



TEKNIikka JA LIIKENNE

Sähkötekniikka

Elektroniikka ja automaatio

INSINÖÖRITYÖ

PIENITEHOISEN TAAJUUSMUUTTAJAN KILPAILIJAVERTAILU

**Työn tekijä: Lauri Järvinen
Työn ohjaajat: DI Arja Ristola
DI Kalle Suomela**

Työ hyväksytty: 28.4.2010

**Arja Ristola
lehtori, DI**



ALKULAUSE

Tämä insinöörityö tehtiin ABB Oy, Drives Low, Power AC -tulosityksikön tuotekehitysosastolle. Haluan kiittää työni ohjaamisesta dipl.ins. Kalle Suomelaa ABB Oy:stä sekä dipl.ins. Arja Ristolaa Metropolia Ammattikorkeakoulusta.

Lopuksi haluan kiittää kaikkia, jotka ovat auttaneet minua tämän opinnäytetyön teossa.

Helsingissä 22.4.2010

Lauri Järvinen

TIIVISTELMÄ

Työn tekijä: Lauri Järvinen	
Työn nimi: Pienitehoisen taajuusmuuttajan kilpailijavertailu	
Päivämäärä: 22.4.2010	Sivumäärä: 41 s. + 5 liitettä
Koulutusohjelma: Sähkötekniikka	Suuntautumisvaihtoehto: Elektroniikka ja automaatio
Työn valvoja: dipl.ins. Arja Ristola, Metropolia Ammattikorkeakoulu	
Työn ohjaaja: dipl.ins. Kalle Suomela, ABB Oy	
<p>Tämä insinööryö tehtiin ABB Oy, Drives, Low Power AC -tulosyksikölle Helsingissä. Työssä tutkittiin usean eri valmistajan 0,75 - 4,0 kW:n tehoisia PWM-taajuusmuuttajia. Työssä on selvitetty ja analysoitu, millaisia teknisiä ratkaisuja ja komponenttivalintoja eri valmistajat ovat tuotteissaan tehneet. Taajuusmuuttajia vertailtiin työssä kerättyjen tietojen perusteella.</p> <p>Työssä purettiin vertailuun valitut taajuusmuuttajat osiin. Laitteiden komponentit listattiin sekä niiden datalehdet haettiin valmistajien Internet-sivuilta. Laitteista etsittiin niiden toiminnalliset osakokonaisuudet ja vertailtiin niiden toteutuksia.</p> <p>Työn alussa on eri kirjallisista lähteistä koottu teoriaosuus. Teoriaosuuden alussa on esitely taajuusmuuttajan toimintaperiaate sekä sen käyttökohteet ja edut. Tämän jälkeen perehdytään välipiirillisen taajuusmuuttajan rakenteeseen. Teoriaosuuden lopuksi käydään läpi, mitä toiminnallisia osakokonaisuuksia jännitevälipiirillisissä PWM-taajuusmuuttajissa on. Tämän jälkeen siirrytään taajuusmuuttajien vertailuun osakokonaisuuksittain. Vertailun lopuksi laitteiden komponentti- ja kokoonpanokustannuksia arvioidaan.</p> <p>Työn tuloksena saatiin tietoa, millaisia suurimpien valmistajien pienitehoiset laitteet ovat. Vertailussa selvisi, millaisia samankaltaisuuksia sekä poikkeavia toteutuksia eri valmistajilla oli. Työssä saatuja tietoja vertailun taajuusmuuttajien komponenteista ja rakenteista voidaan käyttää tuotesuunnittelun tukena.</p>	
Avainsanat: taajuusmuuttaja, kilpailijavertailu, kilpailija-analyysi	

ABSTRACT

Name: Lauri Järvinen	
Title: Competitor Comparison of a Small Power Frequency Converter	
Date: 22.4.2010	Number of pages: 41 pages + 5 <i>appendices</i>
Department: Electrical Engineering	Study Programme: Electronics and Automation
Instructor: Arja Ristola, M. Sc., Helsinki Metropolia University of Applied Sciences	
Supervisor: Kalle Suomela, M. Sc., ABB Oy	
<p>This thesis was carried out for ABB Oy, Drives, Low Power AC profit centre in Helsinki. This study focuses on small powered frequency converters. The inverter units are from various manufacturers and they all are in the power range of 0,75 to 4,0 kW. The technical features, designs and solutions of the frequency converters are examined and analyzed. The frequency converters are then compared with each other based on this information.</p> <p>The frequency converters were disassembled to allow for closer observation. The components used were listed and the datasheets concerning each part were collected from the manufacturers' websites.</p> <p>In the beginning of the thesis there is a theoretical part collected from written sources. First, the basic operational principle, the most common applications and the benefits of the frequency converter are introduced. Next the basic structure of a frequency converter with an intermediate circuit is presented. The last theoretical part examines the functional units of the frequency converters. After the theory, the functional parts of the converters are compared with each other. Lastly the costs of each frequency converter are assessed.</p> <p>This thesis provides information on the low-power frequency converter products from the major manufacturers. The design trends and diverging technical implementations were identified. This information about the components and different solutions can be used to support and guide future product planning.</p>	
Keywords: frequency converter, inverter unit, competitor analysis	

SISÄLLYS

ALKULAUSE

TIIVISTELMÄ

ABSTRACT

SISÄLLYS

LYHENTEET JA KÄSITTEET

1	JOHDANTO	1
2	TAAJUUSMUUTTAJA	2
2.1	Taajuusmuuttajan toimintaperiaate	2
2.2	Taajuusmuuttajan käyttökohteet ja edut	2
2.3	Välipiiritaajuusmuuttajan rakenne	3
2.4	PWM-taajuusmuuttajan toiminnalliset osat	5
3	TAAJUUSMUUTTAJIEN VERTAILU	6
3.1	Vertailtavien taajuusmuuttajien esittely	6
3.2	Tehotiheyden ja jäähdytyksen vertailu	9
3.3	RFI-suodatus ja ylijännitesuojaus	12
3.4	Vaihto- ja tasasuuntaussillat	17
3.5	Jännitevälipiiri	19
3.6	Latauspiiri	22
3.7	Virranmittaus	24
3.8	Piirikorttivertailu	26
3.9	Mikroprosessori	27
3.10	I/O-liitännät	29
3.11	Apujännitelähde	31
3.12	Komponentti- ja tuotantokustannukset	33
4	TULOKSET	35
4.1	0,75 kW:n ja 1,5 kW:n laitteet	35
4.2	2,2 kW:n laitteet	37

4.3	4,0 kW:n laitteet	38
5	YHTEENVETO	39
	LÄHTEET	40
	LIITTEET	
	LIITE 1	Pääpiirikaaviot
	LIITE 2	Tasa- ja vaihtosuuntaajamoduulit
	LIITE 3	Mikroprosessorit
	LIITE 4	I/O-liitännät ja -protokollat
	LIITE 5	Apujännitelähteiden tehotransistorit

LYHENTEET JA KÄSITTEET

ABB	Asea Brown Boveri
ADC	Analog to Digital Converter; analogia-digitaalimuunnin
CAN	Controller Area Network; sarjaliikenteinen automaatiöväylä
CSI	Current Source Inverter; virtavälipiiritaajuusmuuttaja
DC +	välipiirin tasasuunnatun jännitteen korkeampi potentiaali
DC -	välipiirin tasasuunnatun jännitteen matalampi potentiaali
EMC	Electromagnetic Compatibility; sähkömagneettinen yhteensopivuus
I2C	kaksisuuntainen sarjaväylä
IGBT	Insulated Gate Bipolar Transistor; eristehilatransistori
I/O	Input/Output; tulo/lähtö
Mikro-teholuokka	pieniä, nimellisteholtaan alle 4 kW, taajuusmuuttajia
MOSFET	Metal-Oxide-Semiconductor Field-Effect Transistor; metallioksidipuolijohdekanavatransistori
NTC	negatiivisella kulmakertoimella lämpötilaan reagoiva vastus
OEM	Original Equipment Manufacturer; alkuperäinen laitevalmistaja
PTC	positiivisella kulmakertoimella lämpötilaan reagoiva vastus
PWM	Pulse Width Modulation; pulssinleveysmodulaatio
RFI	Radio Frequency Interference, radiotaajuinen häiriö
ROM	Read Only Memory; lukumuisti; muisti, johon ei tehdä muutoksia normaali-käytön aikana
RS422	differentiaaliseen tiedonsiirtoon perustuva sarjaväylä

RS485	differentiaaliseen tiedonsiirtoon perustuva kaksisuuntainen sarjaväylä
UART	Universal Asynchronous Receiver Transmitter; lähettimenä ja vastaanottimena toimiva asynkroninen sarjaliitäntäpiiri
VSI	Voltage Source Inverter; jännitevälipiiritaajuusmuuttaja

1 JOHDANTO

Taajuusmuuttajat ovat yleisiä teollisuuden sähkökäytöissä. Sähkökäyttöjen hyvän hyötysuhteen tuomista energiansäästöistä on ollut etua erityisesti teollisuudessa, jossa energiantarve on suuri. Tulevaisuudessa pienitehoisten taajuusmuuttajien sovellukset yleistyvät ja näille markkinoille on kova kilpailu. Tämän takia nykyään pienien taajuusmuuttajien markkina-alue on houkutteleva ja ajankohtainen.

Pieniä, tehoiltaan alle 4,0 kW, taajuusmuuttajia kutsutaan mikrotaajuusmuuttajiksi. Näiltä laitteilta odotetaan pientä kokoa, yksinkertaista rakennetta ja edullista hintaa. Yleensä niiden moottorisäädölliset vaatimukset ovat vaatimattomat, ja taajuusmuuttajan perusominaisuudet usein riittävät.

Vaikka pienitehoiset taajuusmuuttajat ovat rakenteeltaan ja toiminnaltaan hyvin samankaltaisia suurempitehoisten laitteiden kanssa, niiden markkinat ovat selvästi erillään toisistaan. Pienitehoisten taajuusmuuttajien markkinoilla hallitsevat eri toimijat kuin suuritehoisten markkinoilla. Mikro-taajuusmuuttajamarkkinat ovat liikevaihdoltaan arviolta yli 2 miljardia dollaria ja kappalemääräisesti niitä myydään noin 8 miljoonaa vuosittain. Laitevalmistajia näillä markkinoilla on satoja, suuri osa laitteista myydään OEM-valmistajien kautta.

Tässä insinööriyössä vertaillaan usean eri mikro-taajuusmuuttajavalmistajan tuotteita. Valitut laitevalmistajat ovat Danfoss, Hitachi, KEB, Mitsubishi, Omron, Schneider ja Yaskawa. Kultakin valmistajalta on valittu yksi tai useampi laite vertailuun. Vertailussa keskitytään taajuusmuuttajien komponenttivalintoihin, teknisiin ratkaisuihin ja toteutuksiin. Työssä vertailtavat laitteet kuuluvat mikro-teholuokkaan.

Työn alussa käydään läpi taajuusmuuttajan yleisimmät käyttökohteet pienitehoisen taajuusmuuttajan kannalta. Tämän jälkeen selostetaan taajuusmuuttajan toiminta ja rakenne yleisellä tasolla.

Tavallisin taajuusmuuttajatopologia on jännitevälipiirillinen taajuusmuuttaja. Kaikki tässä työssä esiintyvät taajuusmuuttajat ovat jännitevälipiirillisiä ja hyödyntävät pulssinleveysmodulaatiota (PWM; *Pulse Width Modulation*) vaihtosuuntauksessa. Työssä keskitytään edellä mainittuihin taajuusmuuttajiin.

Työssä tutustutaan komponenttitasolla 21 taajuusmuuttajaan. Purkamisen vaiheet on dokumentoitu kuvin ja muistiinpanoin. Kustakin laitteesta on selvitetty sen pääkomponentit, mikropiirit ja toiminnalliset osat.

Työssä esitellään eri laitteisiin valitut pääkomponentit, vertaillaan ja analysoidaan toiminnallisten osien toteutusta sekä kirjataan laitteiden hyviä ja huonoja puolia. Työn eri vaiheista saatujen tietojen perusteella voidaan hahmottaa paremmin, mitä vaatimuksia uudelle tuotteelle voidaan asettaa ja vertailla tuotteita keskenään. Lopputuloksena saadaan tietoa eri tuotteiden

- hyvistä ja huonoista ominaisuuksista
- suorituskyvystä
- kustannuksista
- poikkeavista suunnitteluratkaisuista.

2 TAAJUUSMUUTTAJA

2.1 Taajuusmuuttajan toimintaperiaate

Taajuusmuuttaja on tehoelektronikkalaite, jota käytetään muuttamaan vaihtosähköverkon vakiotaajuinen sinimuotoinen jännite halutun taajuiseksi ja suuruiseksi sähkömoottorille syötettäväksi jännitteeksi. Taajuusmuuttajan avulla sähkömoottorin pyörimisnopeutta ja momenttia voidaan säätää portaattomasti halutun suuruiseksi. Taajuusmuuttajan ja sähkömoottorin yhdistelmää kutsutaan sähkömoottorikäyttöksi.

Tavallisin taajuusmuuttajatyyppe on jännitevälipiirillinen taajuusmuuttaja (VSI; *Voltage Source Inverter*). Muita taajuusmuuttajatoipologioita ovat tasavirtavälipiirillinen taajuusmuuttaja (CSI; *Current Source Inverter*) sekä välipiiritön eli suora taajuusmuuttaja. [1 s. 17 - 18; 2 s. 48 - 52.]

2.2 Taajuusmuuttajan käyttökohteet ja edut

Taajuusmuuttajaohjattu vaihtosähkömoottori on nykyaikainen ja taloudellinen tapa muuttaa sähköenergia mekaaniseksi energiaksi. Vaihtosähkökäytöllä voidaan säästää energia- ja investointikustannuksissa sekä parantaa prosessia.

Sähkökäytöstä on etua ennen kaikkea teollisuudessa suuren energiantarpeen takia. Nykyään ne ovat yleistymässä myös kotitalouskäytössä.

Taajuusmuuttajan etuina ovat

- energian säästö
- yksinkertainen rakenne
- pieni koko
- vähäinen huollontarve
- alhaiset kustannukset
- mahdollisuus prosessin tarkkaan ja nopeaan säätöön.

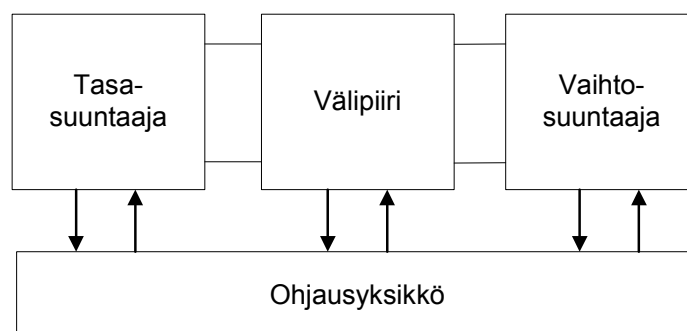
Taajuusmuuttajan kanssa käytetään usein oikosulkumoottoria sen kestävän ja yksinkertaisen rakenteen, vähäisen huollontarpeen sekä edullisen hintansa takia. Kestomagneettimoottorit taajuusmuuttajien kanssa ovat nykyään yleistymässä erityisesti pienissä teholuokissa.

Työssä käsiteltävien mikroluokan taajuusmuuttajan käyttökohteita ovat muun muassa

- puhaltimet
- pumput
- kuljettimet
- materiaalinkäsittely
- koneenrakennus. [3.]

2.3 Välipiiritajuusmuuttajan rakenne

Yksinkertaistettuna jännitevälipiirillinen taajuusmuuttaja koostuu tasasuuntaajasta, välipiiristä, vaihtosuuntaajasta ja näitä ohjaavasta ohjausyksiköstä (kuva 1).



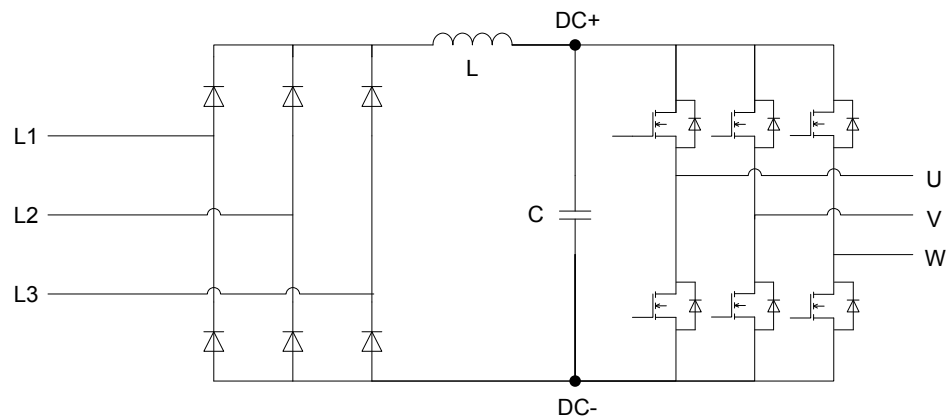
Kuva 1. Jännitevälipiirillisen taajuusmuuttajan periaatekytkentä

Taajuusmuuttajaa syöttävän sähköverkon vaihtojännite tasasuunnataan tasajännitteeksi kokoaaltotasasuuntaajalla. Tasasuuntaaja voi olla

ohjaamaton, puoliksi ohjattu tai täysin ohjattu riippuen sen toteutustavasta. Pelkillä diodeilla toteutettua tasasuuntaussiltaa ei voi ohjata. Diodeista ja tyristoreista koostuvaa siltaa kutsutaan puoliksi ohjatuksi suuntaajaksi. Tehotransistoreista tai vastarinnan kytketyistä tyristoreista koostuvaa siltaa kutsutaan täysin ohjatuksi sillaksi eli verkkovaihtosuuntaajaksi. Verkkovaihtosuuntaajalla saadaan sähkömoottorin pyörimisenergia syötettyä takaisin sähköverkkoon jarrutustilanteessa. Tasasuuntaussilta voi olla käytettävästä syöttöjännitteestä riippuen kolmi- tai yksivaiheinen.

Tasasuunnattu jännite ja virta suodatetaan välipiirissä. Välipiirilliset taajuusmuuttajat jaetaan kahteen osaan: jännite- ja virtavälipiirillisiin. Taajuusmuuttajia, joiden välipiiri koostuu LC-alipäästösuodattimesta tai pelkästään kapasitanssista, kutsutaan jännitevälipiirilliseksi (kuva 2). Virtavälipiirillisen taajuusmuuttajan välipiiri koostuu vain suuresta tasoituskuristimesta.

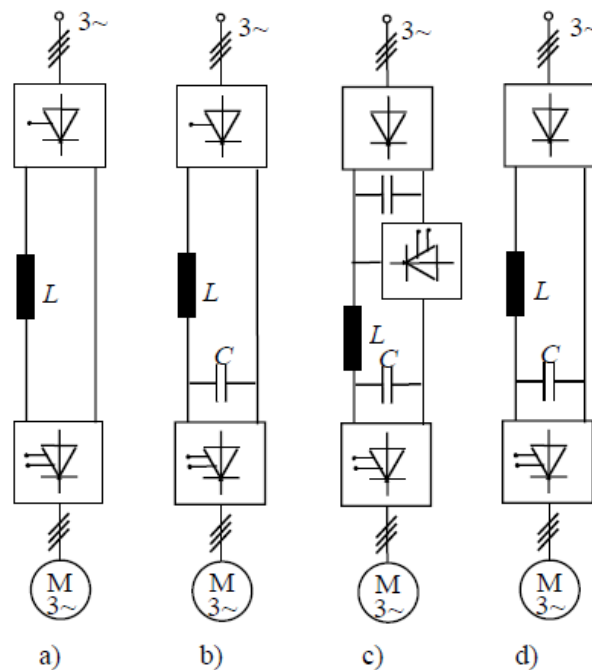
Vaihtosuuntaaja tekee välipiirin tasajännitteestä sähkömoottorin tarvitseman vaihtojännitteen. Vaihtosuuntaajan tehokytkimet on yleensä toteutettu IGB-transistoreilla. IGB-transistorin rinnalle tarvitaan lisäksi vastasuuntaan kytketty diodi johtamaan loisvirtaa.



Kuva 2. Kolmivaiheisen jännitevälipiirillisen PWM-taajuusmuuttajan pääpiirikaavio; kuvassa vasemmalta oikealle: syöttöverkon vaihejohtimet L1, L2 ja L3, tasasuuntaaja, välipiiri, IGB-transistoreilla ja vastaan kytketyillä diodeilla toteutettu vaihtosuuntaaja, moottorilähdön vaiheet U, V ja W

Lähtöjännitteen amplitudia säädetään joko välipiirin jännitettä muuttamalla tai säätämällä lähtöjännitteen muotoa pulssileveysmodulaatiota käyttäen. Välipiirin jännitettä säädettäessä joudutaan purkamaan ja lataamaan välipiirin suurikapasitanssisia kondensaattoreita halutun lähtöjännitteen aikaansaamiseksi, ja se on tämän vuoksi hidas säätötapa. (Kuva 3.)

PWM-taajuusmuuttajan vaihtosuuntaaja säättää välipiirin tasajännitteestä pulssijonon avulla moottorin jännitettä ja taajuutta (kuva 3 d). Pulssinleveysmodulaatiolla saadaan tehollisarvoltaan haluttua lähes sinimuotoista vaihtojännitettä. Useat nykyaikaiset taajuusmuuttajat ovat viimeiseksi mainittua tyyppiä, kuten myös kaikki tässä työssä vertailut laitteet. [1 s. 17 - 18; 2, s. 48 - 52; 4, s. 20 - 21.]



Kuva 3. Välipiirillisen taajuusmuuttajan topologiat: a) tasavirtavälipiiri, b) ohjattu tasajännite, c) tasajännitteen ohjaus katkojalla, d) PWM-taajuusmuuttaja [1, s. 18]

2.4 PWM-taajuusmuuttajan toiminnalliset osat

Taajuusmuuttajalaitteita tutkittaessa huomio kiinnitettiin PWM-taajuusmuuttajan toiminnallisia osia, joista tärkeimpiä ovat

- paneeli
- I/O-liitännät
- verkkosuodatin
- tasasuuntaaja
- vaihtosuuntaaja
- välipiiri
- latauspiiri
- virranmittaus
- mikroprosessori
- apujännitelähde
- jäähdytys.

