa. Taajuusmuuttajakäytöissä moottorin liittimiltä mitatut huippujännitteet voivat olla yli kaksinkertaisia välipiirinjännitteeseen verrattuna, joten mitattavat jännitteet voivat ylittää 2 kV:n tason. Näin suuret jännitteet pakottavatkin lähes kaikissa tilanteissa käyttämään oskilloskoopin ja mittauspisteiden välissä sopivia galvaanisesti erotettuja vaimentavia mittapäitä.

Hyvin jyrkkiä ja nopeasti muuttuvia jännitepulsseja mitattaessa tulee oskilloskoopin ja vaimentavien mittapäiden kyetä tarpeeksi suuriin näytteenottotaajuuksiin. Jos mittalaitteiden näytteenottotaajuudet ja kaistanleveydet ovat liian pieniä, leikkaantuu mitattavasta signaalista osa pois mittalaitteissa ja saatu mittaustulos on virheellinen.

Mittauksissa käytettiin digitaalista oskilloskooppia, jonka näytteenottotaajuus oli 200 MHz sekä vaimentavia mittapäitä, joiden näytteenottotaajuus oli 25 MHz. Mittauslaitteista korkeataajuusilmiöitä tarkasteltaessa rajoittavin tekijä

oli mittapäiden näytteenottotaajuus. Mittauksissa käytetystä oskilloskoopista pystytään rajoittamaan näytteenottotaajuutta, joten laskemalla oskilloskoopin näytteenottotaajuus alle mittapäiden näytteenottotaajuuden todettiin 25 MHz:n riittävän hyvin mittauksiin.

Mittauksissa käytetyt mittalaitteet ovat

- oskilloskooppi: Fluke Scopemeter 199C Color 200 MHz 2,5 GS/s
- vaimentavat mittapäät: Testec TT-SI 9005 25 MHz 1:50 / 1:500 3,5 kV
- lämpötilamittari: Fluke 54 II Thermometer.

Lisäksi mittauksissa käytettiin NCDrive taajuusmuuttajan ohjelmaa, jolla voidaan hallinnoida ja tarkkailla taajuusmuuttajan toimintaa.

7.1.2 Mittauksiin käytetty testilaitteisto

Suodattimien toimintaa ja ylijänniteilmiötä tutkittiin siihen soveltuvassa mittaustilassa kuormapenkillä, jossa moottoria ja suodatinta voidaan kuormittaa. Mittauksia varten ei kuitenkaan saatu hankittua kilpiarvoiltaan sopivaa oikosulkumoottoria, joten mittaukset suoritettiin suuremmalla moottorilla kuormapenkissä. Kuormapenkissä käytettiin kahta lähes samanlaista oikosulkumoottoria, joiden akselit olivat kytketty yhteen. Kummallakin moottorilla oli oma taajuusmuuttaja. Molempien moottoreiden akseleille kytkettiin pulssianturit moottoreiden akselien pyörimisnopeuden mittausta varten.

Moottori, jolla ylijänniteilmiötä ja suodattimien toimintaa tutkittiin, oli nosturikäyttöön suunniteltu Konecranes MF13X-200N -oikosulkumoottori. Moottorin kilpiarvot on nähtävissä oheisessa taulukossa 1.

Taulukko 1. Konecranes MF13X-200N -oikosulkumoottorin kilpiarvot

P / kW	I_n / A	U_n / V	f_n / Hz	n_n / rpm	cos φ	S3-60
35	64	(Y) 400	100	2880	0,85	T_{amb} +40°C
42	65	(Y) 460	120	3470	0,87	Ins.Cl. F

Tutkittavien suodattimien ja kuristimen nimellisvirrat olivat liian pieniä kyseiselle moottorille, joten moottorin virtaa rajoitettiin alimagnetoinnilla. Moottorin parametrit asetettiin taajuusmuuttajaan ja moottorin nimellijännitettä laskemalla haettiin se jännitteen arvo, jolla moottorin virta saatiin laskettua 15 ampeeriin. Nimellijännitettä laskemalla loivennettiin samalla moottorille syötettävän jännitteen ja taajuuden suhdetta (U/f). Virta saatiin rajoitettua laskemalla moottorin nimellijännitteeksi 310 V.

Mittauksissa käytettiin nosturikäyttöön räätälöityä Konecranes D2HF018-taajuusmuuttajaa, jossa tasasuuntaus toteutetaan diodisillalla. Taajuusmuuttajan syöttöjännite oli mittausten aikana 400 V ja välipiirin jännite kuormittamattomana n. 550 V_{DC}.

7.2 Tehdyt mittaukset

Mittaukset suoritettiin oskilloskoopilla mittaamalla ja tallentamalla oskilloskoopin esittämä kuva aina tutkittavasta tilanteesta. Oskilloskoopin liipaisu aseteltiin jokaisessa tilanteessa korkealle ja tasaisesti laskemalla liipaisun ajankohtaa etsittiin tilanteessa suurimmat ilmenevät huippujännitteet. Kaikki mittaukset suoritettiin moottorin ja taajuusmuuttajan liittimistä V - W vaiheiden väliltä. Vaiheväli V - W valittiin, koska alkumittauksissa kyseisestä vaihevälistä mitattiin suurimmat huippujännitteet. Eri vaihevälien erot olivat kuitenkin mittausten aikana olemattomia.

7.2.1 Kuormanlaskutilanne

Toista kuormapenkissä ollutta oikosulkumoottoria käytettiin nostokoneiston kuormanlaskutilanteen simulointiin, jossa moottorille kohdistuu normaalia ajotilannetta suuremmat jänniterasitukset. Voimakoneena toimivan moottorin ohjaustavaksi valittiin suljetun silmukan momenttisäätö. Tutkittavan moottorin ohjaustapana käytettiin nopeusohjausta. Momenttisäädössä taajuusmuuttajalle annetaan momenttiohje, jonka taajuusmuuttaja pyrkii tuottamaan.

Molemmat moottorit kiihdytettiin 50 Hz:n taajuudelle ja momenttiohjatun koneen momenttiohjetta kasvatettiin. Momenttiohjetta kasvatettiin, kunnes tutkittavaa moottoria syöttävän taajuusmuuttajan välipiirin jännite kasvoi jarrukatkojan toimintapisteeseen asti. Tutkittava moottori toimi generaattorina ja syötti tehoa taajuusmuuttajansa välipiiriin.

7.2.2 Jarrutustilanne huimamassalla

Ylijänniteilmiötä tutkittiin myös kiihdyttämällä kuormapenkissä mekaanisesti yhdessä olleiden moottoreiden pyörivistä massoista koostuva huimamassa 120 Hz:n ajotaajuudelle ja jarruttamalla käyttö 2,5 sekunnin hidastusrampilla, käyttäen pelkästään tutkittavaa nopeusohjattua moottoria. Moottoreiden pyöriin massoihin sitoutunut liike-energia vapautuu tällöin taajuusmuuttajan välipiiriin samalla tavalla kuin kuormaa laskettaessa, eli moottori toimiikin jarrutuksen ajan generaattorina.

Hidastusrampin kestolla määritetään aika, jolla moottori pysäytetään. Hidastusrampin kestoa laskemalla taajuusmuuttajan välipiiriin varastoituva energia syötetään hetkellisesti suurella teholla, joten välipiirin jännitteen taso kasvaa hetkellisesti korkealle aiheuttaen moottorille suuremmat jänniterasitukset.

7.2.3 Suodattimien lämpötilakoe

Nostureiden sähkökäytöt ovat harvoin jatkuvia, joten ne yleensä suunnitellaan IEC 34-1 -standardin mukaiselle jaksolliselle S3-60-käytölle. Luonnollisesti nostureiden käyttöasteet otetaan huomioon nosturin suunnittelussa ja käyttöasteet voivat olla myös korkeampia. S3 tarkoittaa samanpituisista jaksoista muodostuvaa käyttöä, jossa moottoria käytetään nimellisarvojensa mukaisesti tietty aika yhden jakson aikana. IEC suosittelee yhdeksi jaksoksi 10 minuuttia, joten S3-60-käytössä moottoria kuormitetaan nimellisarvoilla kuusi minuuttia ja sen jälkeen annetaan jäähtyä neljä minuuttia. Moottorin jäähtyttyä neljä minuuttia, sitä voidaan taas kuormittaa kuusi minuuttia. [12, s.518 - 524.]

Tutkittaville kohteille suoritettiin S3-60-käytön mukainen koe laitteiden kilpiarvoilla. Normaalien ajotilanteiden aikana suodattimista ja kuristimesta etsittiin kuumimmat kohdat, jotka myös valittiin mittauspisteiksi.