3 TAAJUUSMUUTTAJIEN VERTAILU

3.1 Vertailtavien taajuusmuuttajien esittely

Vertailun taajuusmuuttajat ovat nimellistehoiltaan 0,75 - 4,0 kW. Laitteiden käyttöjännitteenä on joko yksivaiheinen 230 V:n tai kolmivaiheinen 400 V:n vaihtojännite. Laitteiden valinnassa on pyritty siihen, että vertailussa on kunkin valmistajan runkokoon pieni- ja suuritehoisimmat laitteet. Työhön on valittu suurimmat ja markkinoita johtavat valmistajat. (Ks. laitteiden pääpiirikaaviot, liite 1.)

0,75 kW:n teholuokka

Pienimmän teholuokan 0,75 kW:n laitteita on vertailussa 12 kappaletta kuu delta eri valmistajalta. Vertailuun on pyritty ottamaan samasta mallista sekä 230 V että 400 V käyttöjännitteiden versiot. Kuvaan 4 on koottu suurin osa vertailun tämän teholuokan taajuusmuuttajista.



Kuva 4. Vertailun 0,75 kW:n laitteita; ylärivillä: Hitachi X200 (400 V), Hitachi X200 (230 V), Mitsubishi FR-E740, Mitsubishi FR-D720S; alarivillä: Schneider Altivar 312, Schneider Altivar 12, KEB Combivert B6, Omron V1000, Danfoss MicroDrive FC51; Combivert B6, V1000 sekä MicroDrive FC51 -laitteiden 230 V:n ja 400 V:n mallit ovat samankokoisia

Suurin osa vertailun taajuusmuuttajista on 0,75 kW:n tehoisia. Työssä olevat tämän teholuokan laitteet on listattu taulukossa 1.

Taulukko 1. Vertailun 0,75 kW:n teholuokan laitteiden tiedot; suurin osa vertailun laitteista on tässä teholuokassa

Valmistaja	Malli	Tyyppi	Teho (kW)	Käyttöjännite (VAC)
Danfoss	VLT MicroDrive FC51	132F0018	0,75	400
Danfoss	VLT MicroDrive FC51	132F0003	0,75	230
Hitachi	X200	007HFEF	0,75	400
Hitachi	X200	007SFEF	0,75	230
KEB	Combivert B6	07B6B2A-6900	0,75	230
KEB	Combivert B6	07B6A2A-6900	0,75	230
Mitsubishi	FR-D700	D720S-042-EC	0,75	230
Mitsubishi	FR-E700	FR-E740-026-EC	0,75	400
Omron	V1000	VZA40P7BAA	0,75	400
Omron	V1000	VZAB0P7BAA	0,75	230
Schneider	Altivar 12	ATV12H075M2	0,75	230
Schneider	Altivar 312	ATV312H075M2	0,75	230

1,5 kW:n teholuokka

KEB Combivert B6 on ainoa 1,5 kW teholuokan taajuusmuuttaja. Taulukossa 2 on tämän laitteen tiedot.

Taulukko 2. Työssä ainoana 1,5 kW:n tehoisena laitteena ollut KEB Combivert B6:n tiedot

Valmistaja	Malli	Tyyppi	Teho (kW)	Käyttöjännite (VAC)
KEB	Combivert B6	09B6A3A-9900	1,5	400

Tämä laite valittiin vertailuun, koska se on fyysisesti samankokoinen kuin saman mallin 0,75 kW:n laite. Kuvassa 5 on 0,75 kW:n, 1,5 kW:n ja 4,0 kW:n laitteet vierekkäin.



Kuva 5. KEB Combivert B6 runkokoot: 0,75 kW:n, 1,5 kW:n ja 4,0 kW:n tehoiset mallit [5]

2,2 kW:n teholuokka

Toiseksi eniten on nimellisteholtaan 2,2 kW:n laitteita. Valmistajina tässä teholuokassa on Danfoss, Hitachi, Omron, Schneider ja Yaskawa, (taulukko 3).

Taulukko 3. Tiedot työn 2,2 kW teholuokan laitteet; laitevalmistajien pienen runkoon suuritehoisin laite on teholtaan usein 2,2 kW

Valmistaja	Malli	Tyyppi	Teho (kW)	Käyttöjännite (VAC)
Danfoss	VLT MicroDrive FC51	132F0022	2,2	400
Hitachi	X200	022HFEF	2,2	400
Omron	VS mini J7	CIMR-J7AZ42P2	2,2	400
Omron	V1000	VZA42P2BAA	2,2	400
Schneider	Altivar 12	ATV12HU22M2	2,2	230
YASKAWA	A1000	CIMR-AC4A0005FAA	2,2	400

Yaskawa A1000 on vertailun kookkain laite. Se eroaa käyttötarkoitukseltaan hieman muista laitteista; Yaskawa A1000 on tarkoitettu suorituskykyä vaativiin sovelluksiin. Kuvassa 6 ovat vertailun 2,2 kW:n laitteet.



Kuva 6. 2,2 kW:n taajuusmuuttajat; kuvassa vasemmalta oikealle: Omron V1000, Omron VS mini J7, Schneider Altivar 12 (230 V), Danfoss MicroDrive FC51, Hitachi X200 ja Yaskawa A1000

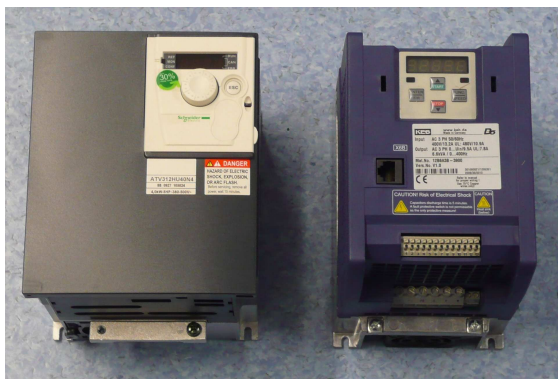
4,0 kW:n teholuokka

Suurin teholuokka on 4,0 kW. Tässä teholuokassa on vain kaksi laitetta, (taulukko 4).

Taulukko 4. Suuritehoisimpien 4,0 kW:n laitteiden yksityiskohtaiset tiedot

Valmistaja	Malli	Tyyppi	Teho (kW)	Käyttöjännite (VAC)
KEB	Combivert B6	12B6A3B-3900	4,0	400
Schneider	Altivar 312	ATV312HU40N4	4,0	400

Vertailun suuritehoisimmat laitteet ovat fyysisesti lähes samankokoisia. Kuvassa 7 on molemmat 4,0 kW:n laitteet.



Kuva 7. 4,0 kW:n taajuusmuuttajat; vasemmalla Schneider Altivar 312, vasemmalla KEB Combivert B6

3.2 Tehotiheyden ja jäähdytyksen vertailu

Asiakas odottaa taajuusmuuttajalta pientä kokoa ja suurta tehoa. Suuritehoinen laite tuottaa paljon häviöistä johtuvaa lämpöenergiaa, mikä pitää siirtää pois laitteesta, jottei se kuumene liikaa. Pienikokoinen laite voi siirtää lämpöä kuitenkin vain rajallisen määrän. Mitä väljemmin laite on koottu, sitä helpommin lämpöenergia siirtyy laitteesta ympäristöön.

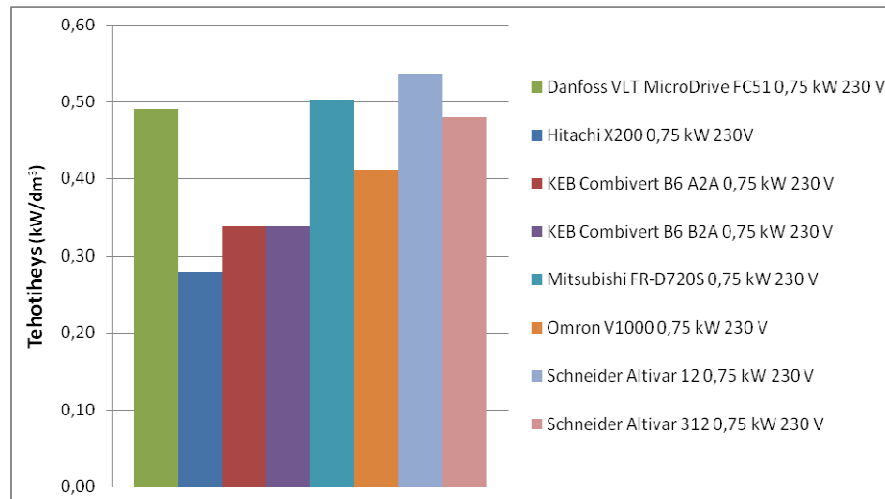
Taajuusmuuttaja tulee olla suunniteltu siten, että se on mahdollisimman pieni mutta kuitenkin riittävän suuri, jotta sen komponenttien lämpötilat eivät nouse liian korkeiksi käytössä. Lämpöenergian siirtymistä ympäristöön voidaan myös tehostaa käyttämällä jäähdytyksessä pakotettua ilmankiertoa esimerkiksi puhaltimen avulla. Puhallin kuitenkin nostaa laitteen kustannuksia ja se on taajuusmuuttajassa kestoaltaan suhteellisen lyhytikäinen osa.

Taajuusmuuttajia voidaan helposti vertailla niiden tehotiheyden perusteella eli kuinka suuri nimellinen ulostuloteho laitteesta saadaan suhteutettuna sen fyysiseen kokoon. Tällaisessa vertailussa taajuusmuuttajat on jaettu teholuokkiin nimellistehonsa mukaan. Kunkin teholuokan laitteet on lisäksi eroteltu käyttämänsä syöttöjännitteen mukaan. Saman teho- ja jänniteluokan laitteita verrataan keskenään.

Laitteissa on huomattavissa selkeitä valmistajakohtaisia eroja. Kolmivaiheisella 400 V:n syöttöjännitteellä toimivien laitteiden pienemmän tehotiheyden selittää suuremman jännitteen vuoksi tarvittavat suuremmat eristysvälit sekä kookkaammat jännitekestoaltaan suuremmat komponentit.

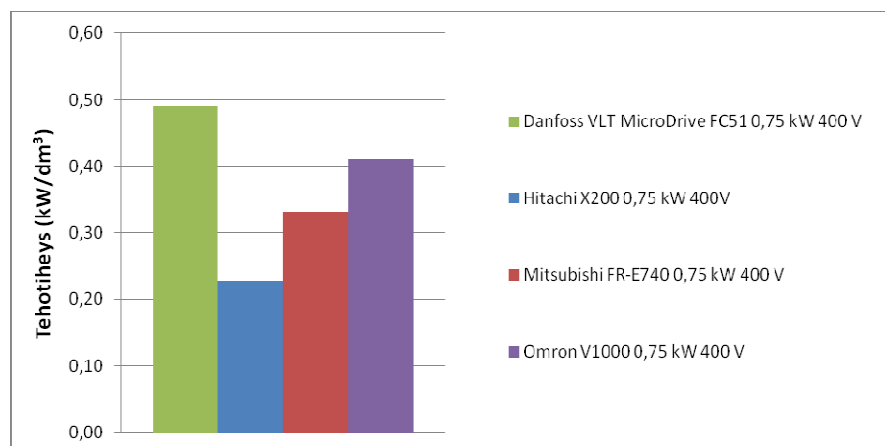
0,75 kW:n teholuokka

Pienimmän teholuokan 230 V syöttöjännitteen laitteiden tehotehiheydet ovat 0,28 - 0,54 kW/dm³. Danfoss VLT MircoDrive FC51, Mitsubishi FR-D720S, Schneider Altivar 12 sekä Schneider Altivar 312 ovat vertailun pienikokoisimpia laitteita. Näiden tehotehiheydet ovat noin 0,5 kW/dm³. Hitachi X200 on selkeästi muita kookkaampia, minkä takia sen tehotehiheys jää muita laitteita alhaisemmaksi, alle 0,3 kW/dm³. (Kuva 8.)



Kuva 8. Pylväsdiagrammi 0,75 kW nimellistehoisten 230 V:n syöttöjännitettä käyttävien laitteiden tehotehiheydestä; tehotehiheys ilmoitetaan nimellistehon (kW) suhteena laitteen tilavuuteen (dm³)

Kolmivaiheisen 400 V syöttöjännitteen laitteista Danfoss VLT MircoDrive FC51 ja Omron V1000 ovat pienimpiä. Hitachi X200 on myös tämän jännite- ja teholuokan vertailun suurin. (Kuva 9.)



Kuva 9. Pylväsdiagrammi 0,75 kW nimellistehoisten 400 V:n syöttöjännitettä käyttävien laitteiden tehotehiheydestä; tehotehiheys ilmoitetaan nimellistehon (kW) suhteena laitteen tilavuuteen (dm³)

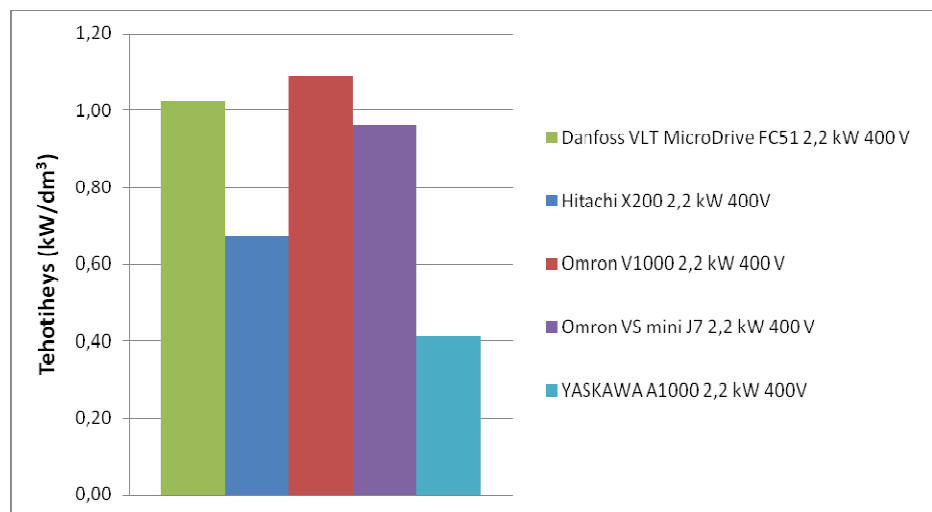
Danfoss on ainoa valmistaja, jonka laitteiden jäähdytyksessä käytetään pakotettua ilmankiertoa, mikä mahdollistaa laitteen pienemmän fyysisen koon. Pakotettu ilmankierto on toteutettu jäähdytyselmentin neliömäisellä aksiaalipuhaltimella, jonka sivun pituus on 40 mm. Muut valmistajat käyttävät luonnollista ilmankiertoa. Schneider on tehottiheydeltään Danfossin tasolla - ja jopa parempi - vaikka sen laitteissa ei ole puhaltimia.

1,5 kW:n teholuokka

KEB Combivert B6 on vertailun ainoa nimellistehoaltaan 1,5 kW laite, sen tehottiheys on 0,61 kW/dm³. Laitteessa on luonnollinen ilmankierto.

2,2 kW:n teholuokka

Danfoss, Omron sekä Schneider ovat pienimpiä 2,2 kW teholuokan 400 V:n laitteita. Omron V1000:n tehottiheys on suurin, 1,09 kW/dm³, muiden ovat noin 1,0 kW/dm³. Hitachi X200 sekä Yaskawa A1000 erottuvat muita laitteita selkeästi pienemmillä tehottiheyksillä. Hitachin tehottiheys on 0,67 kW/dm³ ja Yaskawan 0,41 kW/dm³. (Kuva 10.)



Kuva 10. Pylväsdiagrammi 2,2 kW nimellistehoisten 400 V:n syöttöjännitettä käyttävien laitteiden tehottiheydestä; tehottiheys ilmoitetaan nimellistehon (kW) suhteena laitteen tilavuuteen (dm³)

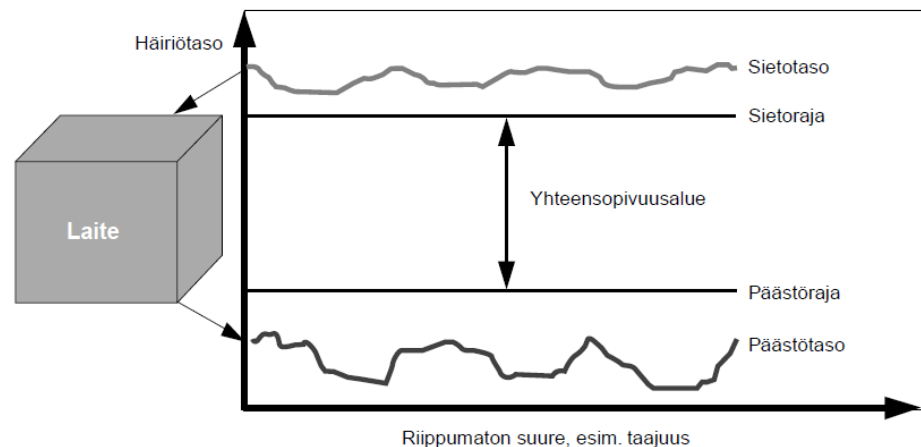
Yaskawa on ainoa tämän teholuokan laitteiden luonnollista ilmankiertoa käyttävä valmistaja. Yaskawa A1000:n pienen tehottiheyden selittää sen käyttämä jäähdytystapa sekä se, että laite on tarkoitettu hieman eri käyttöön kuin muut vertailun laitteet. Schneider Altivar 12 on tämän teholuokan ainoa 230 V käyttöjännitteen laite, sen tehottiheys on 0,93 kW/dm³.

4,0 kW:n teholuokka

KEB Combivert B6 ja Schneider Altivar 312 ovat vertailun ainoat 4,0 kW teholuokan laitteet, molemmat käyttävät 400 V:n syöttöjännitettä. Laitteet olivat fyysisesti lähes samankokoisia. KEB:n tehotehoisuus on $1,09 \text{ kW/dm}^3$ ja Schneiderin hieman pienempi $1,03 \text{ kW/dm}^3$. Molemmissa laitteissa on puhaltimella toteutettu pakotettu ilmankierto.

3.3 RFI-suodatus ja ylijännitesuojaus

Sähkölaitteiden pitää pystyä toimimaan samassa sähköverkossa muiden laitteiden kanssa, joten niiden tulee olla sähkömagneettisesti yhteensopivia (EMC; *Electromagnetic Compatibility*). (Kuva 11.)



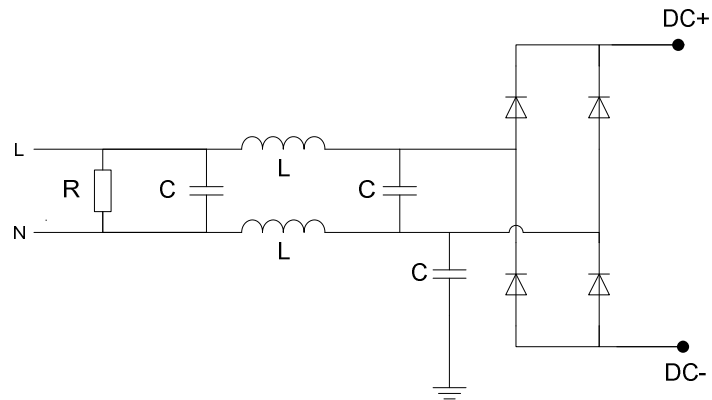
Kuva 11. Sähkölaitteen tulee sietää muista laitteista ja sähköverkosta tulevia häiriöitä; laite ei saa myöskään häiritä muiden laitteiden toimintaa; häiriöiden päästö- ja sietorajat ovat määritetty kyseessä olevaa laitetta koskevissa standardeissa [6, s. 8]

Taajuusmuuttajan tulee sietää pien- ja suurtaajuisia häiriöitä. Yleisimpiä pientaajuisia häiriöitä ovat muun muassa verkkojännitteen epäsymmetria ja yliaallot. Suurtaajuisia eli radiotaajuisia häiriöitä (RFI; *Radio Frequency Interference*) ovat esimerkiksi transientit, elektrostaattiset purkaukset sekä sähkömagneettiset kentät. Taajuusmuuttaja aiheuttaa suurtaajuisia häiriöitä tehopolijohteiden nopeiden kytkentäilmiöiden takia. Taajuusmuuttajan aiheuttamista pientaajuisista häiriöistä merkittävin on verkon harmoniset yliaallot.

Taajuusmuuttajien EMC-vaatimukset ovat määritelty nopeussäädettyjen käyttöjen standardissa SFS-EN 61800-3. Niiden tulee lisäksi täyttää sähköverkon harmonisia yliaalloja koskevat standardit. Pieniä taajuusmuuttajia,

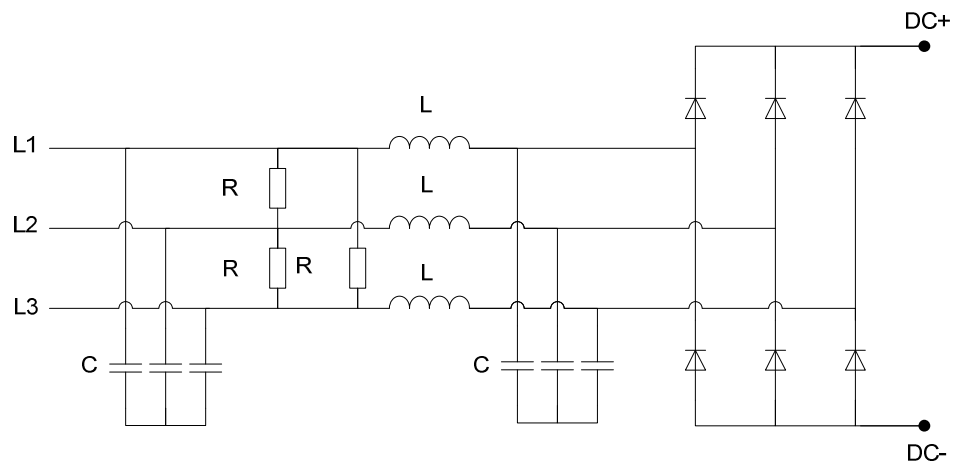
joiden syöttövaiheen virta on alle 16 A, koskee standardi IEC/EN 61000-3-2. [6, s. 6.]

Radiotaajuisia häiriöitä vaimennetaan taajuusmuuttajassa yleensä vaiheiden- sekä vaiheiden ja maan -välisillä kondensaattoreilla ja tulovaiheiden kuristimilla. Esimerkki yksivaiheisella syötöllä toimivan laitteen RFI-suodatuksesta (kuva 12).