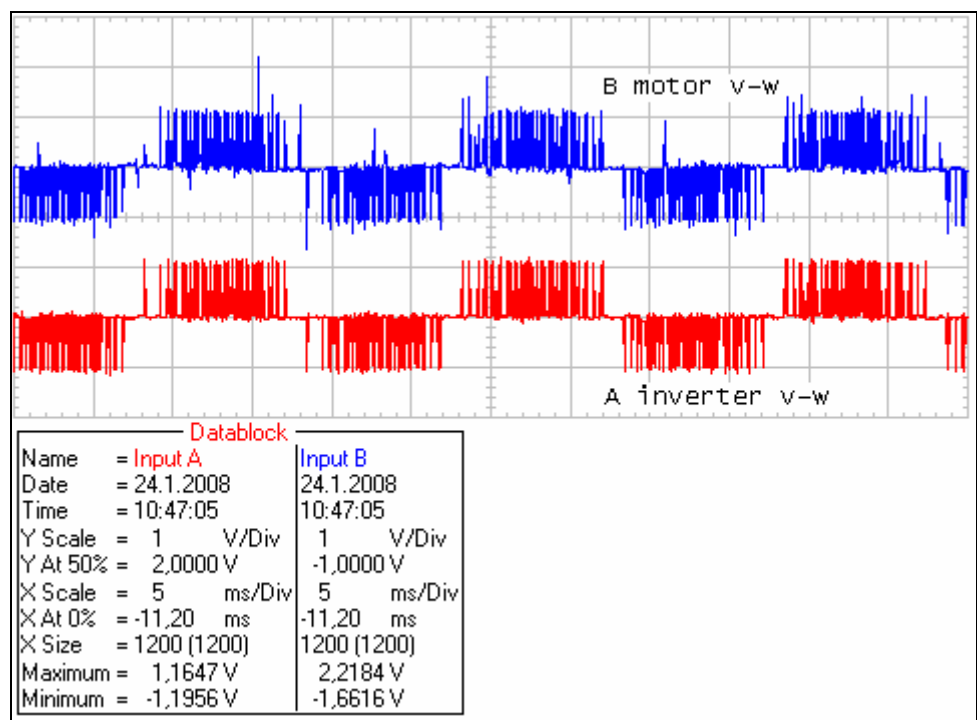
8 MITTAUSTULOKSET

Suodattimille ja kuristimelle suoritetuissa mittauksissa keskityttiin huippujännitteiden mittaamiseen moottorin liittimiltä. Lisäksi kiinnitettiin huomiota ylijännitteen muodostumiseen erilaisissa tilanteissa. Moottorin alimagnetointi ja pienemmän vaihtojännitteen syöttäminen eivät vaikuta ylijännitteen muodostumiseen moottorilla, koska ilmiö tapahtuu jokaiselle yksittäiselle jännitepulsille. Mittaustuloksista onkin havainnollisinta tarkastella aluksi ylijänniteilmiötä ja sen muodostumista ilman suodattimia. Tämän jälkeen suodattimien vaikutusta on helppo arvioida. Kaikissa mittauksissa vaimennettujen mittausten vaimennussuhde oli 1: 500, joten kaikki mitatut jännitearvot tulee kertoa luvulla 500.

Suodattimille suoritettulla lämpötilakokeella haluttiin saada selville suodattimien normaali käyntilämpötila mahdollisessa nosturikäytössä. Suodattimien ja kuristimen lämpötilat pysyivät mittauksien ajan alhaisina, eikä lämpötilakokeen mittaustulosten läpikäynti ole tämän työn kannalta aiheellista.

8.1 Jännite moottorilla ilman suodatinta

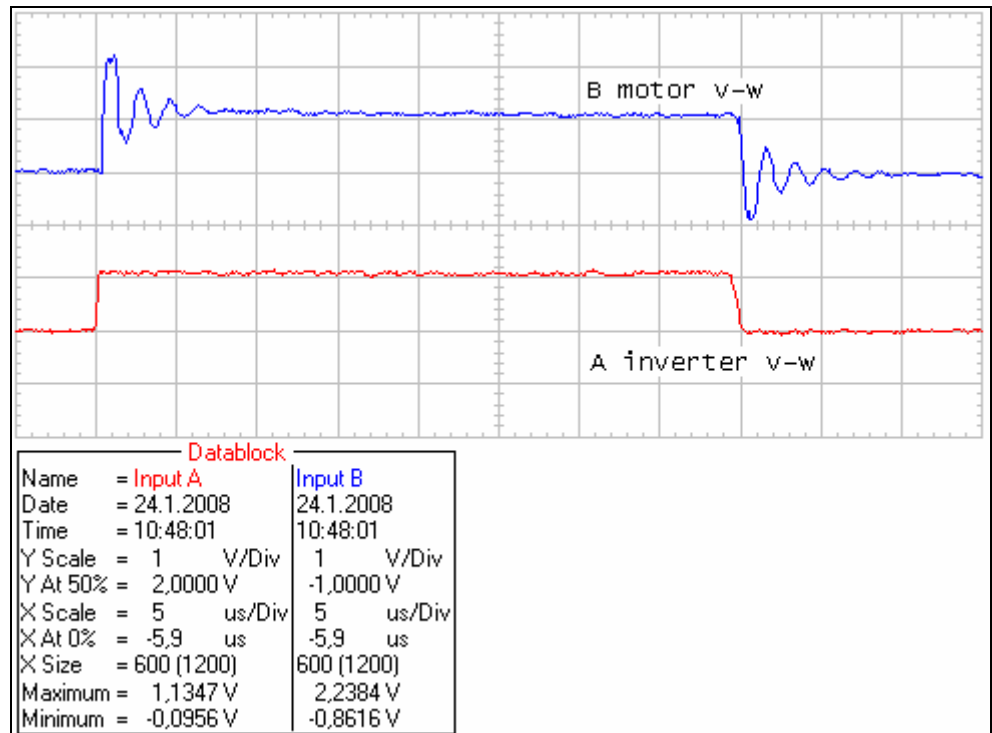
Kaikki tehdyt mittaukset suoritettiin aluksi tilanteessa, jossa taajuusmuuttajan ja moottorin välillä ei ollut suodatinta. Kaapelin pituutta ja vaihtojännitteen taajuutta muuttamalla pystytään havainnollisesti tarkastelemaan niiden vaikutusta. Jokaisella kaapelin mitalla ajettiin moottoria kolmella eri vaihtojännitteen taajuudella ja niitä vastaavilla tehollisarvoilla: 20 Hz 55 V, 50 Hz 131 V ja 120 Hz 310 V. Vaihtojännitteen amplitudilla tai taajuudella ei havaittu mittauksissa merkittävää vaikutusta jännitekäyrien muotoon tai huippujännitteisiin kun suodatinta ei käytetty.



Kuva 15. Pääjännite moottorilla ja taajuusmuuttajalla; kaapelin pituus on 50 m ja vaihtojännitteen taajuus on 50 Hz

Kuvassa 15 on esitetty moottorin ja taajuusmuuttajan V - W vaiheiden väliltä mitattujen pääjännitteiden käyrämuodot, kun moottoria syötetään 50 m pitkällä kaapelilla, eikä suodatinta käytetä. Jännite koostuu hyvin lyhytkestoista tasajännitepulsseista, joiden korkeus on sama kuin taajuusmuuttajan välipiirin jännite. Jännitteiden käyrämuodot ovat hyvin samankaltaisia moottorilla ja taajuusmuuttajalla. Moottorilla olevassa jännitteessä on kuitenkin havaittavissa korkeita jännitepiikkejä, joiden suurimmat arvot ovat lähes kaksinkertaisia taajuusmuuttajan syöttämään jännitteeseen verrattuna.

Ylijännitteen muodostumista on havainnollisinta tarkastella tutkimalla yksittäisiä jännitepulsseja, joiden huippujännite ylittää välipiirin jännitetason. Asettamalla oskilloskoopin liipaisutaso tarpeeksi korkealle, saatiin moottorin jännitteestä talteen korkeimpia jännitepiikkejä sisältävät jännitepulssit.



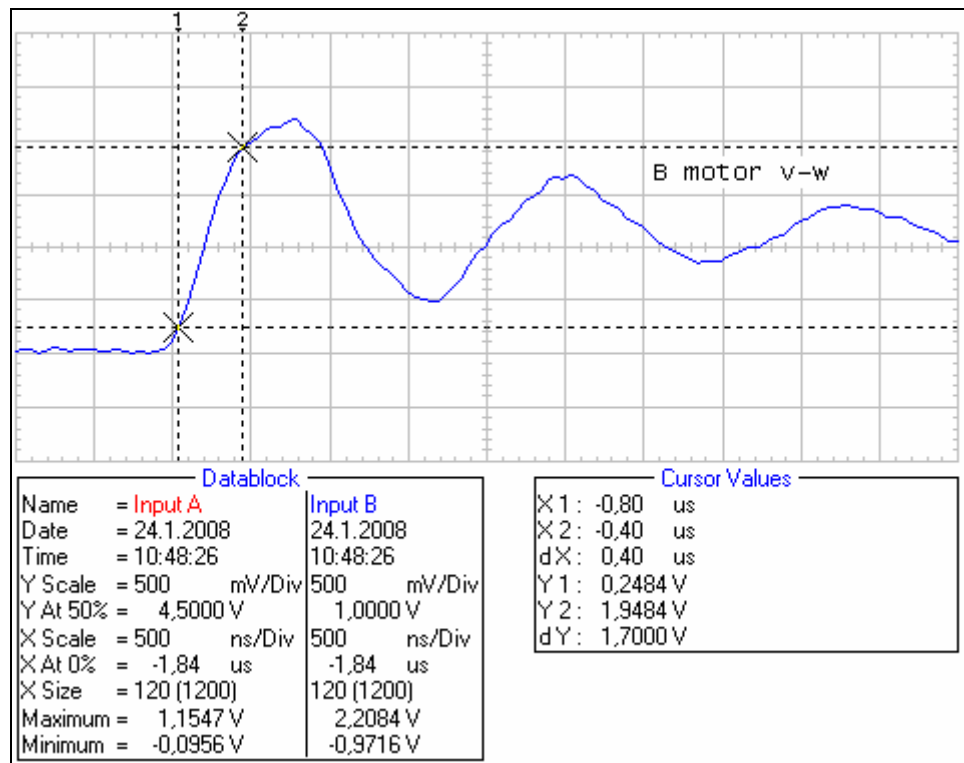
Kuva 16. Yksi jännitepulssi moottorilla ja taajuusmuuttajalla; kaapelin pituus on 50 m ja vaihtojännitteen taajuus on 50 Hz

Kuvassa 16 on nähtävissä yhden jännitepulssin käyrämuodot mitattuna moottorin ja taajuusmuuttajan liittimiltä. Taajuusmuuttajan liittimillä on nähtävissä välipiiristä syötetyn hyvin jyrkän jännitepulssin käyrämuoto. Jännitepulssin taso huojuu hiukan, kuten kuvasta 16 käy ilmi. Tämä johtuu enimmäkseen taajuusmuuttajan tasasuuntauksesta ja tasasuunnatun jännitteen suodatustasosta välipiirissä. Kuvan 16 tilanteessa välipiirin jännite n. 550 V on havaittavissa jännitepulssin korkeudesta taajuusmuuttajan liittimillä.

Moottorin liittimillä ilmenee suuri ylijännite, joka on lähes kaksinkertainen välipiirin jännitteeseen verrattuna. Jännite nousee moottorilla hyvin nopeasti lähes kaksinkertaiseksi ja tämän jälkeen jännitteen taso värähtelee voimakkaasti. Sama ilmiö tapahtuu jännitepulssin laskevalla reunalla, koska nopea jännitteen muutosnopeus sisältää hyvin paljon korkeataajuuskomponentteja. Moottorin liittimillä havaittu suurin jännite on 1 119 V.

8.1.1 Jännitteen nousunopeus moottorin liittimillä

Jännitteen nousunopeus kuvaa taajuusmuuttajakäytössä jännitepulssien jyrkkyyttä. Jyrkkyyden kasvaessa signaalin sisältämien korkeataajuuskomponenttien suhde perusaaltoon kasvaa. Määrittäessä signaalista nousunopeutta, tulisi tarkastella signaalin nousevan reunan muutosta 10 %:n ja 90 %:n pisteiden välillä.



Kuva 17. Yhden jännitepulssin nouseva reuna moottorin liittimillä; kaapelin pituus on 50 m ja vaihtojännitteen taajuus on 50 Hz

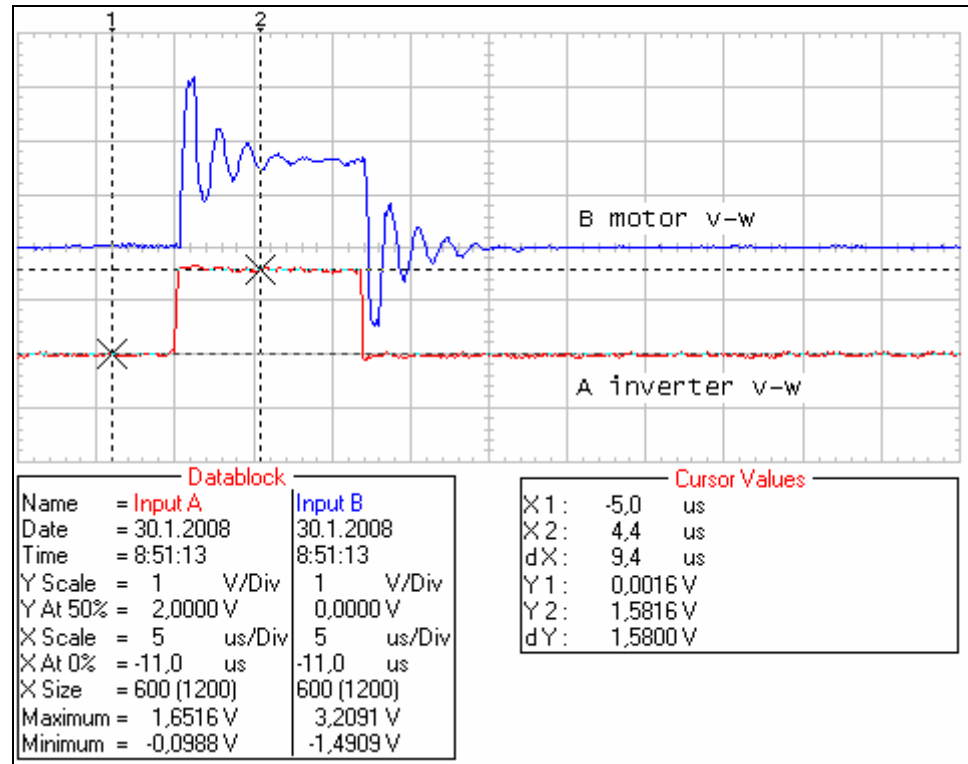
Taajuusmuuttajan syöttämien tasajännitepulssien suuri nousunopeus moottorin liittimillä on nähtävissä kuvassa 17 jännitekäyrän derivaatasta. Jännitteen nousunopeus voidaan määrittää kuvan 17 tilanteessa kursoreilla merkittyjen pisteiden välisestä jännite-erosta aikayksikköä kohti.

$$\frac{du}{dt} = \frac{dY}{dX} = \frac{Y2 - Y1}{X2 - X1} = \frac{1,7000V * 500}{0,4\mu s} = 2125 \frac{V}{\mu s}$$

Jännitteen nousunopeus ei ole täysin vakio kaikille jännitepulssille vaikka käyttötilanne olisikin täysin sama. Näin ollen mitään täysin tarkkaa nousunopeutta ei voida taajuusmuuttajalle tai käytölle määrittää.

8.1.2 Kuormalaskutilanteen aiheuttama lisärasitus

Tutkittavan moottorin liittimillä tapahtuvaa ylijänniteilmiötä tutkittiin myös simuloimalla nosturin kuormalaskutilannetta, jossa välipiirin jännite kasvaa normaalia kuormitustilannetta korkeammaksi.



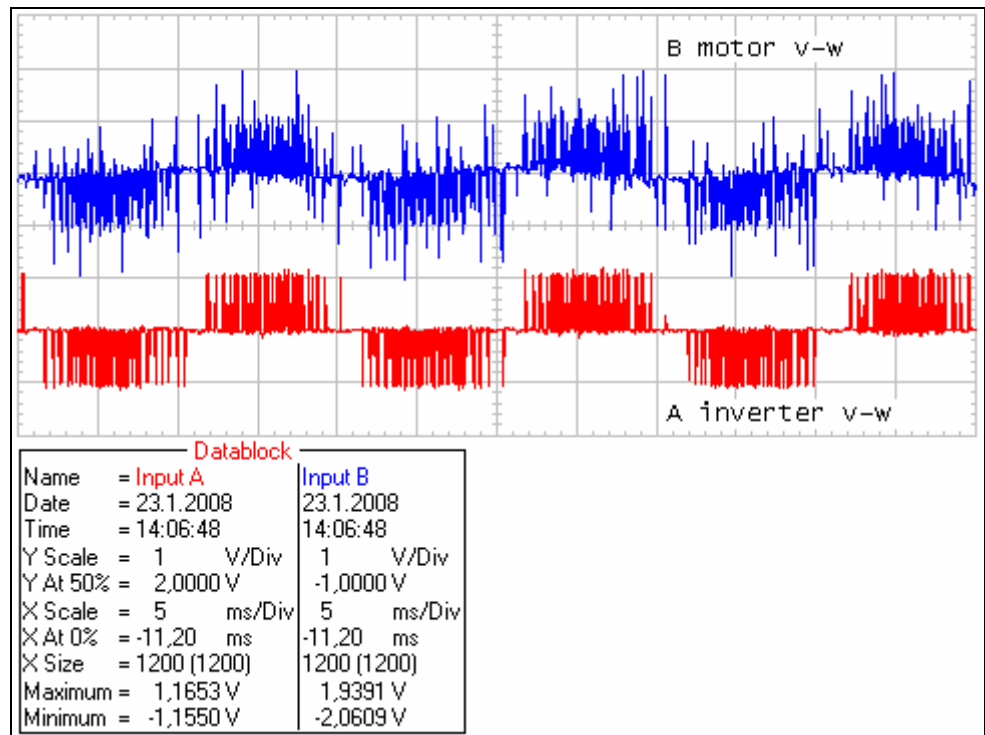
Kuva 18. Yksi jännitepulssi moottorin liittimillä. Moottori toimii generaattorina; kaapelin pituus on 50 m ja vaihtojännitteen taajuus 50 Hz

Kuvassa 18 on esitetty yhden jännitepulssin käyrämuoto moottorin ja taajuusmuuttajan liittimillä, kun moottori toimii generaattorina ja syöttää tehoa takaisin taajuusmuuttajalle. Välipiirin jännitteen taso on normaalia kuormitustilannetta korkeammalla, koska moottori syöttää välipiiriin ylimääräistä energiaa.

Jarrukatkoja rajoittaa välipiirin jännitteen n. 790 volttiin, joka on myös havaittavissa kuvassa 18 taajuusmuuttajan liittimiltä mitatun jännitepulssin keskimääräisestä korkeudesta. Mittauksissa käytetyn taajuusmuuttajan jarrukatkojen toimintapiste on 790 V. Kasvaneen välipiirin jännitetason takia moottorin liittimiltä mitattu huippujännite on korkeampi kuin normaalissa kuormitustilanteessa mitattu huippujännite. Moottorin liittimiltä mitattu huippujännite on 1 604 V.