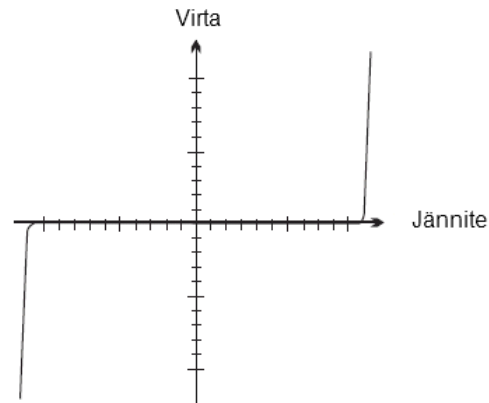
Kuva 12. Perusteellinen yksivaihesyötöllä toimivan taajuusmuuttajan RFI-suodatuksen toteutus

Esimerkki kolmivaiheisella syöttöjännitteellä toimivan laitteen RFI-suodatuksesta. Näissä laitteissa syöttövaiheet ovat usein kytketty tähteen suodatin-kondensaattorien kautta. (Kuva 13.)



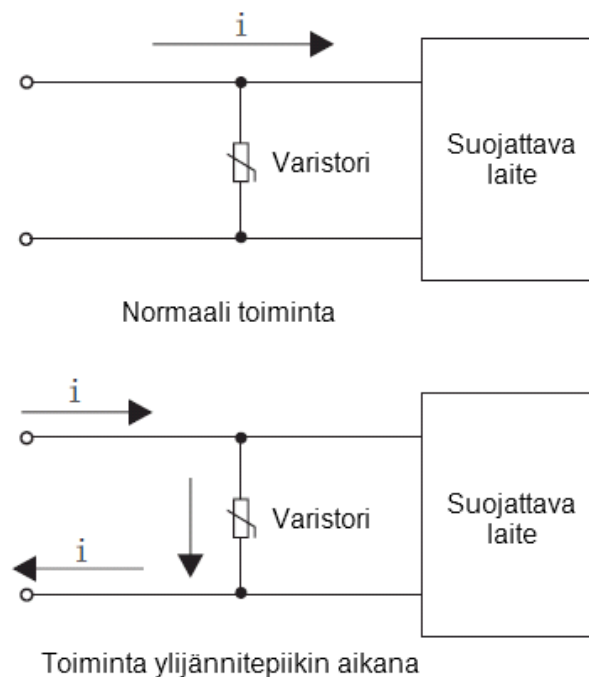
Kuva 13. Perusteellinen kolmivaihesyötöllä toimivan taajuusmuuttajan RFI-suodatuksen toteutus

Ylijännitepiikkejä vaimennetaan syöttövaiheiden välisillä varistoreilla. Varistori on epälineaarinen vastus, jonka resistanssi muuttuu sen napojen yli olevan jännitteen mukaan. (Kuva 14.)



Kuva 14. Tyypillinen varistorin jännite/virta-käyttäytyminen; virta varistorin läpi kasvaa nopeasti, kun sen yli oleva jännite ylittää komponentille ominaisen rajan [7, s. 1]

Kun varistori on mitoitettu oikein ja laitteen syöttöjännite on normaaleissa rajoissa, varistorin läpi ei käytännössä kulje virtaa. Kun jännite ylittää komponentille ominaisen murtojännitetason, sen resistanssi romahtaa äkillisesti ja oikosulkee häiriövirran takaisin paluuvirtajohtimeen. (Kuva 15.)

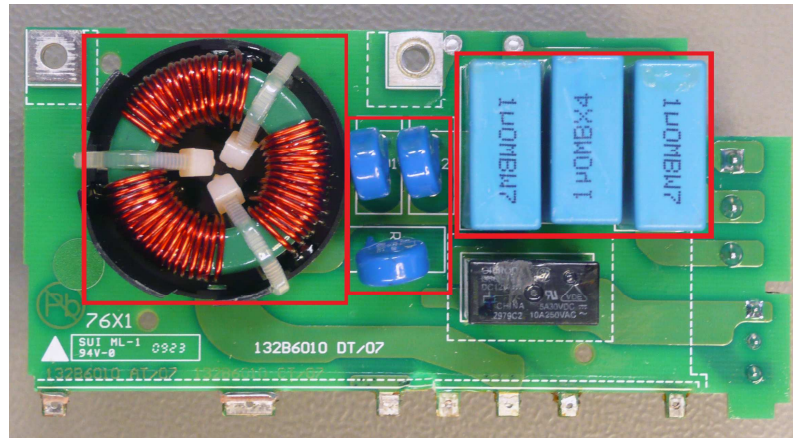


Kuva 15. Varistori suojaa laitetta ylijännitteeltä oikosulkemalla häiriövirran paluuvirtajohtimeen [7, s. 2]

Varistori on yksinkertainen ja halpa suoja ylijännitepiikkejä vastaan. Varistori kestää kuitenkin vain rajallisen energiamäärän, eikä se sen takia suojaa kuin hetkellisiltä ylijännitepiikeiltä. Sen ominaisuudet myös heikkenevät toistuvien ylijännitepiikkien myötä.

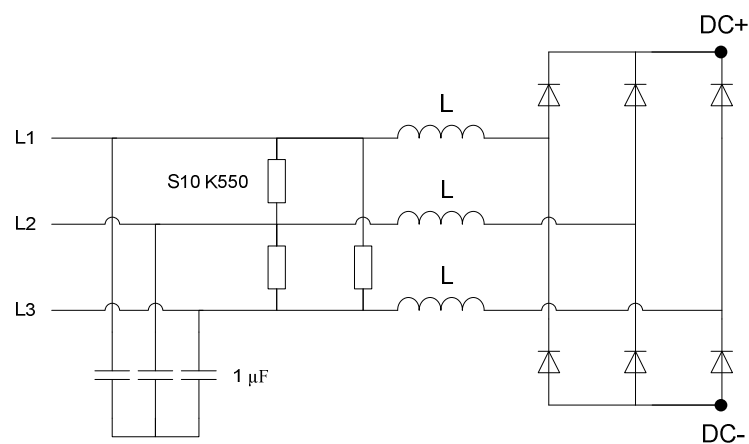
RFI-suodatuksen toteutukset

Kaikki valmistajat Mitsubishia, Omronia ja Yaskawaa lukuun ottamatta käyttävät rengassydämelle käämittyjä tulovaiheiden kuristimia sekä vaiheiden välisiä kondensaattoreita radiotaajuisten häiriöiden vaimentamiseen. Mitsubishiin, Omronin ja Yaskawan laitteissa on ainoastaan ylijännitesuojauks. (Kuva 16.)



Kuva 16. Danfoss VLT MicroDrive FC51 (2,2 kW 400 V) -laitteen erillinen kaksikerroksinen piirikortti syöttövaiheen tulojännitteen ja -virran suodatusta varten; RFI-suodatuksen komponentit: vaiheiden väliset muovikalvokondensaattorit (oikealla) sekä kookas yhteiselle rengassydämelle käämitty tulovaiheiden kuristin (vasemmalla); ylijännitesuojaus toteutettu vaiheiden välisillä varistoreilla (keskellä)

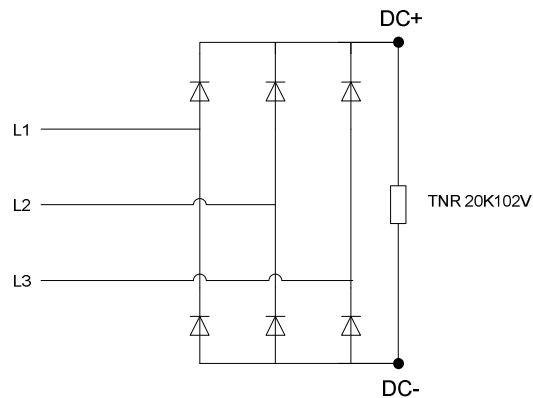
Danfoss VLT MicroDrive FC51:ssä (2,2 kW 400 V) on tyypillinen tulojännitteen suodatus, joka on toteutettu tulovaiheiden välisillä $1 \mu\text{F}$:n kondensaattoreilla ja tulovaiheiden kuristimilla. Ylijännitettä vastaan laitetta suojaavat vaiheiden väliset Epcos S10 K550 -varistorit. (Kuva 17.)



Kuva 17. Kolmivaiheisen Danfoss VLT MicroDrive FC51 (0,75 kW 400 V) RFI-suodatus; ennen tulokuristinta tulovaiheiden välillä on $1 \mu\text{F}$:n suodatuskondensaattorit sekä ylijännitteiltä suojaavat Epcos S10 K 550 varistorit

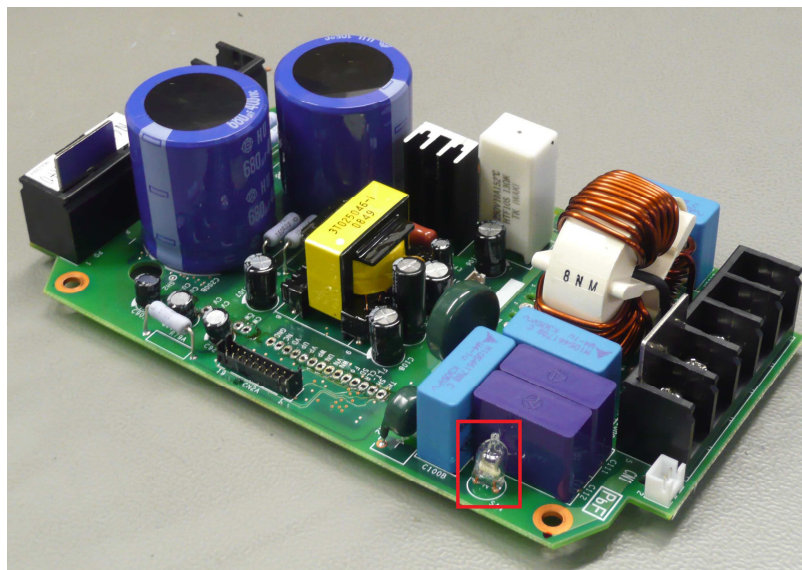
Ylijännitesuojauksen toteutukset

Vertailun laitteiden ylijännitesuojauksena ovat pääsääntöisesti tulovaiheiden väliset varistorit, mutta poikkeaviakin toteutuksia on. Hitachi X200 sekä Mitsubishi FR-E740 ja FR-D720S -laitteissa ylijännitteeltä suojaava varistori on sijoitettu välipiiriin (kuva 18). Schneider Altivar 12- sekä Altivar 312 -laitteissa ei ole lainkaan ylijännitteeltä suojaavia komponentteja.

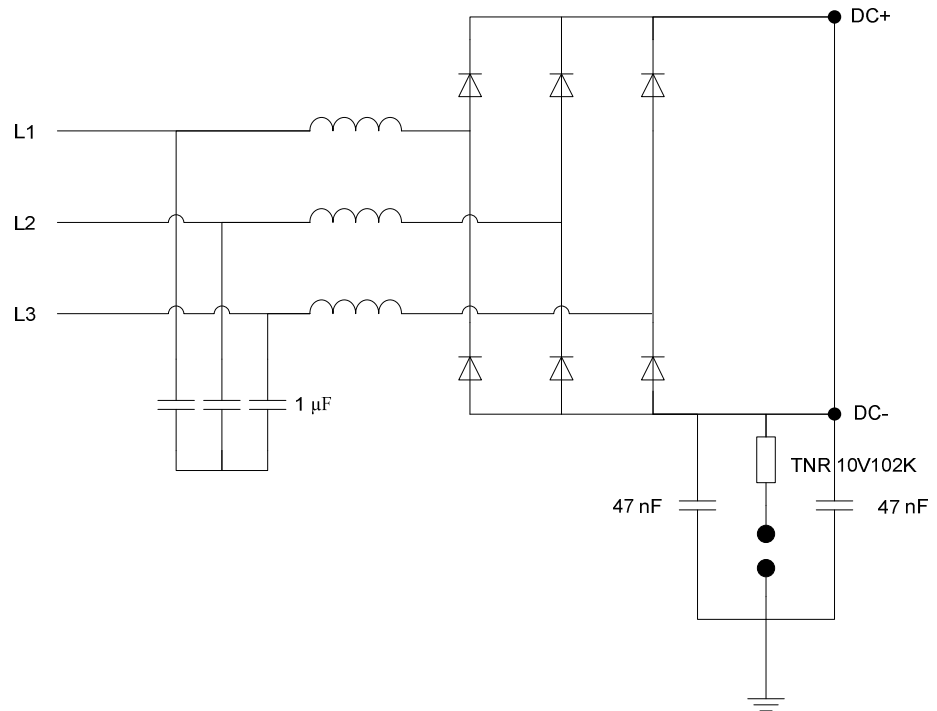


Kuva 18. Mitsubishi FR-E740 (0,75 kW 400 V) -laitteen tulon piirikaavio; laitteessa ei ole suodatuskomponentteja, ylijännitesuojaus toteutettu ainoastaan välipiirissä varistorilla

Hitachi X200 -laitteiden erikoisena ratkaisuna oli DC - kiskon yhdistäminen nollapotentiaaliin varistorin ja kaasupurkausputken sarjakytkennän kautta (kuvat 19 ja 20).



Kuva 19. Hitachi X200 (2,2 kW 400 V) piirikortti; kuvan oikeassa alalaidassa RFI-suodatuksen komponentit: varistorit (vihreät), kondensaattorit (siniset), tulokuristin sekä kuvassa alanurkassa kaasupurkausputki (rajattu punaisella), joka on liitetty maadoituspisteeseen

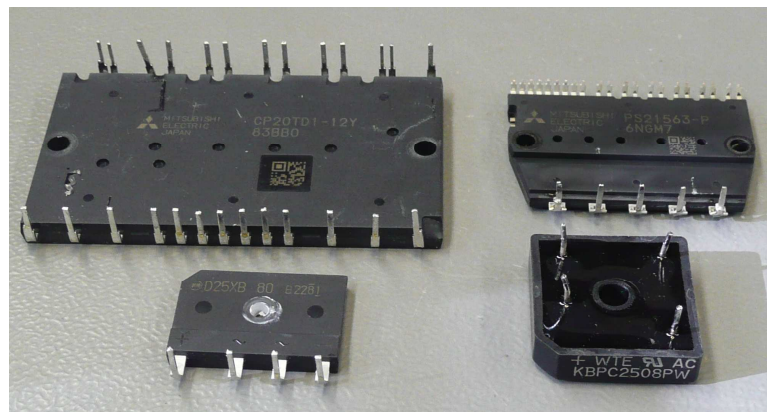


Kuva 20. Hitachi X200 (0,75 kW 400 V) RFI-suodatuksen ja ylijännitesuojauksen piirikaavio; tulojännitettä suodatetaan kondensaattoreilla ja kuristimilla, ylijännitettä vastaan suojaavat varistori ja kaasupurkausputki DC - :sta maadoituspisteeseen

3.4 Vaihto- ja tasasuuntaussillat

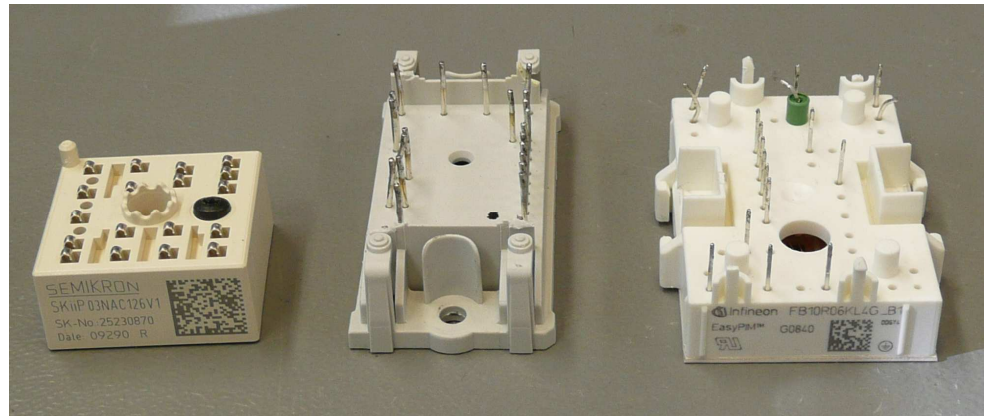
Taajuusmuuttajissa vaihto- ja tasasuuntaussillat toteutetaan erillisillä komponenteilla, yhden täyden vaihto- tai tasasuuntaussillan muodostavilla piireillä tai kaikki tehovuolihoitteet sisältävillä moduuleilla.

KEB Combivert B6 A2A, KEB Combivert B6 B2A, Omron V1000 (0,75 kW 230 V) sekä Schneider Altivar 12 (0,75 kW 230 V) -laitteissa käytetään erillisiä vaihto- ja tasasuuntauspiirejä (kuva 21).



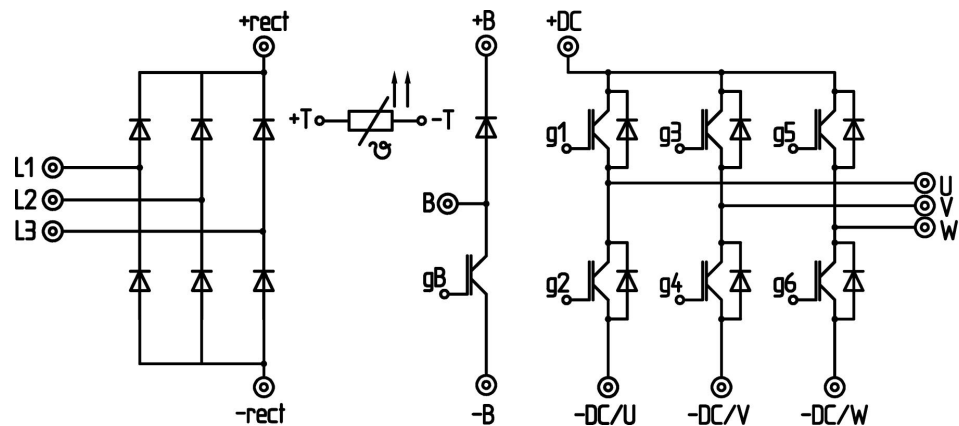
Kuva 21. Vasemmalla Omron V1000 (0,75 kW 230 V) ja oikealla KEB Combivert B6 A2A tehovuolihoitteet; ylärivillä vaihto- ja alarivillä tasasuuntaajat

Muissa laitteissa vaihto- ja tasasuuntaaja ovat samassa moduulissa (kuva 22). (Ks. laitteessa käytetyt suuntaajat, liite 2.)



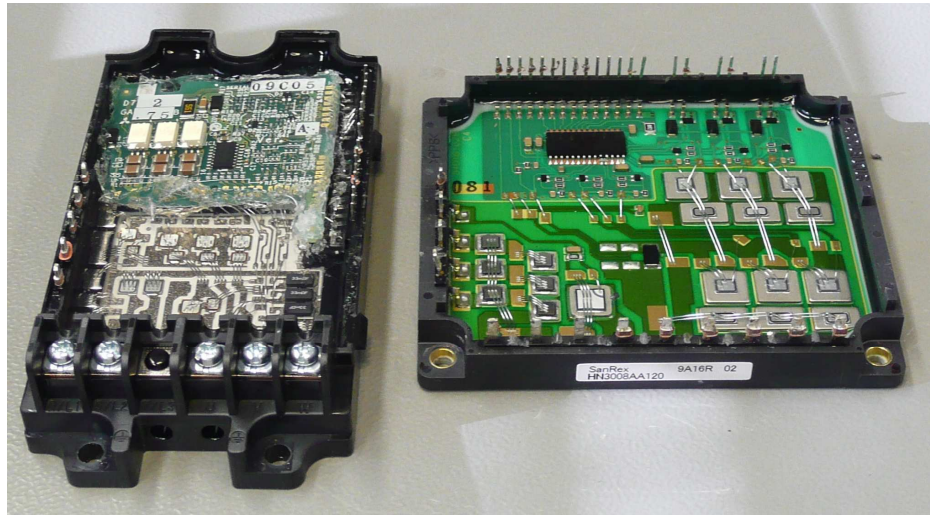
Kuva 22. Suuntaajamoduulit; kuvassa vasemmalta oikealle: Semikron SKiiP 03NAC126V1 (Danfoss VLT MircoDrive FC51 0,75 kW 400 V), Vincotech V23990 P540-A-14 (KEB Combivert B6 A3A) ja Infineon FB10R06KL4G_B1 (Schneider Altivar 312 0,75 kW 230 V)

Suurimpaan osaan vertailun laitteiden suuntaajamoduuleista on integroitu lämpötilanmittaus PTC- tai NTC-vastuksella. Joissain moduuleissa on integroituna myös välipiirin jarrukatkoja. (Kuva 23.)



Kuva 23. Danfoss VLT MircoDrive FC51 (2,2 kW 400 V) -laitteen käyttämän Semikron 12NAB126V1 IGBT-moduulin piirikaavio; vasemmalla syöttöverkko sekä tasasuuntaaja; keskellä lämpötilan mittavastus ja välipiirin katkoja; oikealla vaihtosuuntaaja sekä moottorilähtö [8, s. 4]

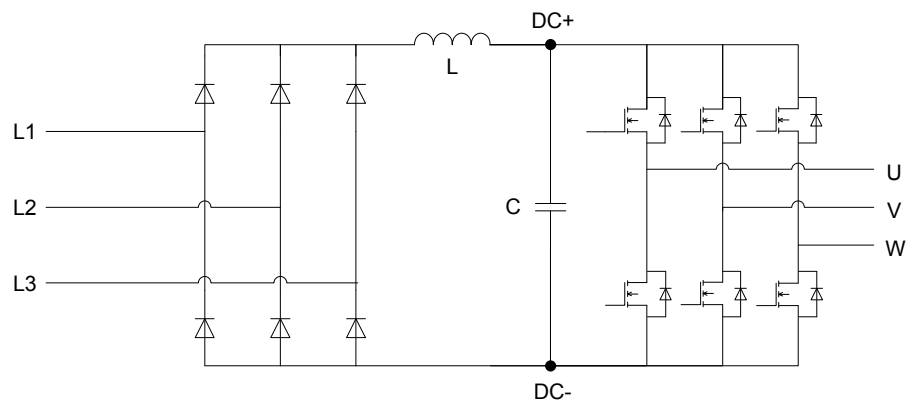
Mitsubishin sekä Hitachin laitteissa on selkeästi pisimmälle integroidut IGBT-moduulit (kuva 24). Kyseisten valmistajien moduulit sisältävät IGBT-transistoreiden hilojen ohjauselektroniiikan ja mittauselektroniiikan. Hitachin moduulissa on lisäksi latausvastuksen oikosulkeva tehotransistori. Mitsubishi FR-E740:n IGBT-moduuliin on integroitu myös mikroprosessori.