8.1.3 Kaapelin pituuden vaikutus

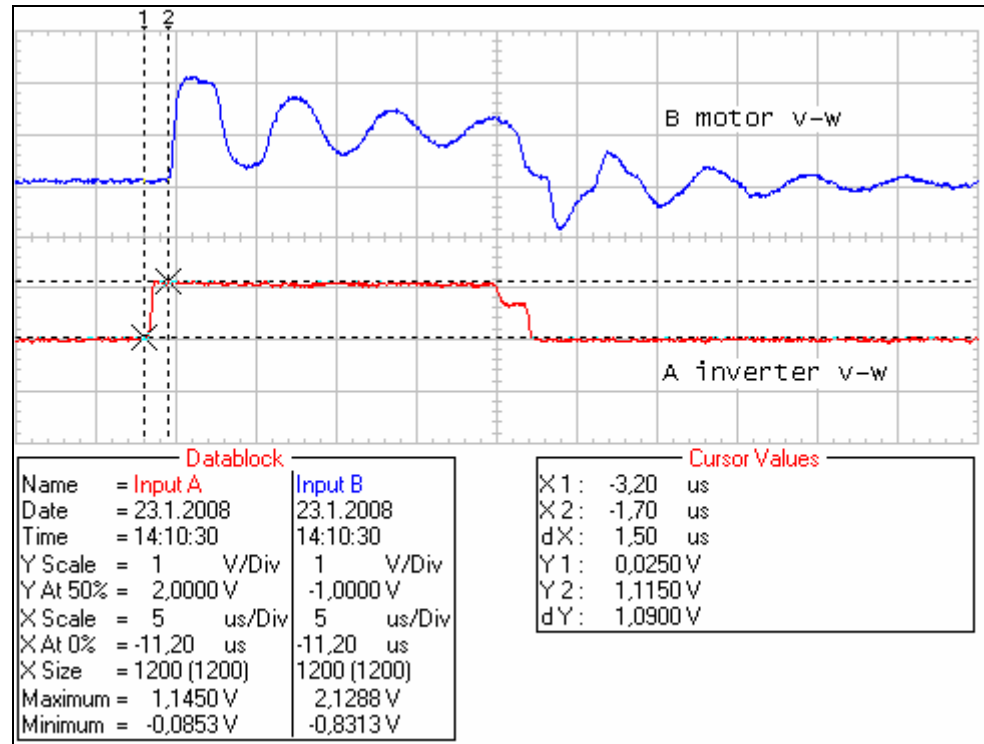
Suurin osa nosturimoottoreiden vioittumisista on tapahtunut käytettäessä pitkiä kaapeleita. Terminä ”pitkät kaapelit” on hyvin suhteellinen käsite, joten kaapeleiden pituuksia pitäisikin verrata ns. normaaleihin tilanteisiin. Nostureissa kaapeleiden pituudet vaihtelevat normaalisti useista kymmenistä metreistä sataan metriin. Käytettäessä yli 100 m pitkiä kaapeleita voidaan nosturikäytössä puhua pitkistä kaapeleista, nämä tilanteet ovat kuitenkin hyvin yleisiä. Mittaukset suoritettiin 50 m, 100 m ja 200 m pitkille kaapeleille. Mitauksissa 50 m ja 100 m kaapeleiden välillä ei ollut havaittavissa merkittävää eroa jännitteiden käyrämuotojen välillä. 200 m pituisilla kaapeleilla jännitteiden käyrämuodoissa oli nähtävissä selviä eroja.



Kuva 19. PWM-jännite moottorilla ja taajuusmuuttajalla; kaapelin pituus on 200 m ja vaihtojännitteen taajuus on 50 Hz

Kaapelin pituuden kasvaessa myös taajuusmuuttajan ja moottorin välillä oleva impedanssi kasvaa. Kaapelin sisältämä impedanssi vaimentaa osittain jännitepulssien sisältämiä korkeataajuuskomponentteja. Kaapelin pituuden vaikutus onkin nähtävissä kuvassa 19. Kaapelin impedanssi vaimentaa korkeataajuisia komponentteja jännitteestä. Moottorilta mitatun jännitteen käyrämuodossa on havaittavissa heikko 50 Hz:n perustaajuuden komponentti. Pääjännite moottorin liittimillä on kuitenkin hyvin säröytynyttä.

Jännite kasvaa moottorilla kaapelin vaimentavasta vaikutuksesta huolimatta lähes kaksinkertaiseksi, huippujännitteet eivät kuitenkaan ole niin suuria kuin lyhyemmillä kaapeleilla. Huomioitavaa on myös suuret negatiiviset jännitepiikit, jotka lisäävät moottorissa syntyviä häviötehoja ja voivat pahimmassa tapauksessa aiheuttaa moottorin ohjauksessa virheitä.



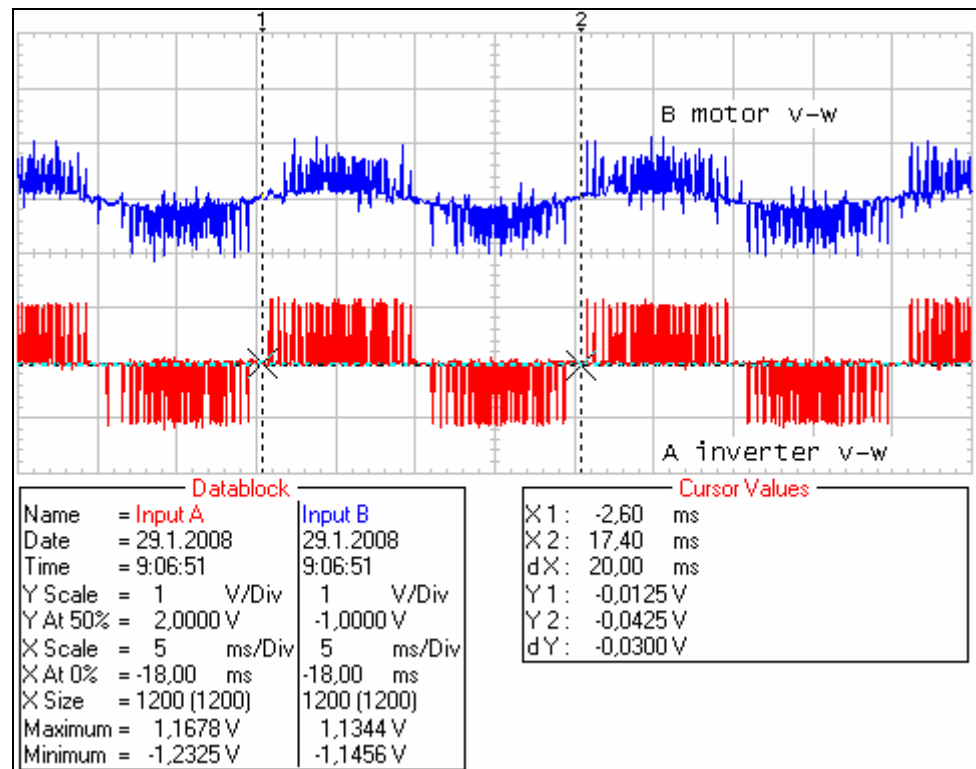
Kuva 20. Yksi jännitepulssi moottorilla ja taajuusmuuttajalla; kaapelin pituus on 200 m ja vaihtojännitteen taajuus on 50 Hz

Kuvassa 20 on nähtävissä yhden jännitepulssin käyrämuoto moottorilla ja taajuusmuuttajalla, kun moottoria syötetään 200 m pituisella kaapelilla. Suurin mitattu huippujännite on hieman pienempi kuin 50 m pitkää kaapelia käytettäessä, mutta jänniteenkäyrämuoto on hyvin huono.

Moottorilla jännite alkaa värähdellä hyvin voimakkaasti ja pitkäjaksoisesti. Merkittäväntä jännitteessä on sen voimakas värähtely vielä sen jälkeen, kun taajuusmuuttaja on katkaissut jännitepulssin. Kaapelin pituuden takia jännitepulssilla kuluu enemmän aikaa kulkea moottorille. Jännitepulssin kulkuaikeviive on esitetty kuvassa 20 kursorien avulla, joiden erosta näkee suoraan jännitepulssin kulkuajan. Pidentyneen kulkuajan takia jännite värähtelee myös pidemmällä jaksonajalla.

8.2 Du/dt-suodatin

Mittauksissa tutkittiin kahden eri valmistajan du/dt-suodattimen toimintaa. Suodattimet toimivat hyvin samalla tavalla eikä niiden välillä ollut jännitteiden käyrämuodoissa merkittäviä eroja. Tämä huomioiden riittää, että tarkastelu rajoitetaan ainoastaan toiseen suodattimeen. Du/dt-suodattimet sijoitettiin taajuusmuuttajan ulostuloliittimistä kahden metrin päähän.

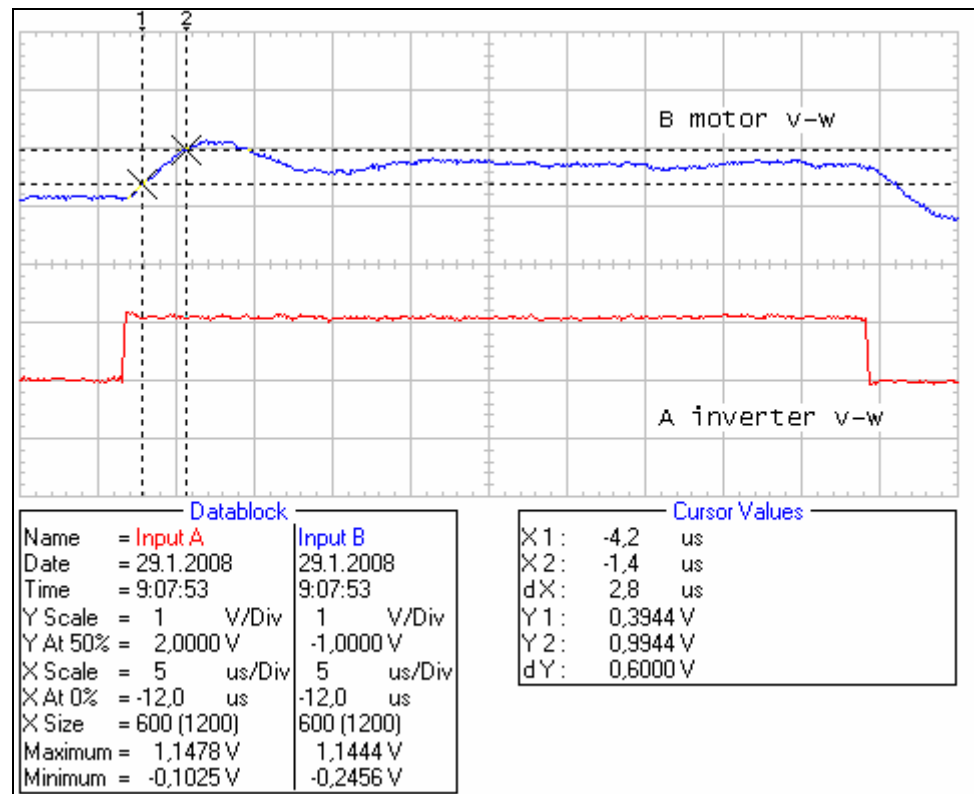


Kuva 21. PWM-jännite moottorilla ja taajuusmuuttajalla kun taajuusmuuttajan lähtöön on liitetty du/dt-suodatin 1; kaapelin pituus on 50 m ja vaihtojännitteen taajuus on 50 Hz

Kuvassa 21 nähdään taajuusmuuttajan ja moottorin välille liitetyn du/dt-suodattimen lisäämisen vaikutus. Kuten moottorilta mitatusta jännitteestä voidaan huomata, jännite on alipäästösuodatettu ja siinä on selvästi havaittavissa jännitteen perustaajuinen 50 Hz:n komponentti. Tällöin 50 Hz:n perustaajuuden osuus koko jännitteen sisältämistä taajuuskomponenteista on suurempi kuin suodattamattomassa tilanteessa. Kuvassa 21 on kursoreilla rajattu jännitteestä yksi jakso. Jaksonaika 20 ms on nähtävissä kursoreiden osoittamista arvoista (dX).

Suodatetussa moottorille syötettävässä jännitteessä on myös nähtävissä kuinka taajuusmuuttajan syöttämästä PWM-jännitteestä muodostuu pulssikuvion mukaisesti vaihtojännite. Jännitteessä on suodattimesta huolimatta

säröä, mutta du/dt-suodattimella pyritään vain suojaamaan moottoria liian suurilta ylijänniterasituksilta. Tehokkaammalla suodatuksella suodattimen aiheuttamat häviötehot kasvaisivat merkittävästi.



Kuva 22. Yksi jännitepulssi moottorilla ja taajuusmuuttajalla kun taajuusmuuttajan lähtöön on liitetty du/dt-suodatin 1; kaapelin pituus on 50 m ja vaihtojännitteen taajuus on 50 Hz

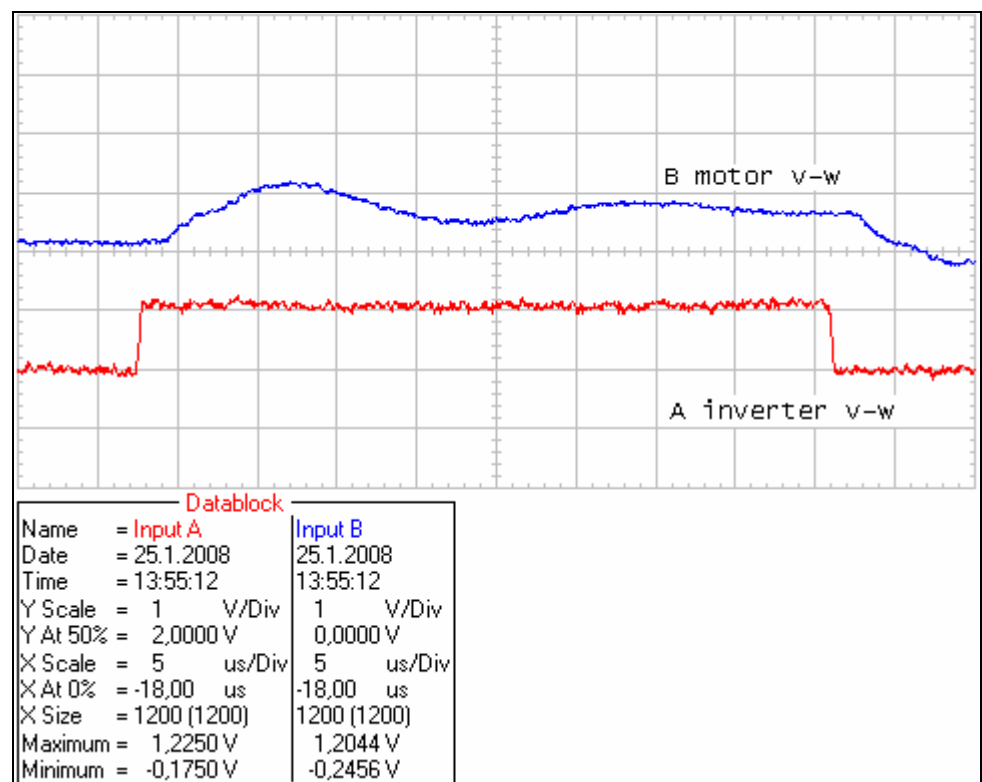
Kuvassa 22 on nähtävissä du/dt-suodattimen vaikutus yksittäisiin jännitepulssihin. Jännitepulssin reunat ovat pyöristyneet suodattimen ansiosta ja jännite on pulssin aikana hyvin tasoittunut verrattaessa tilanteeseen, jossa ei käytetä suodatinta (kuva 16). Suodatin rajoittaa jännitteen nousunopeutta tehokkaasti, eikä ylijännitettä pääse muodostumaan moottorilla. Suodatin rajoittaa kuvan 22 tilanteessa jännitteen nousunopeudeksi

$$107 \frac{\text{V}}{\mu\text{s}}$$

Suodatin siis rajoittaa nousunopeutta hyvin tehokkaasti ja suojaa moottorin käämiä. Voidaan myös olettaa, että suojaamattomasta kaapelista ympäristöön säteilevät sähkömagneettiset häiriöt ovat laskeneet korkeataajuisien komponenttien vaimennuttua.

8.2.1 Kaapelin pituuden vaikutus

Nostureissa käytetään suodattimia moottoreiden ylijännitesuojauksessa pääsääntöisesti tilanteissa, joissa samanaikaisesti syötetään useampia moottoreita tai moottorikaapelit ovat normaalia tilannetta pidemmät. Nämä tilanteet ovat käytännössä niitä, joissa kaapeleiden pituudet ovat karkeasti sanottuna yli 100 m. Suodattimia käytetäänkin yleensä tietynlaisissa nostureissa lähes vakioratkaisuna ja käyttö osittain pohjautuu käytännön kokemuksiin. Suodattimen toimintaa tutkittiin myös eri kaapelin pituuksilla.

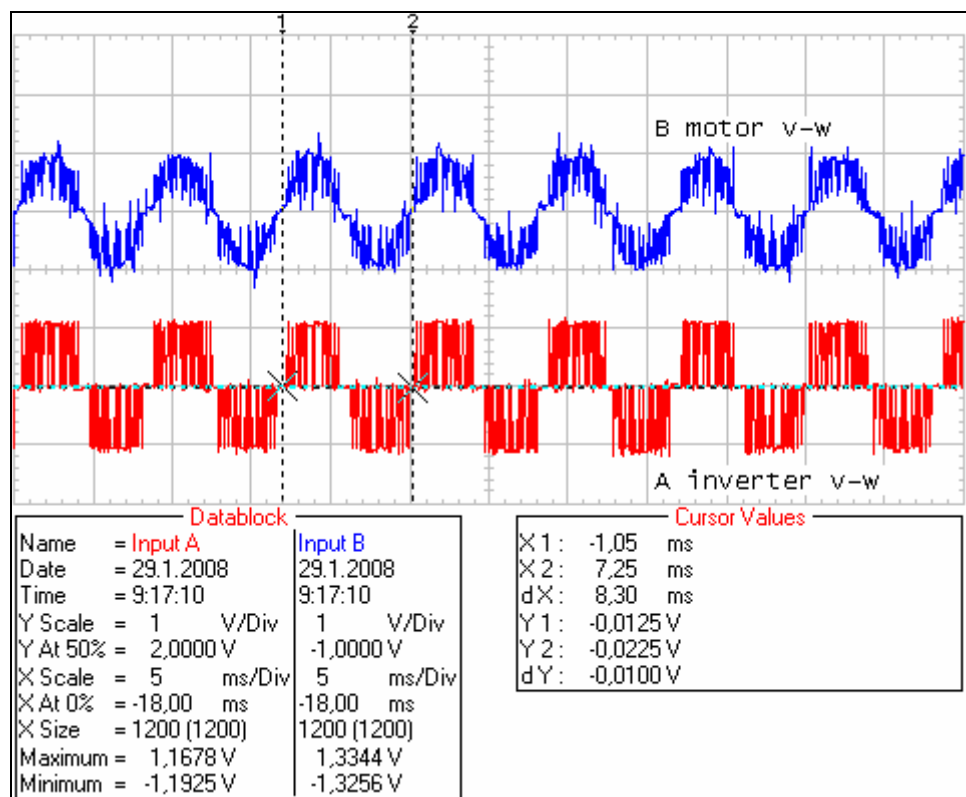


Kuva 23. Yksi jännitepulssi moottorin liittimillä, kun taajuusmuuttajan lähtöön on liitetty du/dt -suodatin 1; kaapelin pituus on 200 m ja vaihtojännitteen taajuus on 50 Hz