Kuva 24. Mitsubishi FR-D720S (vasemmalla) ja Hitachi X200 (0,75 kW 400 V) (oikealla) -laitteiden käyttämät suuntaajamoduulit; moduuleihin integroitu tasa- ja vaihtosuuntaajat sekä ohjaus- ja mittauselektronikkaa

3.5 Jännitevälipiiri

Jännitevälipiirillisissä taajuusmuuttajissa välipiiri muodostuu jännitettä tasavasta kapasitanssista joka on rinnan tasasuuntaajan kanssa. Tasasuuntaajan ja välipiirin kapasitanssin välissä voi olla lisäksi virtaa tasoittava induktanssi. (Kuva 25.)



Kuva 25. Jännitevälipiiritajuusmuuttajan pääpiirikaavio. Induktanssi ja kapasitanssi välipiirissä

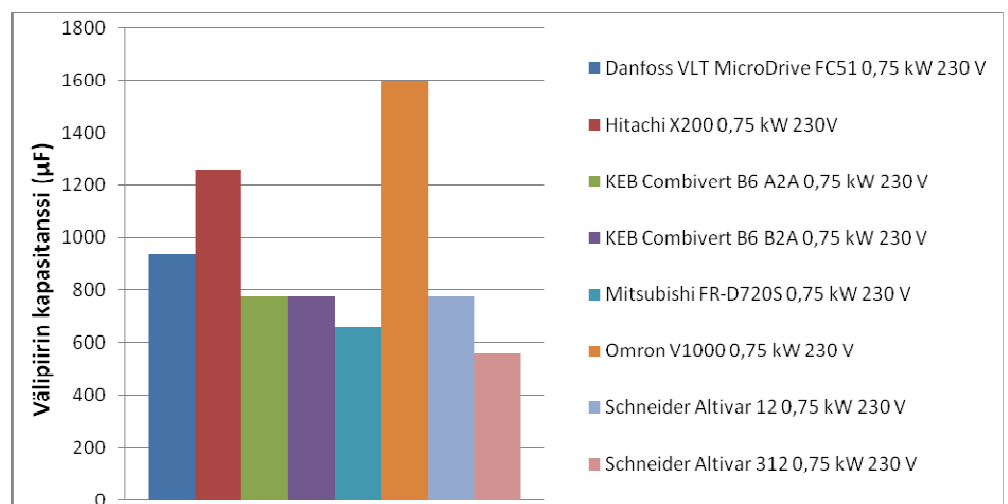
Tasasuuntaajan jälkeinen induktanssi eli kuristin tasoittaa taajuusmuuttajan verkosta ottamaa virtaa. Kuristin on pienissä taajuusmuuttajissa usein lisäoptio, tai se jätetään kokonaan pois. Tässä työssä käsitellyissä laitteissa ei ollut välipiirin kuristimia. Hitachi X200, Mitsubishi FR-E740-, Mitsubishi FR-D720S-, Omron Vsmini J7-, Omron V1000- sekä Yaskawa A1000 -laitteisiin oli mahdollisuus kytkeä erillinen ulkoinen kuristin.

Välipiirin kapasitanssi muodostuu yleensä elektrolyyttikondensaattoreista, joiden muodostama kapasitanssi on suuri. Mitä suurempi välipiirin kapasitanssi on, sitä vakaampi on välipiirin jännite. Mitä vakaampi tasajännite välipiirissä on, sitä helpompi taajuusmuuttajan on säätää ulostulojännitettä. Lisäksi tulee ottaa huomioon, että kolmivaiheisella syöttöjännitteellä toimivan laitteen välipiirin jännite on huomattavasti vakaampaa yksivaiheisella syötöllä toimivaan laitteeseen verrattuna. [4, s. 25 - 32.]

Työn taajuusmuuttajien välipiirien kapasitansseja vertaillaan teholuokittain. Saman teholuokan laitteet on lisäksi eroteltu käyttämänsä syöttöjännitteen mukaan. Välipiirien kapasitanssien faradimäärien vertailu on käytännönläheisin vertailutapa suunnittelua ja mitoitusta ajatellen. Työssä vertailtujen laitteiden välipiirien nimelliset kapasitanssit olivat 95 - 1 890 μF .

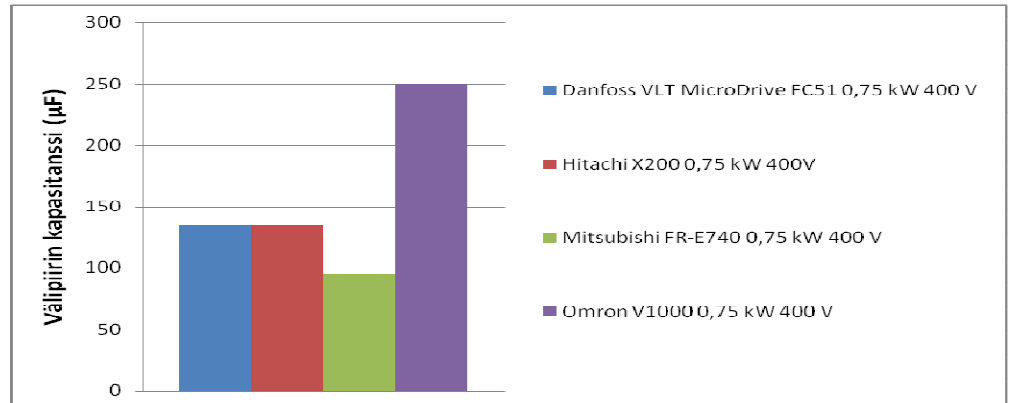
0,75 kW:n teholuokka

Pienimmän 0,75 kW teholuokan laitteiden välipiirien kapasitanssit ovat 230 V syöttöjännitteen laitteissa 560 - 1 600 μF . Yksivaiheisella 230 V:n syötöllä toimivista laitteista Omron V1000:ssa, Hitachi X200:ssa ja Danfoss VLT MicroDrive FC51:ssä ovat selkeästi suurikapasitanssisimmat, 1 600 μF :n, 1 260 μF :n ja 940 μF :n välipiirit. Muiden laitteiden välipiirien kapasitanssiarvot jäävät alle 800 μF :n. Pienin, 560 μF :n, välipiiri on Schneider Altivar 312:ssa. (Kuva 26.)



Kuva 26. Yksivaiheisella 230 V:n syöttöjännitteellä toimivien 0,75 kW laitteiden välipiirien kapasitanssimäärien vertailu

Kolmivaiheisella 400 V:n syöttöjännitteellä toimivien 0,75 kW laitteiden välipiirien kapasitanssit ovat huomattavasti pienempiä, 95 - 250 μF . Omron V1000:n välipiirin kapasitanssi on 250 μF . Muissa laitteissa on 95 - 135 μF :n välipiiri. (Kuva 27.)



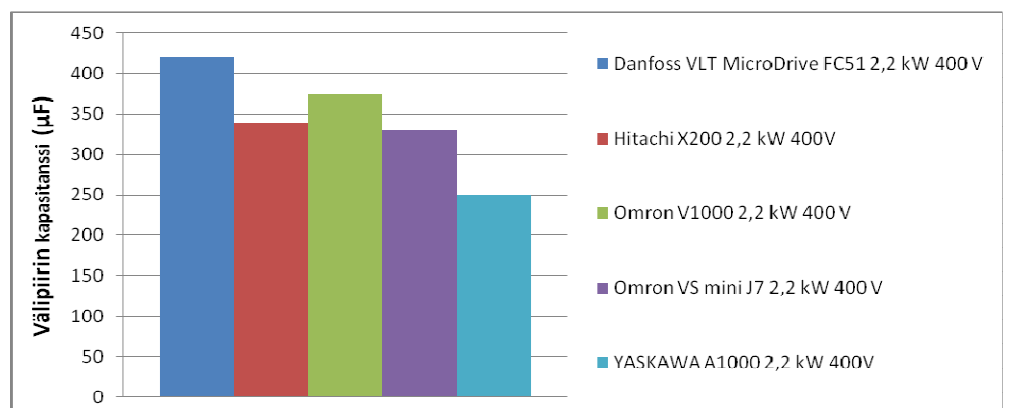
Kuva 27. Kolmivaiheisella 400 V:n syöttöjännitteellä toimivien 0,75 kW laitteiden välipiirien kapasitanssimäärien vertailu

1,5 kW:n teholuokka

KEB Combivert B6 on tämän teholuokan ainoa laite, sen välipiirin kapasitanssi oli 195 μF . Laite käyttää kolmivaiheista 400 V:n syöttöjännitettä. Tässä laitteessa on samat elektrolyyttikondensaattorit kuin pienemmässä 0,75 kW:n tehoisessa mallissa. Pienitehoisimmassa mallissa nämä kondensaattorit ovat rinnan, kun suurempitehoisessa ne ovat sarjassa.

2,2 kW:n teholuokka

Kolmivaiheisista 400 V syötön laitteista pienin 250 μF :n välipiiri on Yaskawa A1000 -laitteessa. Muiden laitteiden välipiirit ovat 340 - 420 μF . (Kuva 28.)



Kuva 28. Kolmivaiheisella 400 V:n syöttöjännitteellä toimivien 2,2 kW laitteiden välipiirien kapasitanssimäärien vertailu

Schneider Altivar 12 on ainoa 2,2 kW:n tehoinen laite, joka toimii yksivaiheisella 230 V:n syöttöjännitteellä. Tämän takia siinä on selkeästi muita suurempikapazitanssinen 1 890 μF :n välipiiri.

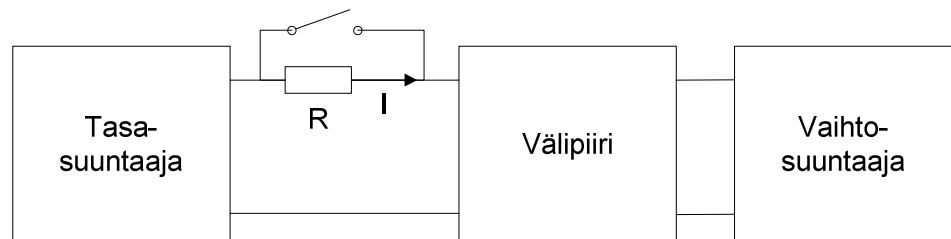
4,0 kW:n teholuokka

Suuritehoisimmista 4,0 kW:n laitteista Schneider Altivar 312 välipiirin kapasitanssi on 550 μF ja KEB Combivert B6:n 390 μF . Molemmat käyttävät kolmivaiheista 400 V:n syöttöjännitettä.

Vertailun suuritehoisin KEB Combivert B6 käyttää samoja kondensaattoreita kuin saman mallin 1,5 kW:n tehoinen laite. Suuritehoisessa mallissa kondensaattoreita on kuitenkin kaksinkertainen määrä. Suurempitehoisessa laitteessa kahden kondensaattorin sarjakytkentöjä on kaksi rinnakkain.

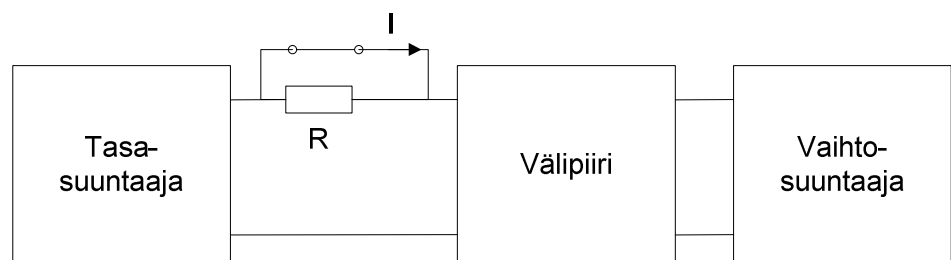
3.6 Latauspiiri

Taajuusmuuttajan jännitevälipiiri alkaa latautua, kun se kytketään sähköverkkoon. Virran rajoittamiseksi tasasuunnattu jännite ladataan välipiirin kondensaattoreihin latausvastuksen kautta (kuva 29).



Kuva 29. Välipiiri latautuu latausreleen ollessa auki; virta menee latausvastuksen kautta.

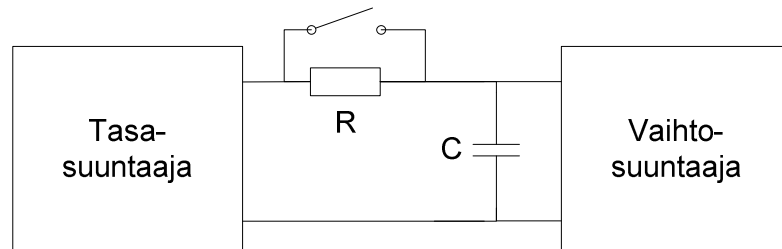
Välipiirin jännitteen noustua lähelle tasasuunnatun jännitteen tehollisarvoa latausvastus oikosuljetaan, ja laite voi toimia normaalisti (kuva 30).



Kuva 30. Välipiiri on latautunut ja latausvastus oikosuljettu; virta menee latausreleen läpi

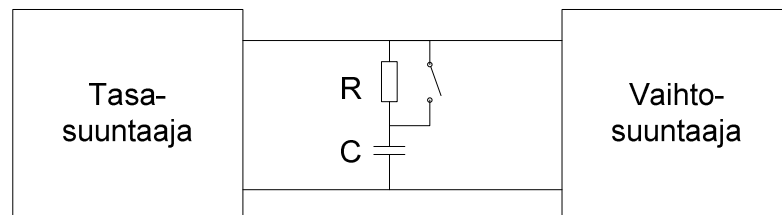
Latauspiirien toteutukset vertailun laitteissa

Vertailun latauspiirin toteutukset vaihtelevat mallikohtaisesti. Lähes kaikissa laitteissa latauspiiri on sijoitettu laitteissa heti tasasuuntaajan jälkeen sen positiiviseen ulostuloon (kuva 31).



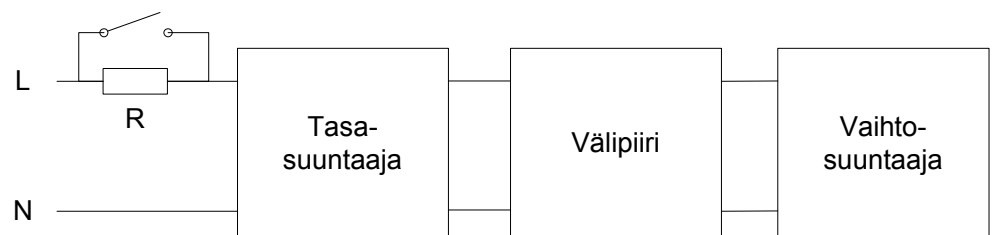
Kuva 31. Taajuusmuuttajan pääpiirikaavio; latauspiiri sijoitettu tasasuuntaussillan jälkeen

Danfoss VLT MircoDrive FC51- sekä Yaskawa A1000 -laitteissa latauspiiri on välipiirin kapasitanssin kanssa sarjassa (kuva 32).



Kuva 32. Taajuusmuuttajan pääpiirikaavio; latauspiiri sijoitettu välipiirin kapasitanssin kanssa sarjaan

Schneider Altivar 12:ssa (2,2 kW 230 V) latauspiiri on tulovaiheeseen ennen tasasuuntaajaa (kuva 33).



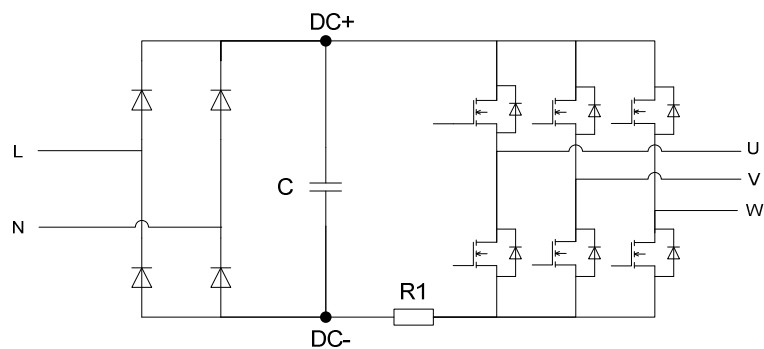
Kuva 33. Taajuusmuuttajan pääpiirikaavio; latauspiiri sijoitettu tulovaiheeseen

Latausvastuksina Danfoss VLT MircoDrive FC51-, KEB Combivert B6-, Omron V1000- ja Omron VS mini J7 -laitteissa on NTC-vastukset, muissa laitteissa käytetään tehovastuksia.

Hitachi X200 -laitteissa latauspiirin kytkimenä käytetään IGBT-moduulin integroitua tehopuolijohdettä. Kaikissa muissa laitteissa latausvastuksen oikosulkemiseen käytetään relettä.

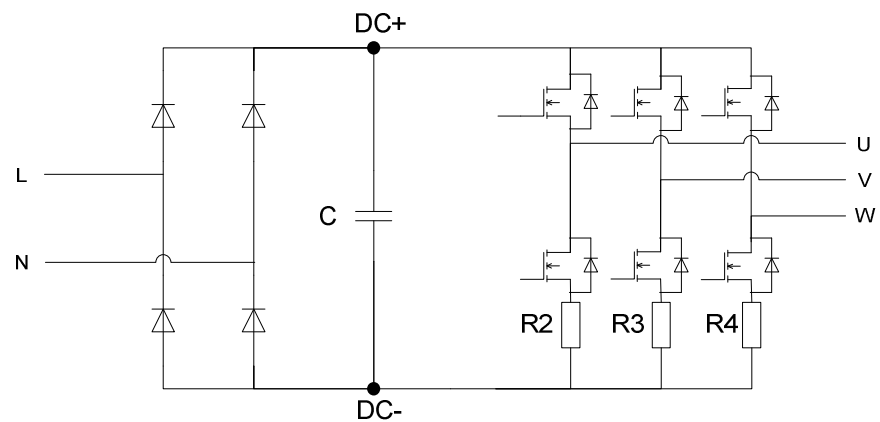
3.7 Virranmittaus

Moottorille menevä lähtövirta on oleellinen takaisinkytkentätieto toimilaitteesta. Vertailluissa laitteissa lähtövirranmittaus on toteutettu joko virtamuuntimilla tai mittavastuksilla. Virta mitataan yhteisesti välipiirin DC - -kiskosta (kuva 34) tai lähtövaiheiden alahaaroista (kuva 35). Mitta- eli *shunt*-vastuksella ainoastaan DC - -virran mittaus on halvin ja yksinkertaisin, mutta epätarkin vaihtoehto.



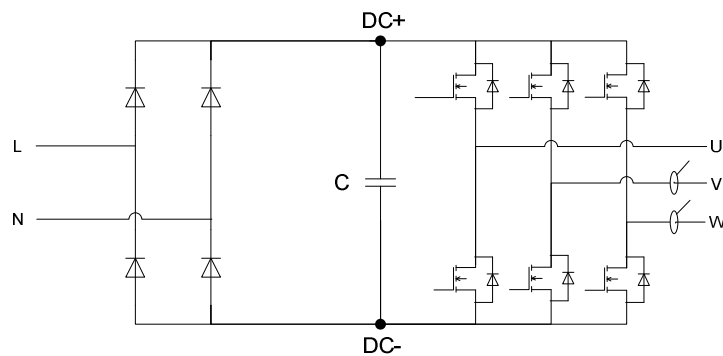
Kuva 34. Yksivaiheisen taajuusmuuttajan pääpiirikaavio; virranmittaus toteutettu *shunt*-vastuksella R1, vastus sijoitettu välipiirin DC - -kiskoon

Kaikkien kolmen lähtövaiheen virtojen mittaaminen ei ole välttämätöntä, kun halutaan tietää vaihevirrat. Riittää, että mittaa virrat kahdesta vaiheesta; kolmannen vaiheen virran saa laskettua kahden muun virran avulla.



Kuva 35. Yksivaiheisen taajuusmuuttajan pääpiirikaavio; virranmittaus *shunt*-vastuksilla R2, R3 ja R4 jokaisen lähtövaiheen alahaarasta

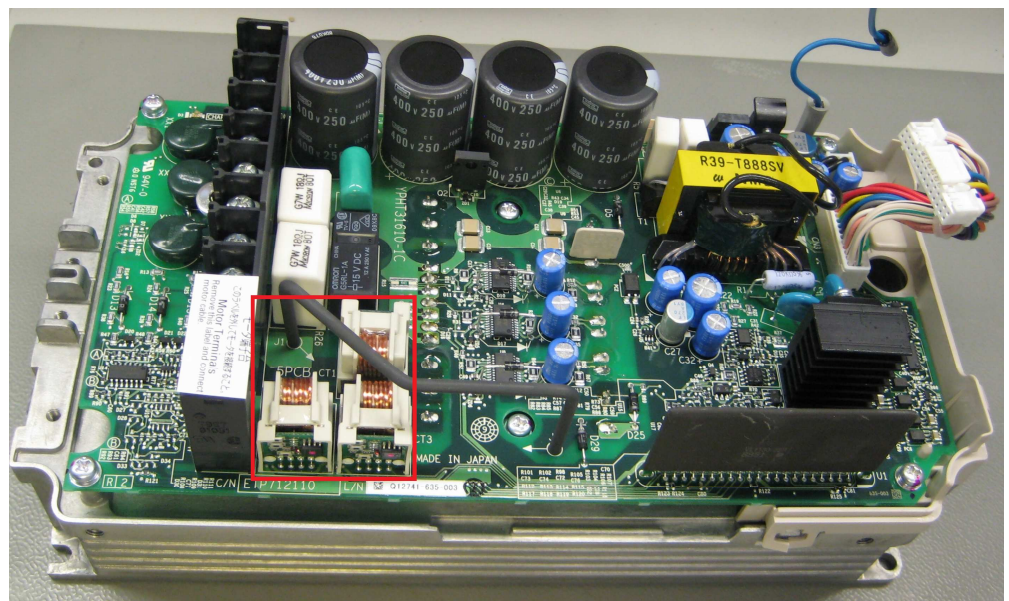
Tarkin mittaustapa on lähtövaiheiden virtojen mittaus virtamuuntimilla, mutta se on myös kallein sekä monimutkaisin (kuva 36).



Kuva 36. Yksivaiheisen taajuusmuuttajan pääpiirikaavio; virranmittaus toteutettu virtamuuntimilla V- ja W-lähtövaiheista

Kaikki muut laitteet käyttävät yksinkertaisinta virranmittausta yhdellä *shunt*-vastuksella DC -:sta (Kuva 34) paitsi KEB Combivert B6, Omron V1000, Omron VS mini J7, Schneider Altivar 312 ja Yaskawa A1000.

KEB Combivert B6-, Omron V1000- sekä Schneider Altivar 312 (0,75 kW) -laitteet mittaavat lähtövirran shunt-vastuksilla lähtövaiheiden alahaaroista (kuva 35). Schneider 312 (4,0 kW) sekä Yaskawa A1000 käyttävät virtamuuntimia, Schneider mittaa virran kahdesta vaiheesta, kun taas Yaskawa kaikista kolmesta (kuva 37).



Kuva 37. Yaskawa A1000 laitekotelo avattuna; virranmittauksen virtamuuntimet (3 kappaletta, rajattu punaisella) laitteen lähtövaiheiden vieressä

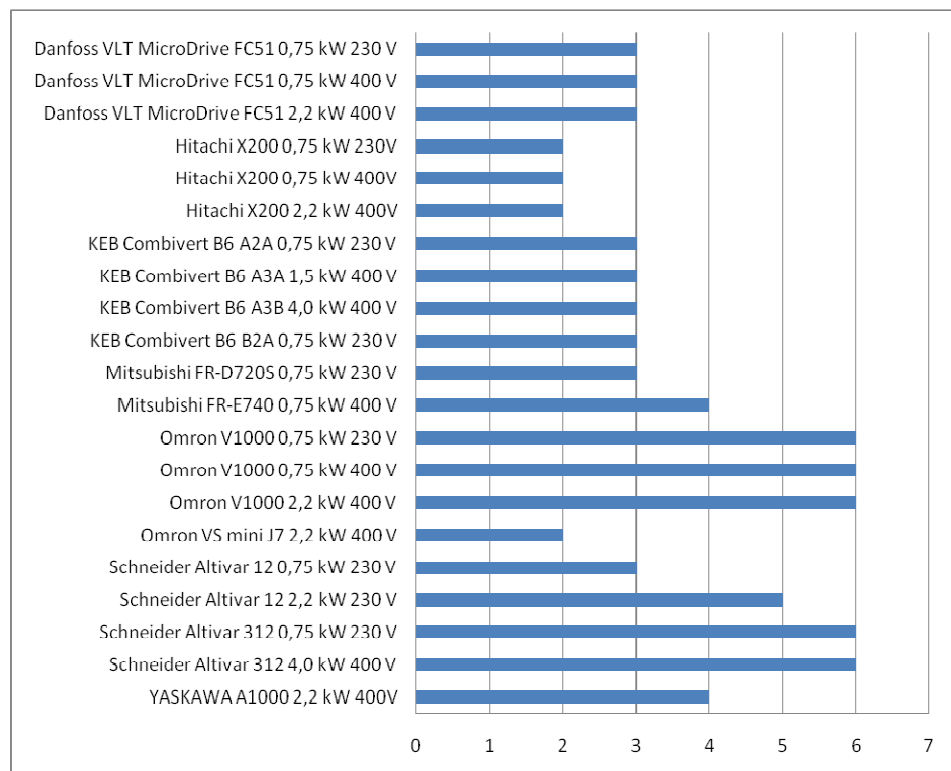
Schneider Altivar 312 -laitteissa mitataan lisäksi tulovaiheiden summavirtoja virtamuuntimilla.

Omron VS mini J7 -laitteessa virranmittaus on integroituna vaihtosuuntausmoduuliin. Mitsubishi FR-D720S ja Mitsubishi FR-E740 käyttämää virranmittausta ei saatu selville. Näiden laitteiden käyttämistä Mitsubishin omavalmisteisista IGBT-moduuleista ei ole saatavilla dokumentaatiota.

3.8 Piirikorttivertailu

Piirikorttien lukumäärä kertoo laitteen tuotannon ja kokoonpanon kustannuksista. Mitä enemmän piirikortteja, sitä monimutkaisempi laitteen kokoonpano on. Toisaalta monimutkainen ja useaan kerrokseen tehty piirikortti on kallis suunnitella ja valmistaa.

Keskimäärin laitteissa on kolme piirikorttia (kuva 38). Hitachi X200- ja Omron VS mini J7 -laitteissa piirikortteja on vain kaksi: ohjauskortti ja pääpiirikortti. Toisen ääripään muodostavat Omron V1000- ja Schneider Altivar 312 -laitteet, joissa on kuusi piirikorttia. Näiden laitteiden piirikorttimääriä nostaa pienistä palasista koostuvat I/O- ja ohjauskortit. Omron V1000 -laitteissa on lisäksi yksi keraamisella aineella umpeen valettu tuntematon lisäkortti.



Kuva 38. Piirikorttien lukumäärä kussakin vertailun laitteessa

Piirikorteilta on usein löydettävissä selkeät omat kokonaisuutensa. Hieno-elektroniikka ja pieniä signaaleja käsittelevät komponentit, kuten I/O-liitännät, prosessori sekä paneeli, pidetään usein erillään tehopuolijohteista, syöttö- ja tulojännitteistä ja välipiiristä. Hitachi X200 on tästä jaottelutavasta hyvä esimerkki (kuva 39). Kookkaille tulojännitteen suodatuksen komponenteille on useassa laitteessa erillinen yksinkertainen piirikortti. Schneider Altivar 312 (2,2 kW 230 V) -laitteessa oli erillinen kortti välipiirin kondensaattoreita varten.



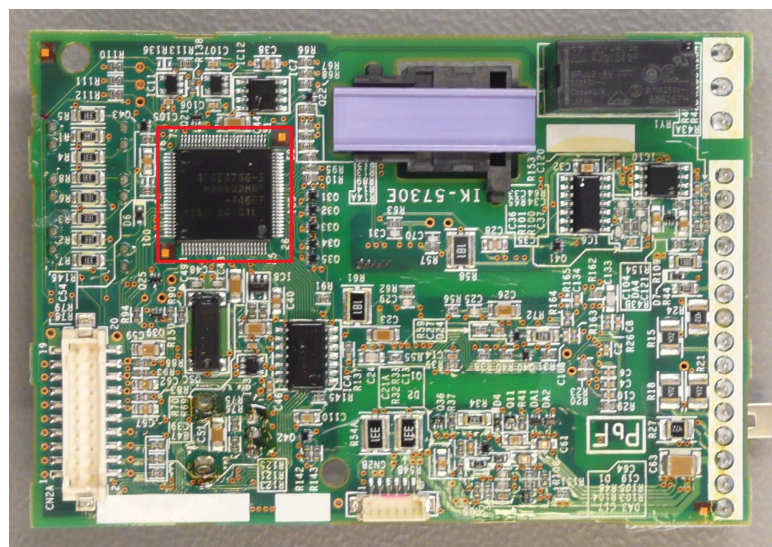
Kuva 39. Hitachi X200 0,75 kW 230 V -laite kuori avattuna; laitekuoressa olevaan piirikorttiin on sulautettu prosessori, I/O-liitännät sekä paneeli, muut toiminnot on sijoitettu alla olevalle suuremmalle piirikortille

3.9 Mikroprosessori

Prosesori on keskeinen osa taajuusmuuttajaa, se ohjaa koko laitteen toimintaa. Prosesorissa muun muassa lasketaan ja optimoidaan vaihtosuuntaajan kytkimien käännöt, käsitellään mitatut suureet, hoidetaan tietoliikenneyhteydet muiden laitteiden kanssa kenttäväylien välityksellä sekä ylläpidetään laitteen käyttöliittymää.

Yleisesti vertailun laitteissa on yksi prosessori, jonka potentiaaliksi on valittu joko analogiatulon nollapotentiaali tai DC - -potentiaali. Poikkeuksen tekevät kuitenkin KEB Combivert B6- sekä Mitsubishi FR-E740 -laitteet. Näissä laitteissa on kaksi prosessoria: toinen prosessoreista hoitaa I/O-signaaleja sekä käyttöliittymän ja toinen tehoasteen ohjauksen ja laskennan. Piensignaaleja käsittelevän prosessorin potentiaali on analogiatulon nollapotentiaali, kun tehoastetta ohjaavalla prosessorilla se on DC - -potentiaali.

Kaikissa laitteissa - Mitsubishi FR-D720S-, Mitsubishi FR-E740-, Omron VS mini J7- sekä Yaskawa A1000 -laitteita lukuun ottamatta - on prosessoriksi valittu Renesasin valmistama mikropiiri. Suosituimmat tuoteperheet ovat Renesasin M16C sekä H8S/2612, lähes puolet vertailun laitteiden prosessoreista ovat näistä tuoteperheistä (kuva 40). Poikkeuksena Mitsubishi käyttää laitteissaan Fujitsun ja Omron VS mini J7 Yaskawan valmistamia prosessoreita. Mitsubishi FR-E740 -laitteessa on lisäksi toisena prosessorina sen itse valmistama mikropiiri.



Kuva 40. Hitachi X200 -laitteen ohjauskortti, mikroprosessori (rajattu punaisella); vertailun suosituimpana prosessorina Renesas M16C on myös Hitachin valinta sen X200 -sarjan laitteisiin

Keskimäärin vertailtujen laitteiden prosessorissa on

- 16 - 25 MHz maksimikellotaajuus
- ROM-muistia 128 - 512 kilotavua
- 10 bittinen analogia-digitaalimuunnin (ADC, Analog to Digital Converter)
- QFP-80- tai QFP-100 -kotelo
- useita UART ja I2C sarjaliikenneprotokollia tukevia liitäntöjä.

Vertailun tehokkain sekä monipuolisin prosessori, Renesas SH7285, on Yaskawa A1000:ssa. Se poikkeaa muiden laitteiden prosessoreista 12 bittisellä analogia-digitaalimuuntimella, 100 MHz maksimikellotaajuudella, 768 kilotavun ROM-muistilla, suuremmalla LQFP-144 kotelolla sekä huomattavasti muita monipuolisemmilla sarjaliikenneliitännöillä. (Ks. tarkemmat tiedot laitteissa käytetyistä mikroprosessoreista, liite 3.)

3.10 I/O-liitännät

Taajuusmuuttaja on vuorovaikutuksessa ympäristönsä kanssa lähtö- ja tulosignaalien eli I/O-liitäntöjen avulla. Oloarvot ja muiden toimilaitteiden käskyt ovat tulosignaaleja, jotka vaikuttavat taajuusmuuttajan toimintaan. Taajuusmuuttaja vastaavasti ohjaa muita laitteita, kertoo sekä omat että prosessin tilatiedot ulospäin käyttäjälle ja muille laitteille lähtösignaaliensa avulla.

Tulo- ja lähtösignaalit voivat olla joko analogisia tai digitaalisia. Analogiset signaalit voivat olla joko virta- tai jännitesignaaleita. Analogiset signaalit ovat tyypillisesti -10 - +10 VDC tai 0 - 20 mA. Digitaalinen signaali on tyypillisesti 0/24 VDC. Muita I/O-liitäntöjä ovat relelähdöt sekä sarjaliikenneliitännät kenttäväyliä ja PC-liitäntää varten.

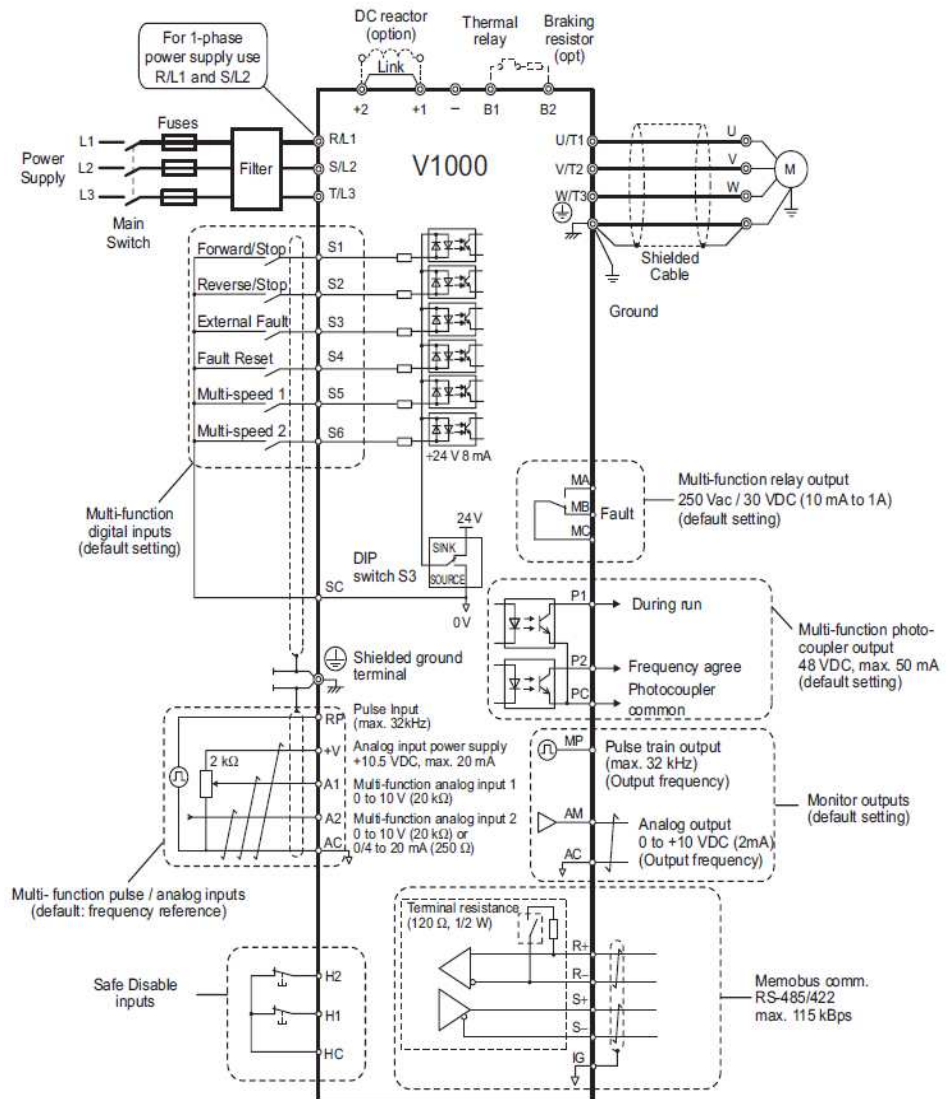
Kenttäväyliä käytetään älykkäiden automaatiolaitteiden verkottamiseen. Kenttäväylä on kaksisuuntainen tietoliikenneyhteys verkon laitteiden välillä. Kenttäväyliä avulla taajuusmuuttaja on helppo liittää osaksi prosessia. Tutut sarjaliikenteiset kenttäväyläprotokollat ovat taajuusmuuttajan oleellisia ominaisuuksia. Yleisimpiin kenttäväyläprotokolliin kuuluvat muun muassa CANopen, CC-link, DeviceNet, Modbus ja Profibus.

Vertailun laitteissa on yleensä

- 4 - 6 digitaalituloa
- 0 - 2 digitaallähtöä
- 1 - 2 analogiatuloa
- 1 analogialähtö
- 1 relelähtö
- 1 RS485/Modbus -sarjaliikenneväylä.

Laitteiden ohjekirjoista selviää helposti kyseisen laitteen tukemat ja käytettävät liitäntämahdollisuudet. Laitteen liitäntäkaavioon on piirretty

syöttöjännitteen ja moottorilähdön vaiheet sekä kaikki muut mahdolliset tulo- ja lähtöliitännät sekä datayhteydet laitteeseen ja siitä poispäin. Kaaviokuva- ta usein myös selviää, onko laitteen I/O-liitännät galvaanisesti erotetut sekä miten erotus on toteutettu. Tyypillisenä esimerkkinä Omron V1000:n kaa- viokuva (kuva 41).



Kuva 41. Omron V1000 kytkentäkaavio esimerkkinä tyypillisestä taajuusmuuttajan liitännöistä; liitännät ylhäältä alaspäin: välipiirin induktanssi, jarruvastus, syöttö- ja lähtöjännitteet, digitaalitulot, relelähtö, digitaalilähdöt, analogiatulot, kanttiaalto- ja analogialähtö, RS485/422 liitännät, Safe Disable -turvafunktion liitännät [9, s. 9]

Danfoss VLT MircoDrive FC51-, Hitachi X200-, Mitsubishi FR-D720S-, Mitsubishi FR-E740-, Omron V1000-, Schneider Altivar 12-, Schneider Altivar 312- sekä Yaskawa A1000 -malleissa on vakiona RS485/Modbus-tuki. KEB Combivert B6 -laitteissa ei ole sarjaliikenneliitännät B2A-mallia lukuun ottamatta, joka on suunniteltu erityisesti CAN-väylää varten. Yaskawa

A1000:ssa on vertailun monipuolisimmat liitännät ja se myös tukee muita useampaa kenttäväyläprotokollaa. Omron V1000- ja Yaskawa A1000-laitteissa on myös tulo ja lähtö kanttiaallolle. (Ks. tarkemmat tiedot vertailun laitteiden I/O-liitännöistä, liite 4.)

3.11 Apujännitelähde

Taajuusmuuttajassa tarvitaan useita eri pienenjännitetasoja. Nämä apujännitteet ovat yleensä matalia tasajännitteitä. Esimerkiksi prosessori ja muut logiikkapiirit voivat tarvita käyttöjännitteikseen +3,3 VDC tai +5,0 VDC, IGBT:n hila-ajuri +15 VDC ja puhallin +24 VDC. Nämä jännitteet on yleensä tehty välipiirin jännitteestä *flyback*-hakkuritekniikalla. Kaikissa tutkituissa laitteissa on tämän tyyppinen apujännitelähde.

Flyback-hakkurin etuja ovat

- lähdön erotus galvaanisesti tulosta
- lähtöjännitteen suuruuden riippumattomuus tulojännitteestä, lähtöjännite voi olla pienempi tai suurempi kuin tulojännite
- mahdollisuus saada helposti yhdestä teholähteestä useita eri lähtöjännitteitä
- pieni koko
- erittäin pieni komponenttimäärä.

Flyback-hakkurin huonoja puolia ovat kytkentäilmiöiden yhteydessä syntyvät suuret jännite- ja virtapiikit, jotka rasittavat komponentteja sekä heikentävät hyötysuhdetta.

Flyback-hakkurin lähtöjännite riippuu tulojännitteestä, muuntajan muuntosuhteesta sekä hakkurin pulssisuhteesta:

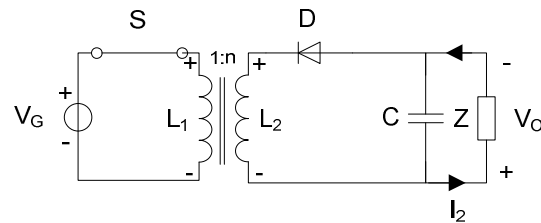
$$V_O = -nV_G \frac{D}{1-D}$$

,missä V_O on lähtöjännite, V_G on tulojännite, n on muuntajan muuntosuhde ja D on hakkurin pulssisuhte.

Jos *flyback*-hakkurista halutaan saada useita eri lähtöjä, tarvitsee kukin lähtö vain oman toisiopiirinsä eli kelan, diodin sekä kondensaattorin. [10, s. 161 - 165.]

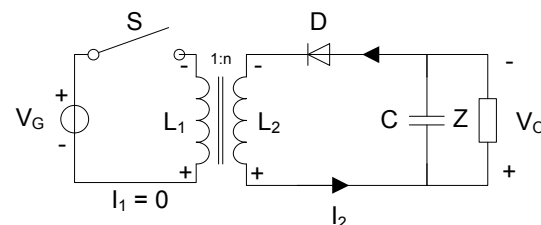
Flyback-hakkurin toimintaperiaate

Virta kulkee *flyback*-hakkurin ensiössä ja toisiossa vuorotellen. Kun ensiössä kytkin alkaa johtaa, muuntajan ensiövirta alkaa kasvaa ja sen käämiin varastoituu energiaa. Toisiokäämissä ei tällöin kulje virtaa, sillä sen diodi on estosuuntainen. Ainoastaan toision kapasitanssi syöttää kuormalle virtaa. (Kuva 42.)



Kuva 42. Flyback-hakkurin ensiön kytkin S on johtavassa tilassa, virta I_1 lataa ensiön kelaan L_1 energiaa; toisiossa diodi on kelan L_2 jännitteen suhteen vastasuuntainen eikä sen läpi kulje virtaa; kuormaa Z syötetään kondensaattorin C kautta

Kun kytkin avataan, pyrkii ensiön induktanssi pitämään virran kulkusuunnan, jolloin sen jännitteen napaisuus vaihtuu. Myös toisioiduktanssin jännitteen napaisuus kääntyy, jolloin sen diodista tulee myötäsuntainen. Tällöin ensiökäämiin varastoitunut energia pääsee purkautumaan toision kautta ja syöttämään kuormaa sekä kapasitanssia. (Kuva 43.)



Kuva 43. Flyback-hakkuri, ensiön kytkin S on johtamattomassa tilassa; ensiön induktanssin jännite kääntynyt ja sen energia purkautuu toision kautta; kuormavirta I_2 kulkee koko toisiopiirissä myötäsuntaisen diodin D läpi; toisiokäämin induktanssi L_2 syöttää kuormaa Z , kapasitanssia C ; ensiö on virraton

[10, s. 161 - 165.]

Apujännitelähteet vertailun taajuusmuuttajissa

Työssä vertailtujen taajuusmuuttajien apujännitelähteissä on todella vähän eroavaisuuksia. Ainoat suuremmat eroavaisuudet löytyvät hakkureissa käytetyissä kytkintransistoreissa.

Kaikkien laitteiden kytkintransistori on N-kanava MOSFET. Suurimmassa osassa laitteista transistorit ovat erilliskomponentteja TO-3P- tai pienemmissä TO-220-tyyppisissä koteloidissa. Osassa taajuusmuuttajista kytkintransistori on osa mikropiiriä, joka sisälsi samalla ohjauselektronikan, tällöin kotelo-tyyppi on DIP-8. (Kuva 44.)