Kuvassa 23 on esitetty yhden jännitepulssin käyrämuodot moottorilla ja taajuusmuuttajalla kun suodattimen kanssa käytetään 200 m pitkää kaapelia. Jännitepulssilla on suurempi kuluaikaviive pidemmän kaapelin takia ja jännitteen värähtely on pitkittynyt ja voimistunut. Suodatin kuitenkin toimii hyvin pitkästä kaapelista huolimatta, rajoittaen jännitteen nousunopeutta tehokkaasti. Kaapelin pituudella ei mittausten perusteella ole merkittävää vaikutusta suodattimen toimintaan.

8.2.2 Vaihtojännitteen arvon ja taajuuden vaikutus

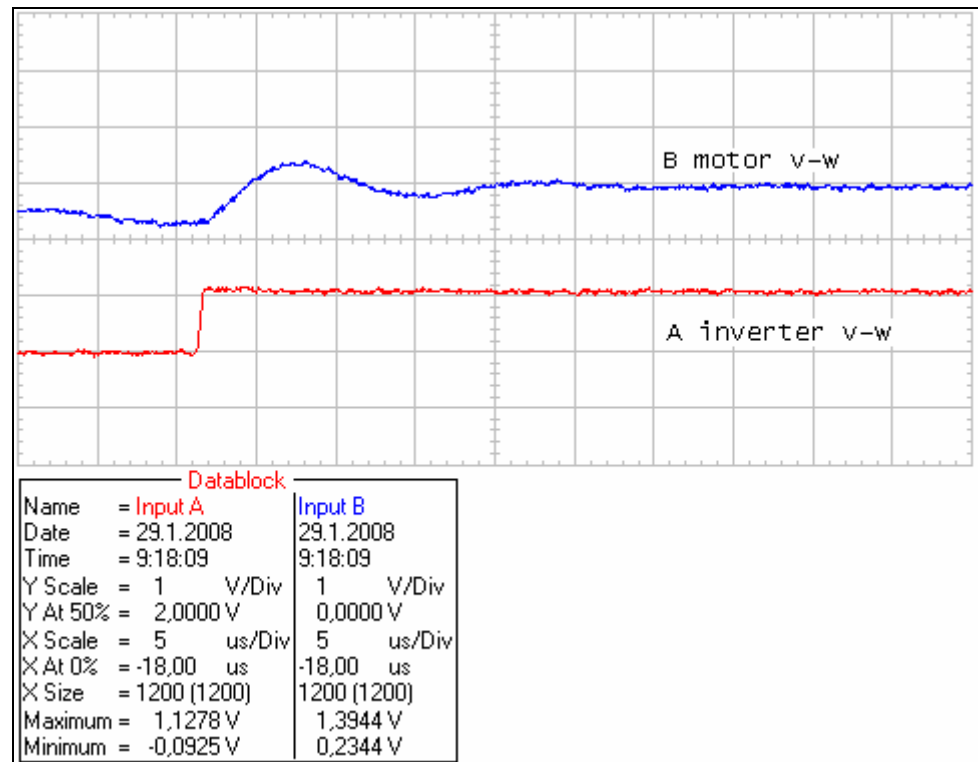
Nosturikäytössä siirtoliikkeitä voidaan haluttaessa toteuttaa suurilla nopeuksilla. Näissä tilanteissa moottorille syötettävän vaihtojännitteen taajuutta kasvatetaan, myös useita nostureissa käytettäviä moottoreita on leimattu 120 Hz:n tai 100 Hz:n nimellistaajuuksille. Nosturikäytössä suodattimien tulee sallia 120 Hz:n vaihtojännitteen taajuuden käyttäminen, joten suodattimien toimintaa tutkittiin myös eri vaihtojännitteen taajuuksilla. Taajuusmuuttajan ohjaustapana oli nopeusohjaus, joten vaihtojännitteen tehollisarvo ja taajuus kasvavat samassa suhteessa (U/f). Kun mittauksissa moottorille syötettiin 120 Hz:n vaihtojännitettä, sitä vastaava jännitteen tehollisarvo oli 310 V.



Kuva 24. Pääjännite moottorilla ja taajuusmuuttajalla, kun taajuusmuuttajan lähtöön on liitetty du/dt-suodatin 1; kaapelin pituus on 50 m ja vaihtojännitteen taajuus on 120 Hz

Kuvassa 24 on esitetty moottorin liittimiltä mitatun pääjännitteen käyrämuoto moottorille syötettäessä 120 Hz, 310 V vaihtojännitettä. Jännitteestä on rajattu kursoreilla 120 Hz:n yksi jaksonaika 8,3 ms. 120 Hz:n perustaajuus on nähtävissä hyvin selkeästi moottorilta mitatussa jännitteessä. Suodatetun jännitteen käyrämuoto on hyvin samanlainen kuin pienemmällä taajuudella ja jännitteellä. Jännite muistuttaa siniaaltoa, jossa on vielä melko paljon särröä.

Vaihtojännitteen tehollisarvon ja sen taajuuden kasvattaminen eivät varsinaisesti vaikuta suodattimen toimintaan tarkasteltaessa pääjännitettä. Vaihtojännitteen tehollisarvon kasvu aiheuttaa jännitteen perusaallon näkymään voimakkaana jännitteen käyrämuodossa. Yksittäiset jännitepulssit kuitenkin summautuvat vielä osittain jännitteen perusaaltoon, aiheuttaen lieviä ylijännitteitä moottorilla.



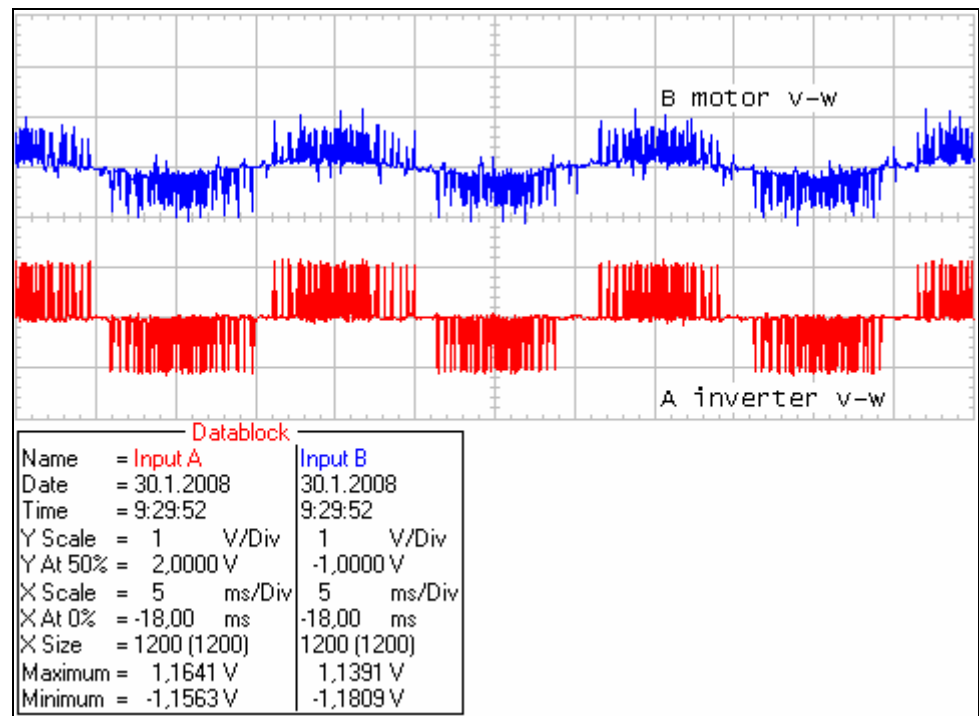
Kuva 25. Yksi jännitepulssi moottorin liittimillä, kun taajuusmuuttajan lähtöön on liitetty du/dt -suodatin 1; kaapelin pituus on 50 m ja vaihtojännitteen taajuus on 120 Hz

Käytettäessä du/dt -suodatinta, vaihtojännitteen ja sen taajuuden kasvaessa myös moottorilta mitatut huippujännitteet kasvoivat. Kuvassa 25 on nähtävissä yksittäinen jännitepulssi, jonka huippuarvo 697 V ylittää taajuusmuuttajan välipiirin jännitteen. Jännite ei kuitenkaan pääse kasvamaan haitallisen korkealle.