Kuva 44. Mikropiirikotelot; kuvassa vasemmalta oikealle: DIP-8, TO-220, TO-3P

Suosituin transistorivalinta on TO-3P-koteloitu Hitachi 2SK2225. (Ks. laitteen apujännitelähteissä käytetyt kytkintransistorit, liite 5.)

3.12 Komponentti- ja tuotantokustannukset

Kustannukset ovat oleellinen osa taajuusmuuttajaa. Erityisesti pienitehoisissa taajuusmuuttajissa tämä seikka on tärkeä. Koska näitä laitteita myydään kappalemäärällisesti todella paljon, ovat laitteiden tuotanto- ja komponenttikustannukset määrävässä asemassa. Monimutkainen kokoonpano ja kalliit komponentit nostavat laitteen kustannuksia. Hyvää ja laadukasta elektronikkaa ei saa kuitenkaan yleensä halvalla. Laadun ja hinnan suhteen pitää tehdä kompromisseja.

Danfoss VLT MicroDrive FC51 -laitteiden kokoonpano on suhteellisen yksinkertainen. Laittekotelo on tiiviisti pakattu, mutta sen kokoonpano on tehty helpoksi. Laitteen tiiviin pakkauksen takia jopa 0,75 kW:n mallit tarvitsevat jäähdytyksen avuksi puhaltimen. Puhallin nostaa kustannuksia sekä on kuluva mekaaninen osa ja laskee laitteen käyttöikä.

Hitachi X200 -laittekotelo on ilmava ja laitteen kokoonpano helppo. Hitachi X200:ssa on vain kaksi piirikorttia, mikä tekee laitteesta yksinkertaisen. Laitteen ohjaukorkti on kuitenkin todella monimutkainen. Ohjaukorkti on ollut kallis suunnitella ja toteuttaa.

KEB Combivert B6 -laitteet ovat yksinkertaisia koota. Kaikki tämän mallin laitteet käyttävät samoja välipiirin kondensaattoreita, niitä on eri teho- ja jän-

niteluokissa eri määriä ja ne ovat kytketty eri tavoin. Combivert B6 -laitteiden kaksi mikroprosessoria nostavat kustannuksia.

Mitsubishi FR-D720S on todella pieni laite, mutta sen kokoonpano on silti suhteellisen yksinkertainen. Yksi merkittävä laitteen pienen koon mahdollistava tekijä on RFI-suodatuksen puuttuminen, tämä laskee myös kustannuksia. Laitteen pitkälle integroitu ja Mitsubishin itse valmistama IGBT-moduuli on arvokas, mutta säästää myös paljon tilaa.

Mitsubishi FR-E740:n kaksi mikroprosessoria nostavat laitteen kustannuksia. Toinen prosessoreista on integroitu Mitsubishin itse valmistamaan IGBT-moduuliin. Tässäkin Mitsubishin mallissa on säästetty jättämällä RFI-suodatus pois.

Omron V1000 -laitteiden välipiirien kapasitanssit ovat noin kaksi kertaa niin suuret kuin muissa laitteissa. Tämä parantaa laitteiden suorituskykyä ja helpottaa niiden säätöä, mutta myös nostaa kustannuksia. V1000-laitteisiin on myös valittu hyvä ja tehokas prosessori, mikä nostaa komponenttikustannuksia. RFI-suodatuksen puuttuminen mahdollistaa laitteen pienemmän koon ja laskee kustannuksia.

Omron VS mini J7 tarjoaa perusominaisuudet. Siinä ei ole kalliita komponentteja eikä hienoja ominaisuuksia. Laitteessa ei ole myöskään RFI-suodatusta.

Schneider Altivar 12 -laitteiden kokoonpano on hankala. Pienitehoisen 0,75 kW:n laitteen kokoonpanossa on käytetty nippusiteitä ja kuumaliimaa, ja ne hankaloittavat kokoonpanoa.

Myös Schneider Altivar 312 -laitteiden kokoonpano on työläs. Pienitehoinen 0,75 kW:n laite on valmistettu lähes samalla tavalla, kuin Altivar 12 -mallissa: nippusiteitä ja kuumaliimaa käyttäen. Altivar 312 -laitteissa on kuitenkin panostettu turvallisuuteen: maasulkua valvotaan tulovaiheiden summavirtaa mittaavalla virtamuuntimella. Suurempitehoisessa 4,0 kW:n laitteessa myös lähtövirtoja mitataan virtamuuntimilla kahdesta vaiheesta. Näissä laitteissa myös prosessori on hyvä. Nämä nostavat laitteen komponenttikustannuksia.

Yaskawa A1000 erottuu muista laitteista selvästi, valmistaja mainostaakin laitetta sen hyvällä suorituskyvyllä. Sen mikroprosessori on huomattavasti

muuta parempi ja virtamuuntimilla toteutettu virranmittaus vertailun tarkin. Koska tämä laite ei kilpaile suoraan muiden vertailun laitteiden kanssa, ei niiden tuomilla lisäkustannuksilla ole niin suurta merkitystä. Laitteen suuren koon takia A1000 ei tarvitse puhallinta jäähdytystä varten, tämä laskee kustannuksia ja pidentää laitteen käyttöikä. Kustannuksia ja tilaa on säästetty myös jättämällä laitteen RFI-suodatus pois.

4 TULOKSET

Työssä vertailtujen laitteiden kesken oli eroja ja yhtäläisyyksiä. Työssä selvitettyt laitteiden merkittävimmät erot sekä hyvät ja huonot ominaisuudet ovat koottu malli- ja teholuokkakohtaisesti yhteen.

4.1 0,75 kW:n ja 1,5 kW:n laitteet

Danfoss VLT MicroDrive FC51 (230 V ja 400 V)

kompakti; tiivis rakenne; kapea seinäpinta-ala; ainoa 0,75 kW:n laite, jossa puhallin; hyvä RFI-suodatus; ei DC-kuristinoptiota; virranmittaus DC -:sta *shunt*-vastuksella; suhteellisen yksinkertainen kokoonpano

Hitachi X200 (230 V ja 400 V)

kookas; väljä rakenne; kohtuullinen RFI-suodatus; kaasupurkausputki ylijännitesuojauksessa; DC-kuristinoptio; IGBT-moduliin integroitu hilaohjaus; välipiirin kapasitanssi suuri; latausvastuksen oikosuljenta IGBT-moduulissa; virranmittaus DC -:sta *shunt*-vastuksella; yksinkertainen kokoonpano; monimutkainen ohjauskortti; hyvät I/O- ja kenttäväyläliitännät

KEB Comibvert B6 (0,75 kW, 230 V ja 1,5 kW 400 V)

kookas; väljä rakenne; hyvä RFI-suodatus; ei DC-kuristinoptiota; kaikissa KEB:eissä samanmalliset välipiirin kondensaattorit; vaihevirtojen mittaus *shunt*-vastuksilla; yksinkertainen kokoonpano; kaksi prosessoria (käyttöliittymä ja I/O / moottorin ohjaus); hyvä prosessori; ei tue kenttäväyläliitännät

KEB Comibvert B6 (0,75 kW, 230 V, CAN-malli)

kookas; väljä rakenne; hyvä RFI-suodatus; ei DC-kuristinoptiota; kaikissa KEB:eissä samanmalliset välipiirin kondensaattorit; vaihevirtojen mittaus

shunt-vastuksilla; yksinkertainen kokoonpano; kaksi prosessoria (käyttöliittymä ja I/O / moottorin ohjaus); hyvä prosessori; niukat I/O-liitännät; tukee vain CAN-väylää

Mitsubishi FR-D720S (230 V)

kompakti; pieni ja kapea seinäpinta-ala; ei RFI-suodatusta; ylijännitesuojaus varistorilla ainoastaan välipiirissä; DC-kuristinoptio; pitkälle integroitu IGBT-moduuli; välipiirin kapasitanssi pieni

Mitsubishi FR-E740 (400 V)

kookas; suuri seinäpinta-ala, ei RFI-suodatusta, ylijännitesuojaus varistorilla ainoastaan välipiirissä; DC-kuristinoptio; pitkälle integroitu IGBT-moduuli; välipiirin kapasitanssi pieni; kaksi prosessoria (käyttöliittymä ja I/O / moottorin ohjaus); monipuoliset I/O-liitännät ja kenttäväyläoptiot

Omron V1000 (230 V ja 400 V)

kuutiomainen muoto; ei RFI-suodatusta; DC-kuristinoptio; välipiirin kapasitanssi noin kaksi kertaa muita laitteita suurempi; vaihevirtojen mittaus *shunt*-vastuksilla; hyvä prosessori; monipuoliset I/O- ja kenttäväyläliitännät

Schneider Altivar 12 (230 V)

kompakti; hyvä RFI-suodatus; ei ylijännitesuojausta; ei DC-kuristinoptiota; virranmittaus DC -:sta *shunt*-vastuksella; monimutkainen kokoonpano (kuumaliimaa ja nippusiteitä); niukat I/O-liitännät; tukee ainoastaan MODBUS-kenttäväylää

Schneider Altivar 312 (230 V)

kompakti; hyvä RFI-suodatus; ei ylijännitesuojausta; ei DC-kuristinoptiota; välipiirin kapasitanssi pieni; vaihevirtojen mittaus *shunt*-vastuksilla; maasulkuvirran mittaus virtamuuntimella; monimutkainen kokoonpano (kuumaliimaa ja nippusiteitä); hyvä prosessori; hyvät I/O- ja kenttäväyläliitännät

4.2 2,2 kW:n laitteet

Danfoss VLT MicroDrive FC51 (400 V)

kompakti; tiivis rakenne; kapea seinäpinta-ala; hyvä RFI-suodatus; ei DC-kuristi optiota; välipiirin kapasitanssi suuri; virranmittaus DC -:sta *shunt*-vastuksella; suhteellisen yksinkertainen kokoonpano

Hitachi X200 (400 V)

kookas; väljä rakenne; kohtuullinen RFI-suodatus; kaasupurkausputki ylijännitesuojauksessa; DC-kuristinoptio; IGBT-moduliin integroitu hilaohjaus; välipiirin kapasitanssi suuri; latausvastuksen oikosuljenta IGBT-moduulissa; virranmittaus DC -:sta *shunt*-vastuksella; yksinkertainen kokoonpano; monimutkainen ohjauskortti; hyvät I/O- ja kenttäväyläliitännät

Omron VS mini J7 (400 V)

kompakti; kuutiomainen muoto; ei RFI-suodatusta; DC-kuristinoptio, DC-virranmittaus IGBT-moduulissa; ei tukea kenttäväylille

Omron V1000 (400 V)

kompakti; kuutiomainen muoto; ei RFI-suodatusta; DC-kuristinoptio; välipiirin kapasitanssi noin kaksi kertaa muita laitteita suurempi; vaihevirtojen mittaus *shunt*-vastuksilla; hyvä prosessori; monipuoliset I/O- ja kenttäväyläliitännät

Schneider Altivar 12 (230 V)

kompakti; hyvä RFI-suodatus; ei DC-kuristinoptiota; ei ylijännitesuojausta, latauspiiri tulovaiheessa; virranmittaus DC -:sta *shunt*-vastuksella, maasulkuvirran mittaus virtamuuntimella; suhteellisen monimutkainen kokoonpano; niukat I/O-liitännät; tukee ainoastaan MODBUS-kenttäväylää

Yaskawa A1000 (400 V)

todella kookas; passiivinen jäähdytys; ei RFI-suodatusta; DC-kuristinoptio; välipiirin kapasitanssi pieni; virranmittaus kaikista vaiheista virtamuuntimilla; todella hyvä prosessori; todella monipuoliset I/O- ja kenttäväyläliitännät

4.3 4,0 kW:n laitteet

Schneider Altivar 312 (400 V)

suuri seinäpinta-ala; hyvä RFI-suodatus; ei ylijännitesuojausta; ei DC-kuristinoptiota; virranmittaus kahdesta vaiheesta virtamuuntimilla; maasulkuvirran mittaus virtamuuntimella; monimutkainen kokoonpano; hyvä prosessori; hyvät I/O- ja kenttäväyläliitännät

KEB Combivert B6 (4,0 kW, 400 V)

kompakti; hyvä RFI-suodatus; ei DC-kuristinoptiota; välipiirin kapasitanssi; kaikissa KEB:eissä samanmalliset välipiirin kondensaattorit; vaihevirtojen mittaus *shunt*-vastuksilla; yksinkertainen kokoonpano; kaksi prosessoria (käyttöliittymä ja I/O / moottorin ohjaus); hyvä prosessori; ei tue kenttäväyläliitännöitä

5 YHTEENVETO

Tässä insinööriyössä tutustuttiin 21 eri 0,75 - 4,0 kW tehoalueen taajuusmuuttajaan, ja niiden rakenteisiin. Laitteet purettiin osiin ja kaikki niiden käyttämät pääkomponentit selvitettiin. Laitteiden toiminnallisia osia ja toteutuksia analysoitiin, ja niitä verrattiin keskenään. Vertailuissa selvisi myös, millaisia yleisiä suunnitteluratkaisuja laitteissa oli. Yleisistä tavoista poikkeavia toteutuksia arvioitiin. Laitteita arvioitiin lisäksi komponentti- ja tuotantokustannusten kannalta.

Laitteissa oli paljon valmistaja- ja mallikohtaisia eroja, mutta myös samanlaisia toteutuksia löytyi. Niiden fyysiset mitat vaihtelivat. Myös välipiirin kapasitanssi määrät vaihtelivat suuresti laitteiden kesken; 230 V:n malleissa välipiirin kapasitanssi oli 400 V:n malleja suurempi. RFI-suodatus oli jätetty useasta mallista kokonaan pois. Ylijännitesuojaukseen käytettiin yleensä varistoreita, osasta suojaus puuttui kokonaan. Lähes joka laitteessa oli erilaiset vaihto- ja tasasuuntaussillat. Latauspiirin sijoitus heti tasasuuntaajan jälkeen oli suosituin ratkaisu. Latausvastus oli joko teho- tai NTC-vastus. Laitteiden virranmittaus oli toteutettu joko mittavastuksin tai virtamuuntimilla. Yleensä virta mitattiin mittavastuksilla joko DC - -kiskosta tai lähtövaiheiden alaharoista. Laitteissa oli 2 - 6 piirikorttia. Mikroprosessorivalinnat vaihtelivat mallikohtaisesti, mutta lähes jokaisen laitteen mikroprosessorin valmistaja oli Renesas. Mikroprosessorin nollapotentiaali oli valittu joko DC - -potentiaali tai analogiatulon nollapotentiaali. Kaikissa laitteissa apujännitelähde oli *fly-back*-tyyppinen. Kustannuksia nostavia seikkoja olivat muun muassa hyvä RFI-suodatus, tarkka virranmittaus, vaikea kokoonpano sekä mikroprosessorien lukumäärä.

Lähes kaikki laitteiden toiminnallisuudet ja komponenttivalinnat saatiin selville. Laitteiden toiminnalliset osat ja toteutukset saatiin kartoitettua yllättävän hyvin. Työssä kerätyistä tiedoista saatiin muodostettua kattava selvitys mikro-teholuokan taajuusmuuttajista. Työn tulosten perusteella voidaan asettaa suorituskyky- ja kustannusvaatimuksia vertailun taajuusmuuttajien kanssa samoille markkinoille suunniteltaville tuotteille.

LÄHTEET

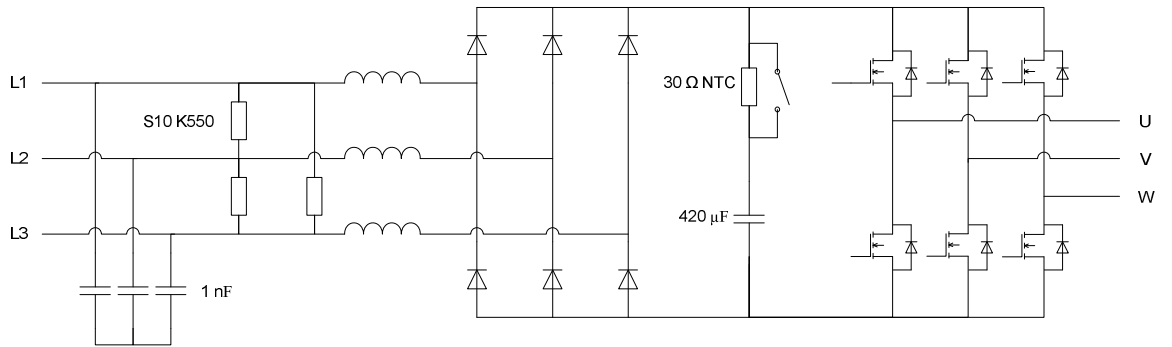
- [1] ABB TTT-käsikirja 2000-07 Luku 18: Sähkömoottorikäytöt [verkkodokumentti, viitattu 7.1.2010].
- Saatavissa:
[http://www02.abb.com/global/fiabb/fiabb255.nsf/viewunid/C46D5509D325D21AC225695B002FB07B/\\$file/180_0007.pdf](http://www02.abb.com/global/fiabb/fiabb255.nsf/viewunid/C46D5509D325D21AC225695B002FB07B/$file/180_0007.pdf)
- [2] Niiranen Jouko, Sähkökäyttöjen digitaalinen ohjaus. Helsinki: Otatieto 1999
- [3] ABB Oy Component Drives ACS55, ACS150 perustiedot [verkkodokumentti, viitattu 8.1.2010].
- Saatavissa:
<http://www.abb.fi/product/seitp322/09a8ddf15fc01762c2256f1c004721b8.aspx?productLanguage=fi&country=FI>
- [4] Sarén Hannu, Analysis of the voltage source inverter with small DC-link capacitor, väitöskirja [verkkodokumentti, viitattu 8.1.2010]
- Saatavissa: <http://urn.fi/URN:ISBN:952-214-119-4>
- [5] KEB Combivert B6 Catalog, esite, KEB [verkkodokumentti, viitattu 10.4.2010]
- Saatavissa:
http://www.keb.de/index.php?eID=tx_nawsecuredl&u=0&file=fileadmin/media/Catalogs/0000000-51B6-02-2010.pdf&t=1270996708&hash=2644de0fce5af870b83bc6849a50d0ab
- [6] ABB Tekninen opas nro 3 - PDS-käyttöjen asennus ja kokoonpano EMC-vaatimusten mukaan [verkkodokumentti, viitattu 28.1.2010]
- Saatavissa:
[http://library.abb.com/global/scot/scot201.nsf/veritydisplay/bb3f0dff646d5948c1256d2800411386/\\$File/TechnicalGuideNo_3FI.pdf](http://library.abb.com/global/scot/scot201.nsf/veritydisplay/bb3f0dff646d5948c1256d2800411386/$File/TechnicalGuideNo_3FI.pdf)
- [7] Fundamentals of ROV Varistor Technology, Tyco Electronics [Verkkodokumentti, viitattu 25.3.2010]
- Saatavissa:
<http://www.circuitprotection.com/catalog/fundamentals/ROVfundamentals.pdf>
- [8] Semikron SKiiP 12NAB126V1, datalehti, Semikron [verkkodokumentti, viitattu 16.3.2010]
- Saatavissa: <http://semikron.com/internet/gecont/pdf/525.pdf>
- [9] Omron V1000 Manual, ohjekirja, Omron [verkkodokumentti, viitattu 17.3.2010]

Saatavissa:

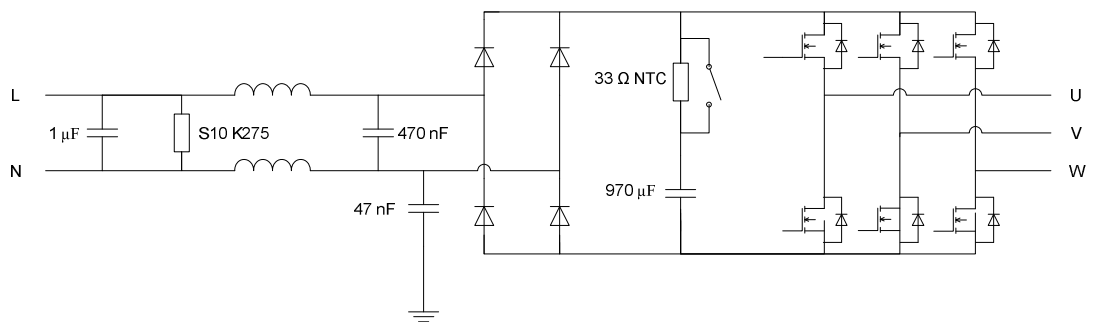
<http://downloads.industrial.omron.eu/IAB/Products/Motion%20and%20Drives/Frequency%20Inverters/General%20Purpose/V1000/PC71060622/SIEC71060620-01-OY+V1000+UsersManual.pdf>

- [10] Erickson, Robert W. - Maksimovic Dragan, Fundamentals of Power Electronics. Norwell: Kluwer Academic Publishers 2001

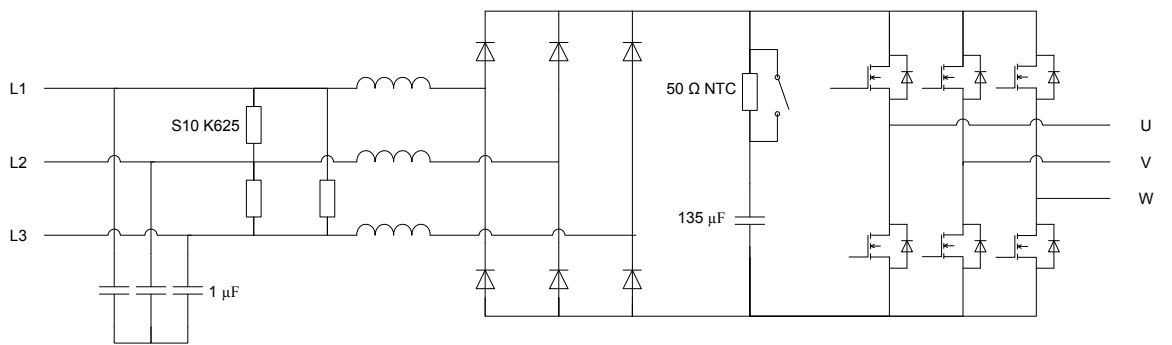
Vertailtujen taajuusmuuttajien pääpiirikaaviot



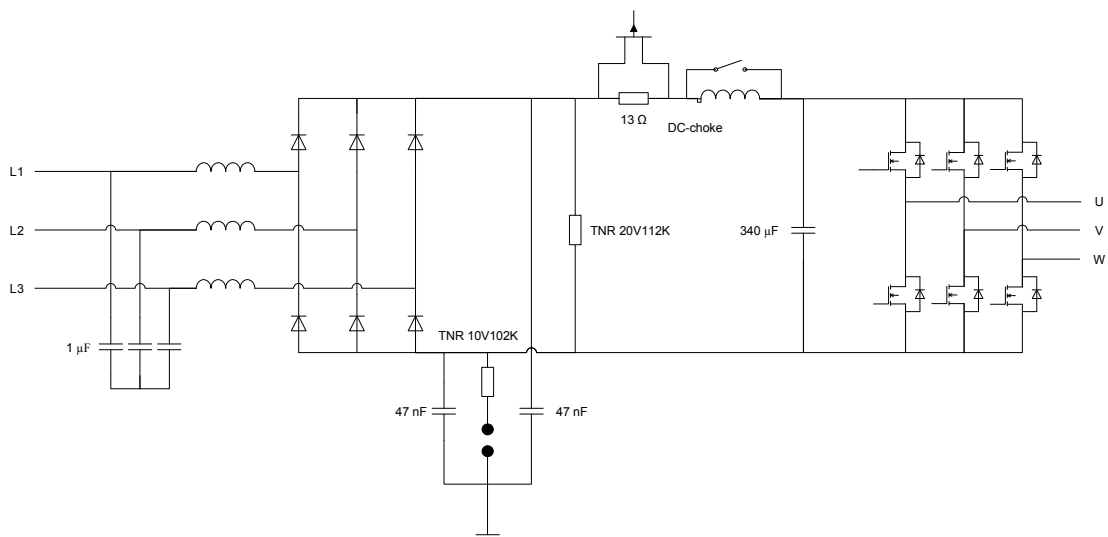
Kuva 1. Danfoss VLT MicroDrive FC51 2,2 kW 400 V



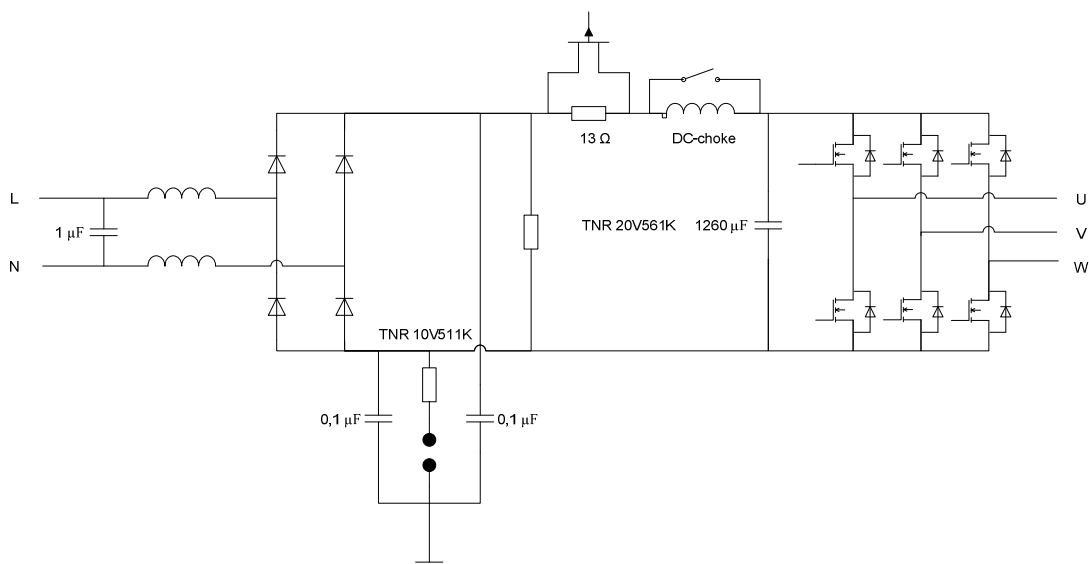
Kuva 2. Danfoss VLT MicroDrive FC51 0,75 kW 230 V



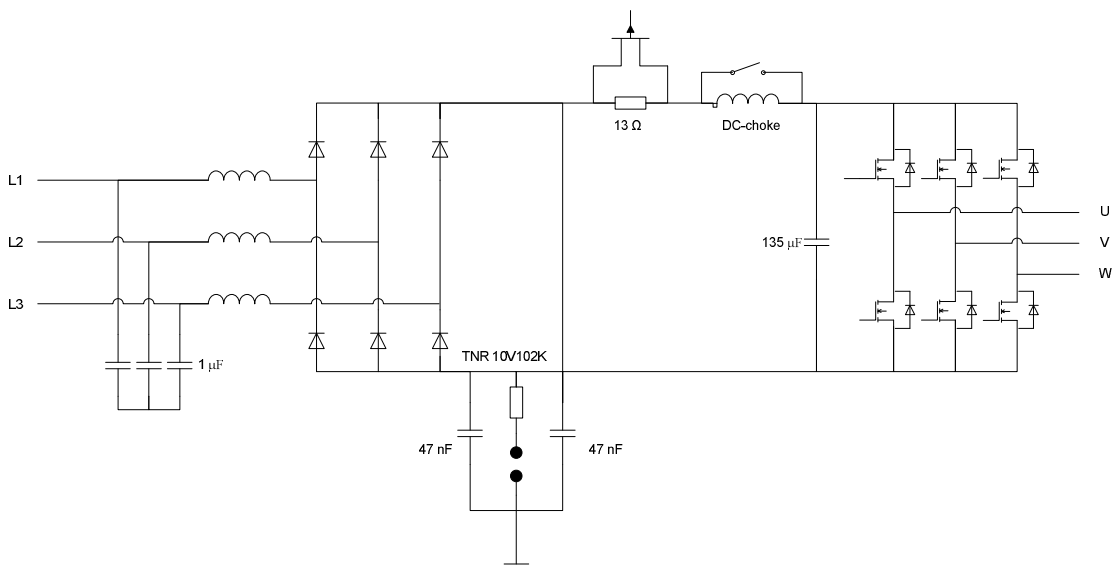
Kuva 3. Danfoss VLT MicroDrive FC51 0,75 kW 400 V



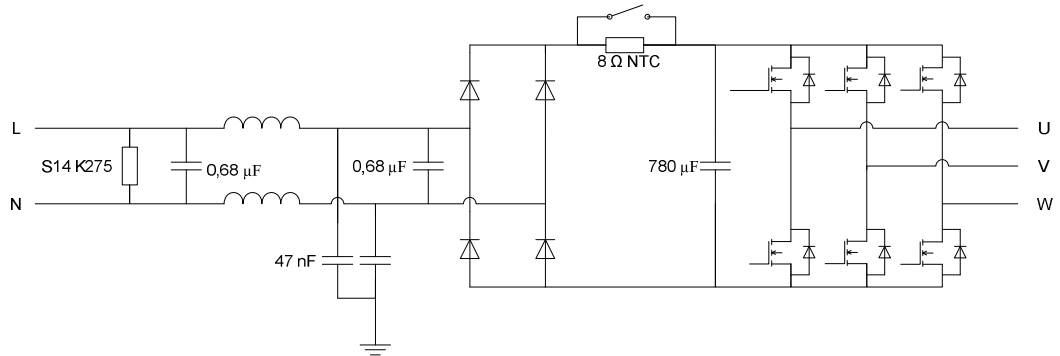
Kuva 4. Hitachi X200 2,2 kW 400 V



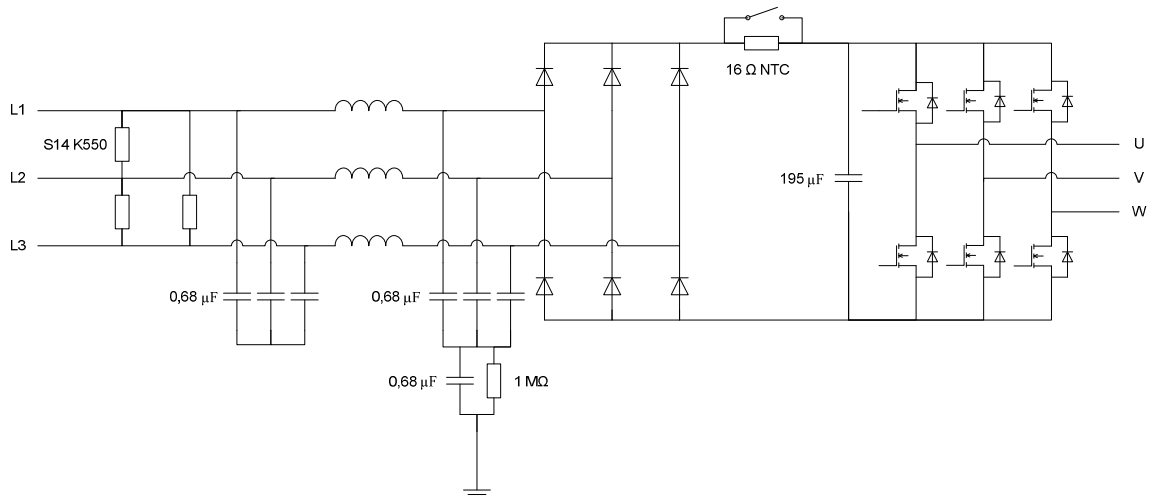
Kuva 5. Hitachi X200 0,75 kW 230 V



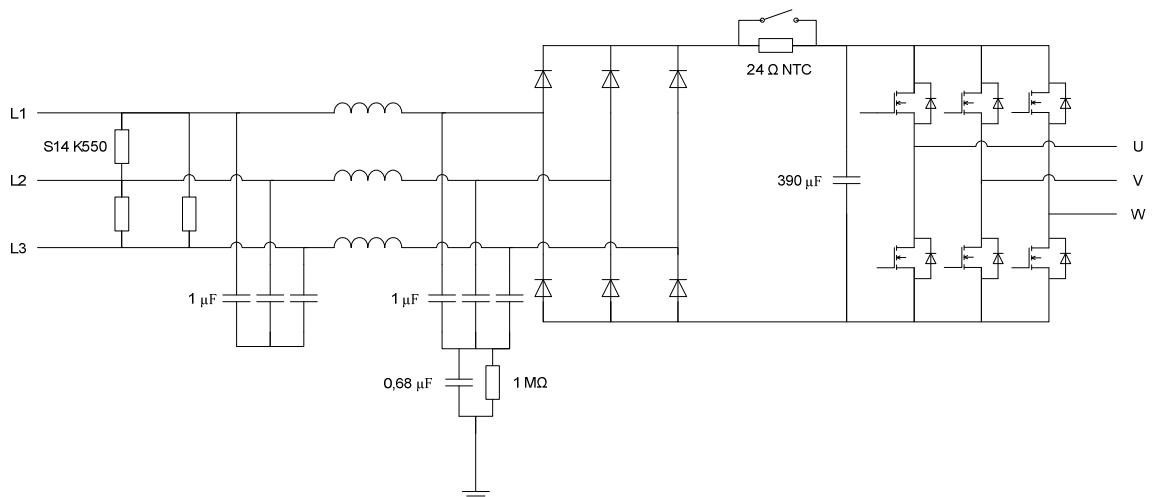
Kuva 6. Hitachi X200 0,75 kW 400 V



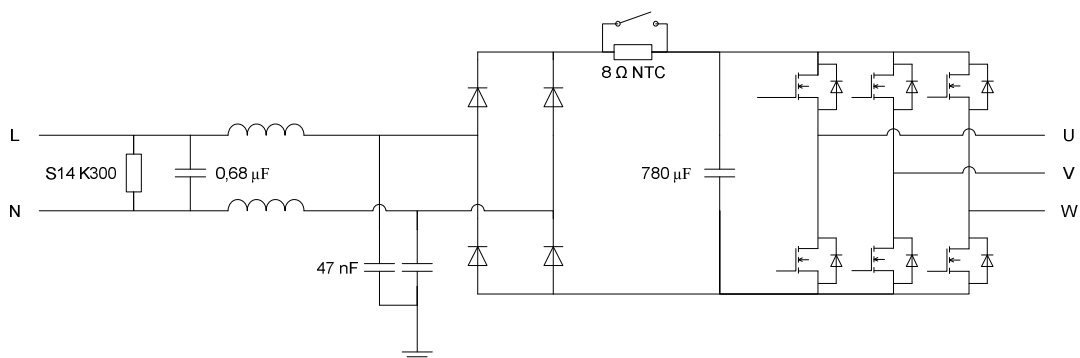
Kuva 7. KEB Combivert B6 A2A 0,75 kW 230 V



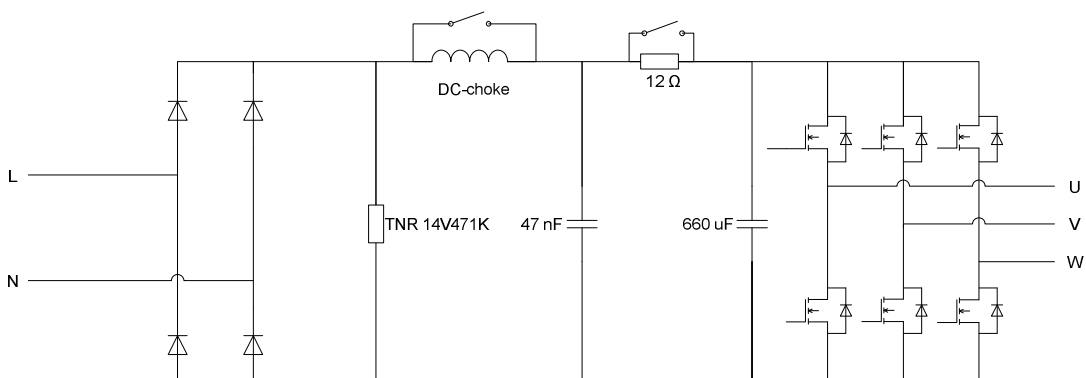
Kuva 8. KEB Combivert B6 A3A 1,5 kW 400 V



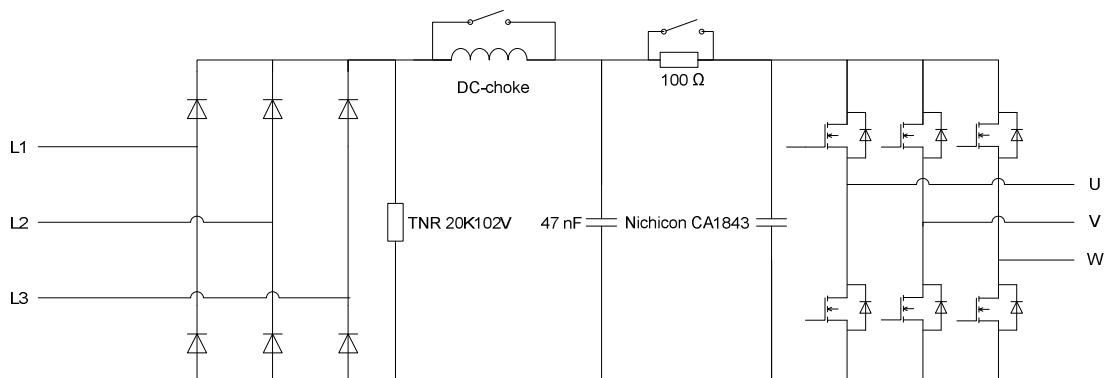
Kuva 9. KEB Combivert B6 A3B 4,0 kW 400 V



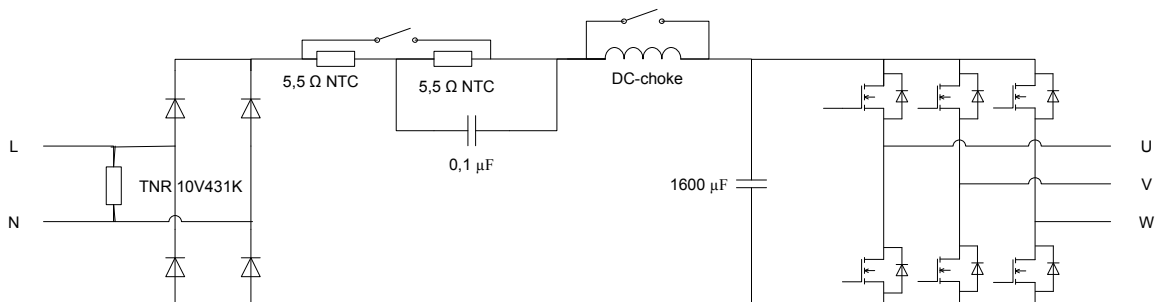
Kuva 10. KEB Combivert B6 B2A 0,75 kW 230 V



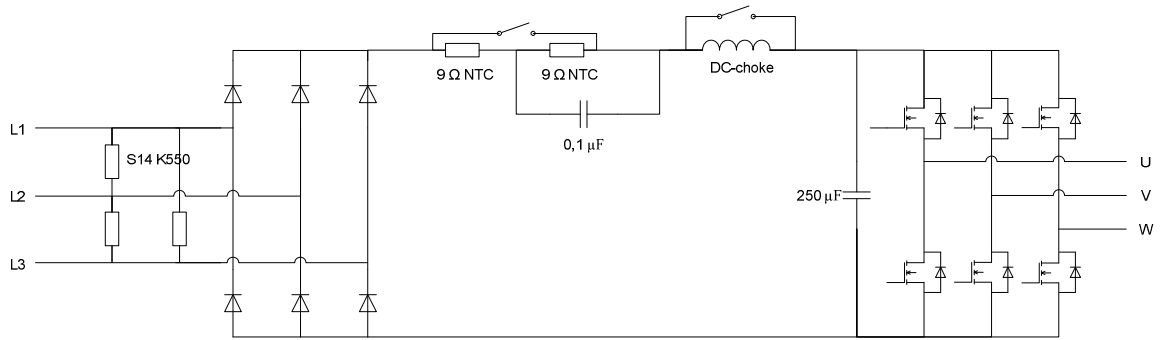
Kuva 11. Mitsubishi FR-D720S 0,75 kW 230 V



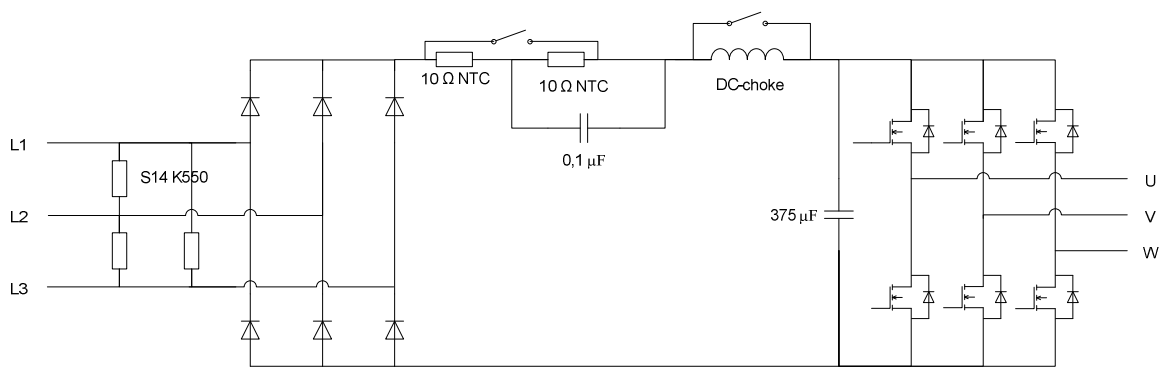
Kuva 12. Mitsubishi FR-E740 0,75 kW 400 V