Tilanteessa, jossa moottoria käytettiin ilman suodattimia, moottorille syötetävän vaihtojännitteen taajuudella tai tehollisarvolla ei huomattu olevan vaikutusta moottorilla ilmeneviin ylijännitteisiin. Suodattimia käytettäessä moottorilla kuitenkin havaittiin mitattujen huippujännitteiden kasvavan vaihtojännitteen taajuuden ja sen tehollisarvon kasvaessa. Voimistuneen perustaa-juuden takia jännite ei laske täysin nolnaan moottorilla eri jännitepulssien välillä.

8.3 Kuristin

Suodattimien lisäksi tutkittiin taajuusmuuttajakäyttöön suunniteltua kolmepylväistä kuristinta, jota voidaan käyttää samalla tavalla kuin du/dt-suodatinta. Kuristimen suorituskyvyn tutkiminen oli mielenkiintoisinta sen yksinkertaisuuden ja matalan hankintakustannuksen takia. Kuristimelle suoritettiin samat mittaukset kuin suodattimillekin.

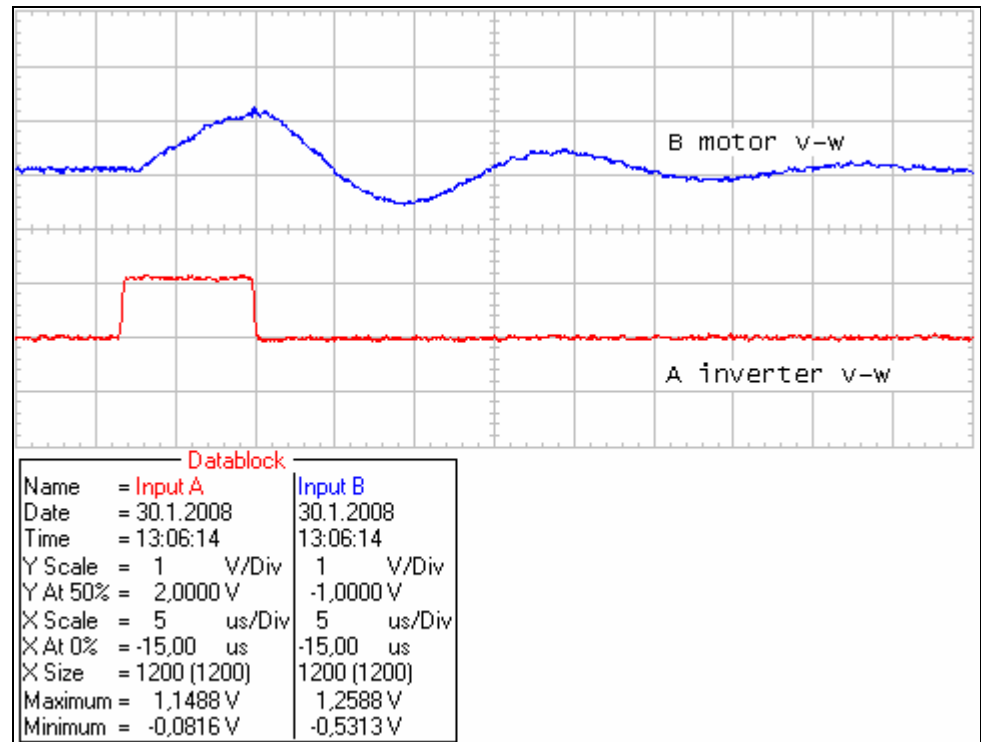


Kuva 26. PWM-jännite moottorin ja taajuusmuuttajan liittimillä, kun taajuusmuuttajan lähtöön on liitetty kuristin; kaapelin pituus on 50 m ja vaihtojännitteen taajuus on 50 Hz

Ylijännitesuojaukseen suunniteltua kuristinta käytettäessä jännitteen käyrämuoto moottorilla on hyvin samanlainen kuin du/dt-suodattimella. Kuten kuvasta 26 on nähtävissä, 50 Hz:n taajuuskomponentti on jännitteessä selvästi esillä myös kuristinta käytettäessä. Kuten suodattimilla, jännitteessä on myös säröä. Oikein mitoitettu kuristin toimii siis alipäästösuotimena, suodattaen korkeataajuisia komponentteja jännitteestä. Moottorilta mitatut huippujännitteet rajoittuvat taajuusmuuttajan välipiirin jännitteen tasolle.

Mittauksissa kuristin toimi hyvin samankaltaisesti kuin suodattimet ja se rajoitti jännitteen nousunopeutta sekä huippujännitteitä hyvin tehokkaasti. Vaihtojännitteen taajuuden ja sen tehollisarvon muuttumisella oli samanlainen vaikutus kuristimen toimintaan kuin suodattimillakin. Vaihtojännitteen amplitudin ja taajuuden kasvaminen aiheutti myös kuristimella

huippujännitteiden kasvamisen, mutta jännite ei kuitenkaan kasvanut liian korkeaksi. Kuristin toimi yhtä hyvin kuin suodattimet ylijännitesuojauksessa lyhyemmillä kaapeleilla. Kaapelin pituuden kasvaessa kuristimen toiminta kuitenkin heikkeni hiukan.



Kuva 27. Yksi jännitepulssi moottorin liittimillä, kun taajuusmuuttajan lähtöön on liitetty kuristin; kaapelin pituus on 200 m ja vaihtojännitteen taajuus 50 Hz

Kuristimen toiminta heikkenee selvästi kaapelin pituuden kasvaessa ja moottorin liittimillä jännitteessä on havaittavissa voimakasta ja pitkäaikaista huojuntaa, joka on nähtävissä kuvassa 27. Huojunnasta huolimatta jännite ei kuitenkaan kasva korkeaksi ja sen nousunopeus on alhainen.

8.4 Mittaustulosten vertailu

Suodattimien ja kuristimen toimintaa tutkittiin useissa eri tilanteissa, jotka simuloivat normaalia nosturikäyttöä. Lisäksi samat mittaukset suoritettiin ilman jännitteen suodatusta. Mittauksilla pyrittiin selvittämään suodattimien ja kuristimen suodatuskyky ja arvioida niiden tuomaa lisäsuojaa moottorivaurioihin johtavilta ylijännitteiltä. Suodattimet ja kuristin toimivat hyvin samankaltaisesti, lukuun ottamatta sitä, että kuristimen toiminta heikkeni kaapelin pituuden kasvaessa.

Laitteiden toimintaa ja suodatuskykyä voidaan vertailla myös numeerisesti tarkastelemalla mitattuja huippujännitteitä ja vertaamalla niitä standardien antamiin suosituksiin. Taulukkoon 2 on koottu yhteenveto jännitteiden huippuarvoista, jotka mitattiin moottorin liittimiltä vaiheiden V - W välistä. Taulukosta 2 nähdään jännitteen muodostuminen jokaisessa tilanteessa sekä jännitteen riippuvuus kaapelin pituudesta.

Taulukko 2. Suurimmat mitatut huippujännitteet eri kaapelin pituuksilla

	50 m	100 m	200 m
Ilman suodatinta	U / V	U / V	U / V
20 Hz	1119	1104	1050
50 Hz	1119	1104	1064
120 Hz	1129	1119	1094
Jarrutus huimamassalla	1615	1617	1500
Kuormanlaskutilanne	1605	1574	1150
dU/dt suodatin 1	U / V	U / V	U / V
20 Hz	537	537	532
50 Hz	572	592	602
120 Hz	697	707	697
Jarrutus huimamassalla	877	917	822
Kuormanlaskutilanne	807	802	802
dU/dt suodatin 2	U / V	U / V	U / V
20 Hz	472	520	492
50 Hz	472	555	532
120 Hz	672	675	687
Jarrutus huimamassalla	832	852	777
Kuormanlaskutilanne	737	737	737
Kuristin	U / V	U / V	U / V
20 Hz	525	560	554
50 Hz	580	605	629
120 Hz	665	700	739
Jarrutus huimamassalla	867	904	854
Kuormanlaskutilanne	807	841	854

Ilman suodatinta suurimmat jänniterasitukset ilmenevät kun käytettiin 50 m:n pituista kaapelia ja rasitukset huippujännitteen osalta laskevat kaapelin pituuden kasvaessa. Nosturin kuormanlaskutilanteen simuloinnissa, jossa moottori toimi generaattorina, moottorin jänniterasitukset olivat suuremmat kohonneen välipiirin jännitteen takia. Mittaustuloksista onkin havaittavissa, että moottorilla suurimmat jännitepiikit ovat verrannollisia enimmäkseen taa-juusmuuttajan välipiiriin jännitteeseen.

Jännitteen nousunopeuden osalta kaapelin pituus rajoitti hiukan du/dt -arvoa, mutta nousunopeus oli kuitenkin hyvin korkea. Lähes kaikissa mittauksissa ilman suodatinta jännitteen nousunopeudet olivat yli

$$2000 \frac{V}{\mu s},$$

ylittäen IEC 60034 -standardin antamat suositukset koskien normaaleja verkkosyöttöisiä tai 500 V taajuusmuuttajakäyttöön tarkoitettuja moottoreita.

Suodattimet ja kuristin suojaavat tehokkaasti moottoria ylijännitteiltä ja korkealta jännitteen nousunopeudelta. Nousunopeus oli kaikissa mittauksissa molemmilla suodattimella ja kuristimella alle

$$200 \frac{V}{\mu s}.$$

Suodattimet ja kuristin täyttivät IEC 60045 -standardin suositukset koskien moottorille syötettävää jännitettä kaapelin pituudesta tai tilanteesta riippumatta. Suodattimien ja kuristimen väliset erot huippujännitteiden tai jännitteen nousunopeuden osalta eivät ole käytännön kannalta merkittäviä.

Kuristin toimii hyvin ylijännitesuojauksessa kaapelin ollessa vielä 100 m pitkä, mutta sen toiminta heikkenee kaapelin pituuden kasvaessa 200 metriin. Vaikka jännitteen värähtely onkin pitkäjaksoista 200 m kaapeleilla, pysyy se alhaisena ja jännitteen nousunopeus on pieni. Verrattaessa mittaustuloksia IEC-standardin antamiin suosituksiin, voidaan todeta, että tutkituilla suodattimilla ja kuristimella saavutetaan hyvä ylijännitesuojaus taajuusmuuttajakäytössä mittauksissa käytetyllä moottorilla ja taajuusmuuttajalla.

9 YHTEENVETO

Tässä insinööriyössä tutkittiin PWM-taajuusmuuttajakäytöissä ilmenevää moottoreiden ylijänniteilmiötä teoreettisesti ja kokeellisesti. Lisäksi tarkasteltiin oikosulkumoottoreiden ylijännitesuojausta ja vertailtiin mittaustuloksia standardien antamiin ohjearvoihin. Tarkastelu suoritettiin nosturikäyttöjen kannalta ja mittauksissa pyrittiin simuloimaan nosturikäytön erityispiirteitä. Kaikki työssä esitetty teoria ja mittaustulokset pätevät myös muihin vastaaviin PWM-taajuusmuuttajakäyttöihin.

Välipiirin jännitetasolla on hyvin määräävä tekijä moottorin kokemiin ylijänniterasitukseen. Välipiirin jännite kasvaa normaalisti taajuusmuuttajan syöttöjännitteen mukana, joten samalla myös moottorin kokemat ylijänniterasitukset kasvavat. Suuremmille syöttöjännitteille suunnitellut taajuusmuuttajat muodostavat hyvin korkean tasajännitteen välipiiriin, joten myös jarrukatkojan toimintapiste on hyvin korkealla. Nämä tilanteet luovat myös suuremmat jänniterasitukset moottoreille.

Mittauksissa havaittiin moottorilla suurimmat huippujännitteet jo 50 m kaapeleilla, huippujännitteiden tason laskiessa kaapelin pituuden kasvaessa. Todennäköisesti huippujännitteet olisivat kasvaneet hiukan, jos mittauksissa olisi käytetty hieman lyhyempää kaapelia kuin 50 m. Tämä havainto onkin mielenkiintoinen, koska yleisesti ylijänniteongelma liitetään käyttöihin, joissa moottoria syötetään pidemmällä kaapelilla kuin 50 m. Pidemmän kaapelin aiheuttama vaimennus on todennäköisin syy kyseiseen ilmiöön. Nostureissa ei kuitenkaan yleisesti käytetä näin lyhyitä kaapeleita tai niiden kanssa ei ole ilmennyt ongelmia, joten 50 m lyhyempien kaapeleiden tutkiminen ei ollut aiheellista.

Mittaustuloksista mielenkiintoisin havainto on pelkän taajuusmuuttajakäyttöön tarkoitetun kuristimen toiminta ylijännitesuojauksessa, vaikkakin sen toimintakyky heikkeni pitkillä kaapeleilla. Kuristimia voitaisiin käyttää matalien hankintakustannuksien takia perusratkaisuna lisäsuojaukseen käytöissä, joissa kaapeleiden pituudet eivät ole kovin suuria. Kaapeleiden ollessa hyvin pitkiä ja haluttaessa parempaa suojausta, voitaisiin käyttää du/dt -suodatinta.

Mittaustulokset eivät kuitenkaan anna kunnan tukea kokonaisen suodatinmalliston käyttöönottamiseen nosturikäytöissä, eikä kattavien johtopäätösten tekemiseen. Varmistukseksi vastaaville suodattimille tulisi tehdä lisämittauksia eri kokoluokista ja koekäyttää suodatinta oikeassa käytössä olevassa nosturissa, jossa samalla taajuusmuuttajalla syötetään toisistaan erillään olevia moottoreita.

Mittauksissa käytetty oikosulkumoottori oli suurempi kuin mille tarkastelussa mukana olleet suodattimet on suunniteltu, moottorin korkeataajuusmalli oli siis erilainen kuin sen olisi pitänyt. Moottorin korkeataajuusmallin ei kuitenkaan pitäisi vaikuttaa suodattimen toimintaan merkittävästi, koska suodattimet poistavat korkeataajuisia komponentteja taajuusmuuttajan syöttämästä

jännitteestä ennen moottoria. Kirjallisuudessa mainitaan pienempien moottorien korkeataajuusimpedanssien olevan suurempia kuin niitä suuremmilla moottoreilla, joten ilman suodattimia saadut mittaustulokset voivat olla todellista tilannetta alhaisemmat. Suodattimien kanssa voitaisiin käyttää monia erilaisia moottoreita, jonka lisäksi samanlaisten moottoreiden staattorikämmitykset saattavat olla korkeataajuusmalliensa kannalta hyvinkin erilaisia. Joten yhdellä moottorilla tehtyjä mittauksia ei voida pitää täysin yleistettävänä.

Tulevissa lisämittauksissa suodattimet tulisi valita tarkasti samasta kokoluokasta moottorin kanssa ja mahdollisesti suorittaa mittaukset usealle eri moottorille. Lisäksi useita moottoreita voitaisiin syöttää samanaikaisesti. Suodattimien toimintaa voitaisiin tarkastella ja arvioida myös mittaamalla moottorille syötettävästä jännitteestä taajuusspektri. Taajuusspektristä nähtäisiin suoraan suodattimen suodatuskyky ja taajuuskomponenttien vaimentuminen.

Mittaustulokset ovatkin mielenkiintoisia ja niiden pohjalta voidaan tarkistaa suodattimien tarpeellinen käyttäminen nostureissa. Lisämittauksia vastaavantalaisille suodattimille suunnitellaan tämän työn tuloksien ja päätelmien pohjalta. Työssä esitettyjä periaatteita ja mittauksia voidaan käyttää tukena jatkotutkimuksissa, jonka lisäksi jatkotutkimukset voidaan keksittää tehokkaammin. Mittauksien tuloksista saatiin lisäksi uutta tietoa nykyaikaisten taajuusmuuttajien käytön aiheuttamista moottoreiden jänniterasituksista.

LÄHTEET

- [1] Hämäläinen, Y - Starck, P. *KCI Training: BaseTrain-koulutusmateriaali*. Sisäinen julkaisu. Hyvinkää: Konecranes Oy. 2004.
- [2] Pehkonen, Jarmo. *Nosturin nopeusanturittoman oikosulkumoottorikäytön ohjaus*. Diplomityö. Teknillinen Korkeakoulu. Sähkö- ja tietoliikennetekniikan osasto. Espoo. 2000.
- [3] *Electrical training W743-koulutusmateriaali*. Sisäinen julkaisu. Hyvinkää: Konecranes Oy. 2007.
- [4] Martin, Janne., *Voltage Stresses on Frequency Converter Driven Motors in Cranes*. Nordic Workshop on Power and Industrial Electronics. Hyvinkää: KCI Konecranes Plc. 1998.
- [5] *Variable Speed Drives and Motors: Motor Insulation Voltage Stresses Under PWM Inverter Operation*. Technical report No.1. Third Edition. London: Gambica/Rema Working Group. 2006.
- [6] Hanigovszki, Norbert, *EMC Output Filters for Adjustable Speed Drives*. Väitöskirja. Aalborg University. Institute of Energy Technology. Aalborg, Tanska. 2005.
- [7] Hanigovszki, Norbert - Landkildehus, Jørn - Blaabjerg, Frede, *Output filters for AC adjustable speed drives*. IEEE: 1-4244-0714-1/07. 2007.
- [8] Cheng, David K, *Field and Wave Electromagnetics*, Second Edition. Addison-Wesley Publishing Company. Fourth Printing. 1991 (1989).
- [9] Moreira, Alessandro F - Lipo, Thomas A - Venkataramanan, Giri - Bernet, Steffen, *High-Frequency Modeling for Cable and Induction Motor Overvoltage Studies in Long Cable Drives*. IEEE Trans.Ind.App., Vol. 38, No.5. pp.1297 - 1305. September/October 2002.
- [10] Von Jouanne, Anette - Enjeti, Prasad N, *Design Considerations for an Inverter Output Filter to Mitigate the Effects of Long Motor Leads in ASD Applications*. IEEE Trans.Ind.App., Vol 33, No.5. pp.1138 - 1145. September/October 1997.
- [11] Persson, Erik, *Transient Effects in Application of PWM Inverters to Induction Motors*. IEEE Trans.Ind.App., Vol.28, pp.1095 - 1100. September/October 1992.
- [12] Aura, Lauri - Tonteri, Antti J, *Sähkökoneet ja tehoelektronikan perusteet*. 1. painos. Porvoo, Helsinki, Juva: WSOY. 1996.