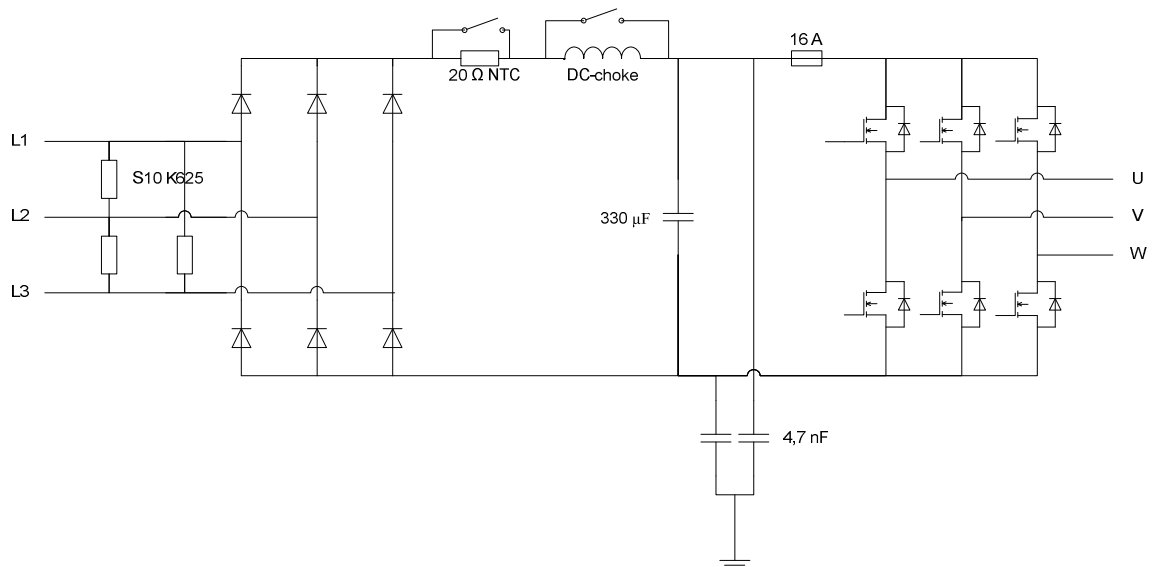
Kuva 13. Omron V1000 0,75 kW 230 V



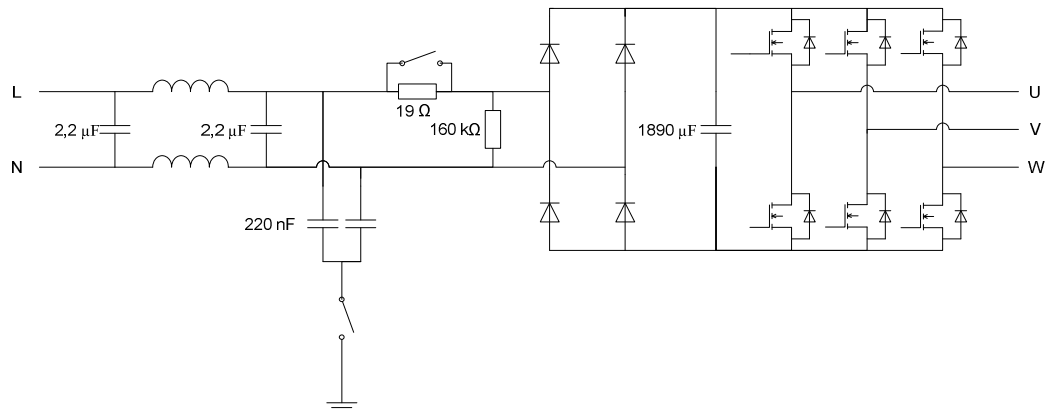
Kuva 14. Omron V1000 0,75 kW 400 V



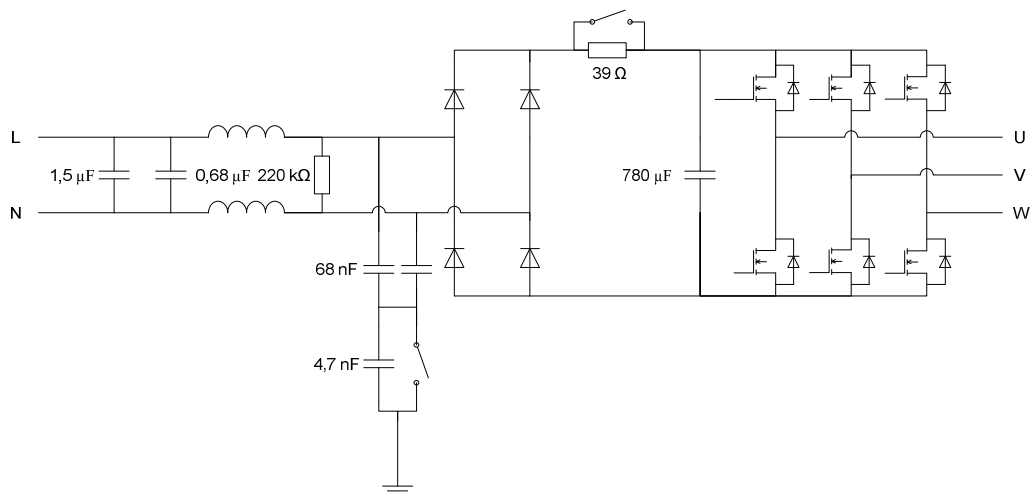
Kuva 15. Omron V1000 2,2 kW 400 V



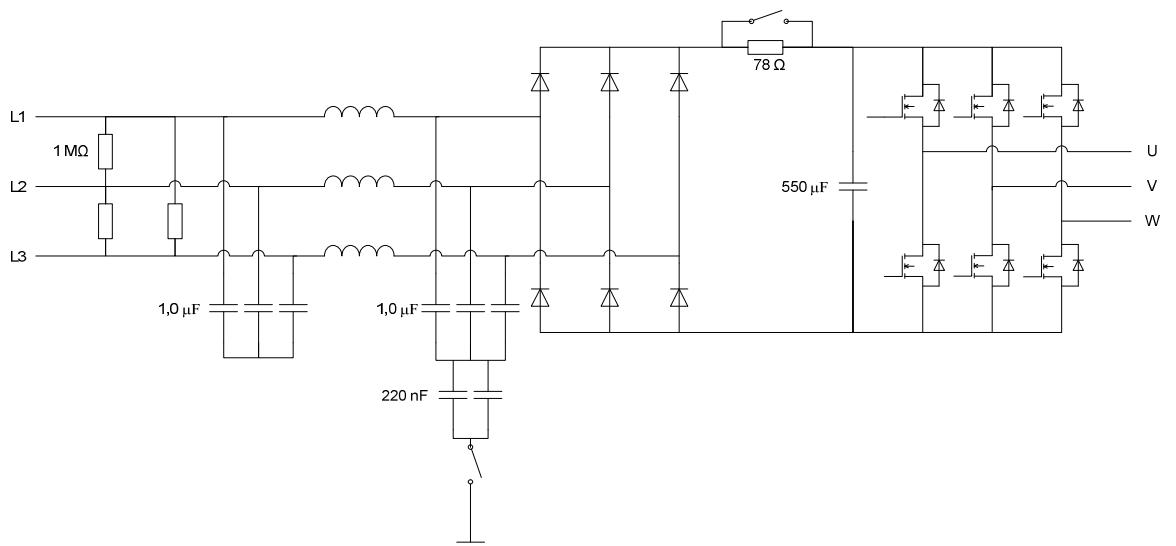
Kuva 16. Omron VS mini J7 2,2 kW 400 V



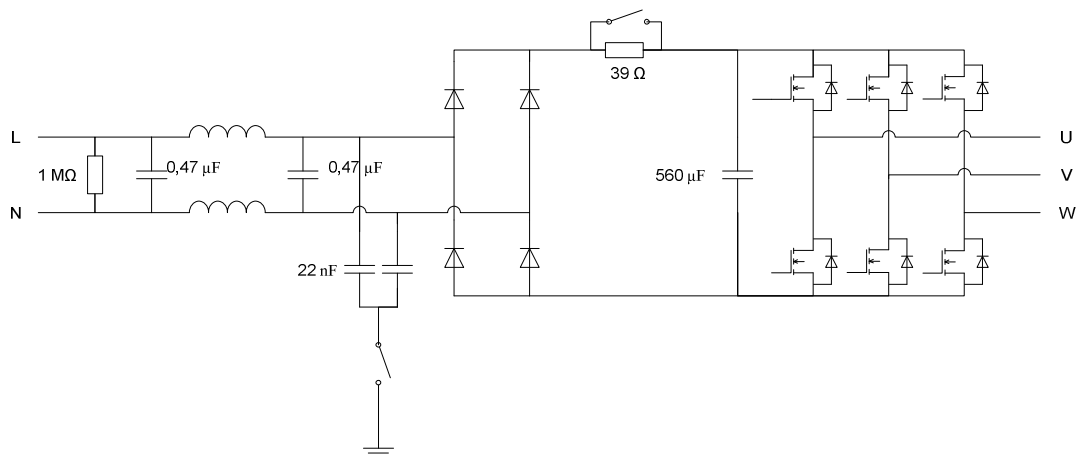
Kuva 17. Schneider Altivar 12 2,2 kW 230 V



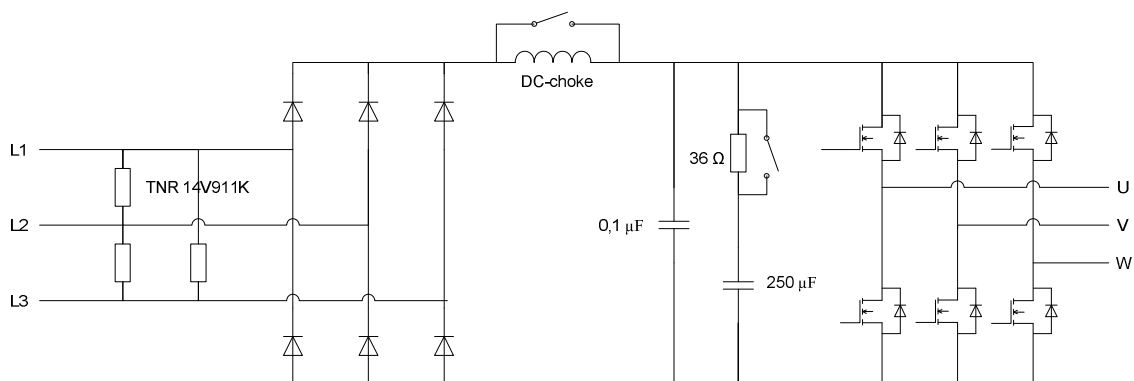
Kuva 18. Schneider Altivar 12 0,75 kW 230 V



Kuva. 19 Schneider Altivar 312 4,0 kW 400 V



Kuva 20. Schneider Altivar 312 0,75 kW 230 V



Kuva 21. YASKAWA A1000 2,2 kW 400 V

Vertailun taajuusmuuttajissa käytetyt tasa- ja vaihtosuuntaajamoduulit

Laite	Tyyppi	Malli
Danfoss VLT MircoDrive FC51 0,75 kW 230 V	Moduuli	Semikron SKiiP 02NAC060V3
Danfoss VLT MircoDrive FC51 0,75 kW 400 V	Moduuli	Semikron SKiiP 03NAC126V1
Danfoss VLT MircoDrive FC51 2,2 kW 400 V	Moduuli	Semikron SKiiP 12NAB126V1
Hitachi X200 0,75 kW 230V	Moduuli	SanRex 8K19R 01 HN3008AA60
Hitachi X200 0,75 kW 400V	Moduuli	SanRex 9A16R 02 HN3008AA120
Hitachi X200 2,2 kW 400V	Moduuli	SanRex 9E25R 02 HN3022AA120
KEB Combivert B6 A2A 0,75 kW 230 V	IGBT-vaihtosuuntaaja	Mitsubishi Powerex PS21563
	Tasasuuntaaja	WTE KBPC2508PW
KEB Combivert B6 A3A 1,5 kW 400 V	Moduuli	Vincotech V23990 P540-A-14
KEB Combivert B6 A3B 4,0 kW 400 V	Moduuli	Vincotech V23990 P580-A41
KEB Combivert B6 B2A 0,75 kW 230 V	IGBT-vaihtosuuntaaja	Mitsubishi Powerex PS21563
	Tasasuuntaaja	WTE KBPC2508PW
Mitsubishi FR-D720S 0,75 kW 230 V	Moduuli	Mitsubishi K0912141-017-091212 D72SHB0.75A-A
Mitsubishi FR-E740 0,75 kW 400 V	Moduuli	Mitsubishi K09080C4-093-090811 E74HA0.4/0.75A
Omron V1000 0,75 kW 230 V	IGBT-vaihtosuuntaaja	Mitsubishi Powerex CP20TD1-12Y
	Tasasuuntaaja	D25XB80
Omron V1000 0,75 kW 400 V	Moduuli	Mitsubishi Powerex CP10TD1-24Y
Omron V1000 2,2 kW 400 V	Moduuli	Mitsubishi Powerex CP15TD1-24Y
Omron VS mini J7 2,2 kW 400 V	Moduuli	Mitsubishi PS12036-Y2 T85FQ7G
Schneider Altivar 12 0,75 kW 230 V	IGBT-vaihtosuuntaaja	Infineon IKCS12F60BB
	Tasasuuntaaja	S1342
Schneider Altivar 12 2,2 kW 230 V	Moduuli	Infineon FP30R06W1E3
Schneider Altivar 312 0,75 kW 230 V	Moduuli	Infineon FB10R06KL4G_B1
Schneider Altivar 312 4,0 kW 400 V	Moduuli	Semikron SKiiP 24NAB125T12
YASKAWA A1000 2,2 kW 400V	Moduuli	Mitsubishi Powerex CP15TD1-24Y

Vertailun taajuusmuuttajissa käytetyt mikroprosessorit

Laite	Proessori	Potentiaali	Kellotaajuus (MHz)	ROM (kB)	Kotelo	ADC (bit)	Tuetut sarjaliikenneprotokollat
Danfoss VLT MircoDrive FC51 0,75 kW 230 V	Renesas M16C/62A M306243GPGP	DC-	16 MHz	256 kB	QFP-100	10	3x UART/I2C/IEB US, 2x SSI
Danfoss VLT MircoDrive FC51 0,75 kW 400 V	Renesas M16C/62P M3062LFGPGP	DC-	24 MHz	256+ 4 kB	PRQP-100	10	3x UART/I2C/IEB US, 2x SSI
Danfoss VLT MircoDrive FC51 2,2 kW 400 V	Renesas M16C/62P M3062LFGPGP	DC-	24 MHz	256+ 4 kB	PRQP-100	10	3x UART/I2C/IEB US, 2x SSI
Hitachi X200 0,75 kW 230V	Renesas M16C/62P M30622MEP-445GP	DC-	24 MHz	256+ 4 kB	PRQP-100	10	3x UART/I2C/IEB US, 2x SSI
Hitachi X200 0,75 kW 400V	Renesas M16C/62P M30622MEP-445GP	DC-	24 MHz	256+ 4 kB	PRQP-100	10	3x UART/I2C/IEB US, 2x SSI
Hitachi X200 2,2 kW 400V	Renesas M16C/62P M30622MEP-445GP	DC-	24 MHz	256+ 4 kB	PRQP-100	10	3x UART/I2C/IEB US, 2x SSI
KEB Combivert B6 A2A 0,75 kW 230 V	Renesas H8S/2612 HD64F2612FA	AI GND	20 MHz	128 kB	QFP-80	10	1x SCI, 1x HCAN
	Renesas H8/3052B F3052F25V	DC-	25 MHz	512 kB	QFP-100	10	2x SCI
KEB Combivert B6 A3A 1,5 kW 400 V	Renesas H8S/2612 HD64F2612FA	AI GND	20 MHz	128 kB	QFP-80	10	1x SCI, 1x HCAN
	Renesas H8/3052B F3052F25V	DC-	25 MHz	512 kB	QFP-100	10	2x SCI
KEB Combivert B6 A3B 4,0 kW 400 V	Renesas H8S/2612 HD64F2612FA	AI GND	20 MHz	128 kB	QFP-80	10	1x SCI, 1x HCAN
	Renesas SH7146F R5F71464AD80F PV	DC-	80 MHz	256 kB	LQFP-80	10	3x SCI/UART/ACIA
KEB Combivert B6 B2A 0,75 kW 230 V	Renesas H8S/2612 HD64F2612FA	AI GND	20 MHz	128 kB	QFP-80	10	1x SCI, 1x HCAN
	Renesas H8/3052B F3052F25V	DC-	25 MHz	512 kB	QFP-100	10	2x SCI

Laite	Proessori	Potentiaali	Kellotaajuus (MHz)	ROM (kB)	Kotelo	ADC (bit)	Tuetut sarjaliikenneprotokollat
Mitsubishi FR-D720S 0,75 kW 230 V	Fujitsu MB91F487	-	40 MHz	512 kB	FPT-100	10	4x UART/I2C
Mitsubishi FR-E740 0,75 kW 400 V	I/O-kortilla: Fujitsu MB91F662	AI GND	33 MHz	512 kB	FPT-120	10	4x UART/CSIO/I2C, USB
	Ohjaukortilla: Mitsubishi FREQR0L CA1926H02 M20	DC-	-	-	-	-	-
Omron V1000 0,75 kW 230 V	Renesas SH7083F R5F70835FTV	AI GND	80 MHz	256 kB	QFP-100	10	1x SCI, 1x SCIF, 1x SSU, 1x I2C2
Omron V1000 0,75 kW 400 V	Renesas SH7083F R5F70835FTV	AI GND	80 MHz	256 kB	QFP-100	10	1x SCI, 1x SCIF, 1x SSU, 1x I2C2
Omron V1000 2,2 kW 400 V	Renesas SH7083F R5F70835FTV	AI GND	80 MHz	256 kB	QFP-100	10	1x SCI, 1x SCIF, 1x SSU, 1x I2C2
Omron VS mini J7 2,2 kW 400 V	Yaskawa 300-016-617 WC06000M65 V 8G1	DC-	-	-	-	-	-
Schneider Altivar 12 0,75 kW 230 V	Renesas M16C/64 R5F36400NFB	-	25 MHz	128-512 kB	QFP-100	10	6x UART/ASI/SSI/I2C/IEBUS/SIM, 2x SSI
Schneider Altivar 12 2,2 kW 230 V	Renesas M16C/64 R5F364xxxxx	-	25 MHz	128-512 kB	QFP-100	10	6x UART/ASI/SSI/I2C/IEBUS/SIM, 2x SSI
Schneider Altivar 312 0,75 kW 230 V	Renesas H8S/2612 HD64F2612	DC-	20 MHz	128 kB	QFP-80	10	1x SCI, 1x HCAN
Schneider Altivar 312 4,0 kW 400 V	Renesas H8S/2612 HD6432612	DC-	20 MHz	128 kB	QFP-80	10	1x SCI, 1x HCAN
YASKAWA A1000 2,2 kW 400V	Renesas SH7285 R5F72856FPV	AI GND	100 MHz	768 kB	LQFP-144	12	4x SCI, 1x SCIF, 1x SSU, 1x RCAN-ET, 1x I2C3, 1x USB2.0

Vertailun taajuusmuuttajien I/O-liitännät ja -protokollat

Laite	DI	DO	AI	AO	Muut I/O:t	Muut liitännät	Optiot
Danfoss VLT MicroDrive FC51 0,75 kW 230 V	5	0	2	1	1 RO, 1 pulse train input	RS485/Modbus RTU	-
Danfoss VLT MicroDrive FC51 0,75 kW 400 V	5	0	2	1	1 RO, 1 pulse train input	RS485/Modbus RTU	-
Danfoss VLT MicroDrive FC51 2,2 kW 400 V	5	0	2	1	1 RO, 1 pulse train input	RS485/Modbus RTU	-
Hitachi X200 0,75 kW 230V	5	1	1	1	1 RO	RS485/Modbus RTU	Profibus, CANopen
Hitachi X200 0,75 kW 400V	5	1	1	1	1 RO	RS485/Modbus RTU	Profibus, CANopen
Hitachi X200 2,2 kW 400V	5	1	1	1	1 RO	RS485/Modbus RTU	Profibus, CANopen
KEB Combivert B6 A2A 0,75 kW 230 V	5	1	1	1	1 RO	RJ45 (PC)	-
KEB Combivert B6 A3A 1,5 kW 400 V	5	1	1	1	1 RO	RJ45 (PC)	-
KEB Combivert B6 A3B 4,0 kW 400 V	5	1	1	1	1 RO	RJ45 (PC)	-
KEB Combivert B6 B2A 0,75 kW 230 V	1	1	0	0	1 RO	RJ45 (PC), CAN	-
Mitsubishi FR-D720S 0,75 kW 230 V	5	1	2	1	1 RO	RJ45 (RS485/Modbus RTU)	-
Mitsubishi FR-E740 0,75 kW 400 V	7	2	2	1	1 RO	RJ45 (RS485/Modbus RTU), USB	CANopen, CC-Link, DeviceNet, LONWorks, Profibus-DP
Omron V1000 0,75 kW 230 V	6	2	4	1	1 RO, 1 pulse train input, 1 pulse train output, Safe disable input	RS485/MEMOBUS/Modbus, RJ45 (PC), Remote panel	CANopen, DeviceNet, Mechatrolink 2, Profibus-DP
Omron V1000 0,75 kW 400 V	6	2	3	1	1 RO, 1 pulse train input, 1 pulse train output, Safe disable input	RS485/MEMOBUS/Modbus, RJ45 (PC), Remote panel	CANopen, DeviceNet, Mechatrolink 2, Profibus-DP
Omron V1000 2,2 kW 400 V	6	2	3	1	1 RO, 1 pulse train input, 1 pulse train output, Safe disable input	RS485/MEMOBUS/Modbus, RJ45 (PC), Remote panel	CANopen, DeviceNet, Mechatrolink 2, Profibus-DP
Omron VS mini J7 2,2 kW 400 V	5	0	1	1	1 RO	-	RS422/RS485
Schneider Altivar 12 0,75 kW 230 V	4	1	1	1	1 RO	RJ45 (PC, Modbus)	-
Schneider Altivar 12 2,2 kW 230 V	4	1	1	1	1 RO	RJ45 (PC, Modbus)	-
Schneider Altivar 312 0,75 kW 230 V	6	0	3	1	2 RO	RJ45 (PC/Modbus/CANopen)	CANopen Daisy chain, DeviceNet, Profibus-DP
Schneider Altivar 312 4,0 kW 400 V	6	0	3	1	2 RO	RJ45 (PC/Modbus/CANopen)	CANopen Daisy chain, DeviceNet, Profibus-DP
YASKAWA A1000 2,2 kW 400V	8	2	3	2	2 RO, 1 pulse train input, 1 pulse train output, Safe disable input, Safety electric device monitor	RS485/RS422/MEMOBUS/Modbus, 2x RJ45 (PC), USB (PC), 3x extension I/O	CANopen, CC-link, DeviceNet, LONWorks, Mechatrolink 2, Profibus-DP

Vertailun laitteiden apujännitelähteissä käytetyt tehotransistorit

Laite	MOSFET	Kotelo
Danfoss VLT MicroDrive FC51 0,75 kW 230 V	ST VIPER 20A	DIP-8
Danfoss VLT MicroDrive FC51 0,75 kW 400 V	2SK2225	TO-3P
Danfoss VLT MicroDrive FC51 2,2 kW 400 V	2SK2225	TO-3P
Hitachi X200 0,75 kW 230V	2NK1317	TO-3P
Hitachi X200 0,75 kW 400V	2NK1317	TO-3P
Hitachi X200 2,2 kW 400V	2NK1317	TO-3P
KEB Combivert B6 A2A 0,75 kW 230 V	ICE2A165	DIP-8
KEB Combivert B6 A3A 1,5 kW 400 V	STFW4N150	TO-3P
KEB Combivert B6 A3B 4,0 kW 400 V	STFW4N150	TO-3P
KEB Combivert B6 B2A 0,75 kW 230 V	ICE2A165	DIP-8
Mitsubishi FR-D720S 0,75 kW 230 V	MIP0233SY	TO-220
Mitsubishi FR-E740 0,75 kW 400 V	2SK2225	TO-3P
Omron V1000 0,75 kW 230 V	MIP3E3SMY	TO-220
Omron V1000 0,75 kW 400 V	2SK2225	TO-3P
Omron V1000 2,2 kW 400 V	2SK2225	TO-3P
Omron VS mini J7 2,2 kW 400 V	2SK2225	TO-3P
Schneider Altivar 12 0,75 kW 230 V	ICE3A0565Z	DIP-8
Schneider Altivar 12 2,2 kW 230 V	ICE3A0565Z	DIP-8
Schneider Altivar 312 0,75 kW 230 V	2SK1340	TO-3P
Schneider Altivar 312 4,0 kW 400 V	2SK3747	TO-3P
YASKAWA A1000 2,2 kW 400V	2SK2225	TO-3P