

KARELIA-AMMATTIKORKEAKOULU  
Sähkötekniikan koulutusohjelma

Joni Holopainen

KOLMIVAIHEINEN SINIAALTOINVERTTERI

Opinnäytetyö  
Toukokuu 2013



**OPINNÄYTETYÖ**  
**Toukokuu 2013**  
**Sähkötekniikan koulutusohjelma**

Karjalankatu 3  
80200 JOENSUU  
p. (013) 260 6800

**Tekijä**  
Joni Holopainen

**Nimeke**  
Kolmivaiheinen siniaaltoinvertteri

**Tiivistelmä**

Tämän opinnäytetyön tarkoituksena oli perehtyä vaihtosähkön tuottamiseen tasasähköstä vaihtosuuntaimen avulla, perehtyä eri tekniikoihin ja toteutustapoihin. Lisäksi tarkoituksena oli tutkailla mahdollisuutta toteuttaa itse kolmevaiheinen siniaaltoinvertteri hakkuritekniikkaa hyödyntäen. Eräs syy työn toteuttamiselle oli kiinnostus kehittää vaihtoehtoisille energianlähteille käyttökelpoinen sovellus kolmevaiheisen vaihtosähkön tuottamiseksi.

Lähtökohtana oli selvittää suunnittelun vaatimuksia ja laitteiston valmistukseen liittyviä seikkoja. Työssä perehdyttiin vaihtosuuntaimien eri toteutustapoihin ja niiden ominaisuuksiin. Tarkemman tarkastelun kohteeksi otettiin invertterin eri komponentteja ja käytiin läpi teoriaa niiden mitoituksesta ja ominaisuuksista. Lisäksi työssä tutkailtiin myös osittain valmistuskustannusten muodostumista ja hintaluokkaa.

Työn tuloksista voi päätellä kannattaako hakkurityyppisen kolmevaiheisen siniaaltoinvertterin toteuttaminen tässä mittaluokassa. Tuloksista voi myös nähdä suuntaa antavaa tietoa invertterin valmistamisesta aiheutuvasta työmäärästä.

**Kieli**  
suomi

Sivuja 57  
Liitteet 4  
Liitesivumäärä 5

**Asiasanat**

tehoelektroniikka, vaihtosähkön tuottaminen, invertteri



**THESIS**  
**May 2013**  
**Degree Programme in Electrical Engineering**

Karjalankatu 3  
80200 JOENSUU  
Tel. +358 13 260 6800

Author  
Joni Holopainen

Title  
Three-phase power inverter

#### Abstract

The purpose of this thesis was to study methods for generating alternative current from direct current, using a power inverter. It also studied different techniques to manufacture inverters. A further goal was to study the possibility of manufacturing three-phase power inverters using high frequency switching technology. One reason to do this was an interest in designing a viable method for producing three-phase electricity from renewable power sources.

The core of the thesis was to clarify the design and manufacture of power inverters. In the thesis various methods for manufacturing power inverters were studied. A more detailed view was taken for various components of the inverter and theories for designing those. In addition, the costs of manufacturing and methods for calculating inverter price were studied.

The results of the thesis discuss the benefits and drawbacks in manufacturing three-phase inverters, in small scale, using high frequency switch technology. The results also discuss, at a basic level, the effort required to manufacture the inverters.

Language

Finnish

Pages 57

Appendices 4

Pages of Appendices 5

Keywords

power electronics, generating alternative current, power inverter

## Sisältö

1	Johdanto.....	6
2	Invertteri.....	7
3	Invertterin perustekniikoita.....	8
3.1	Yleistä.....	8
3.2	Eri tekniikoiden vertailua.....	9
3.2.1	Kanttiaalto.....	9
3.2.2	Modifioitu siniaalto .....	11
3.2.3	Siniaalto .....	12
3.3	EMC-vaatimuksia.....	15
4	Suunnittelun vaatimuksia.....	17
4.1	Turvallisuus.....	17
4.2	Sähköstandardien huomiointi.....	18
4.3	Energiatehokkuus.....	19
4.4	Kustannustehokkuus.....	20
5	Invertteri lohkoina.....	22
5.1	Pienjännitepuoli.....	23
5.1.1	Ohjauspiiri.....	23
5.1.2	Hakkuriosa ja taajuus.....	24
5.1.3	Muuntaja.....	27
5.1.4	Takaisinkytkentä.....	30
5.2	Korkeajännitepuoli.....	31
5.2.1	Tasasuuntaus.....	31
5.2.2	Siniaallon muodostaminen.....	32
5.2.3	Suotoprosessi.....	33
5.2.4	Monitorointi.....	36
6	Suunnittelu.....	37
6.1	3-Vaiheisuuden lisävaatimuksia.....	37
6.2	Ohjauksen toteutus.....	38
6.3	Muuntaja.....	40
6.3.1	Materiaalin valinta.....	41
6.3.2	Mitoitus.....	42
6.4	Hakkuri.....	47
6.5	Jännitteen tasasuuntaus.....	49
6.6	Pääteaste .....	51
6.7	Jännitteen vakavointi.....	53
7	Invertterin valmistuskustannuksia.....	54
8	Loppupäätelmät.....	56
	Lähteet.....	57

### Liitteet

Liite 1.	Mikrokontrollerin datalehden ensimmäinen sivu
Liite 2.	Muuntajan sydänmateriaalin tietoja
Liite 3.	Hakkurin mosfetin tietoja
Liite 4.	IGBT-moduulin tietoja

## Käytetyt merkinnät ja lyhenteet

AC	Alternating current, vaihtosähkö
DC	Direct current, tasasähkö
EMC	Electromagnetic compatibility, sähkömagneettinen yhteensopivuus
IGBT	Insulated Gate Bipolar Transistor, hilaeristetty bipolaaritransistori
PWM	Pulse width modulation, pulssinleveys modulaatio
THD	Total harmonic distortion, kokonaisharmoninen särö
UPS	Uninterruptible Power Supply, varavirtalähde

## 1 Johdanto

Työn tarkoituksena oli selvittää erilaisia ratkaisuja vaihtosähkön tuottamiseksi tilanteisiin, jossa sitä ei ole saatavilla. Työssä tutustuttiin samalla erilaisiin toteutustapoihin ja tekniikoihin, joiden avulla vaihtosuuntaimia on toteutettu. Näkökantana työssä oli se, että onko oman hakkuritekniikalla toimivan vaihtosuuntaimen toteuttaminen mahdollista ja kustannustehokasta.

Työssä otettiin hakkuritekniikka tarkempaan tarkasteluun, sillä se tarjoaa kustannustehokkaimman ratkaisun vaihtosuuntaimen valmistamiseksi. Lisähaasteeksi työhön asetettiin kolmevaiheisuuden mukaan tuonti, sillä valmiita hakkurityyppejä vaihtosuuntaimia ei juurikaan valmisteta kolmevaiheisena. Suurimmat syyt tähän löytyvät siinä, että harvoin tarvitaan kolmevaihteista sähköä siellä missä sähköverkko ei yllä. Myös lisäkustannukset harvoin tarvittavasta lisästä edesauttavat sitä, että tämän tyyppisiä inverttereitä ei juurikaan valmisteta.

Tavoitteena olikin siis selvittää, miten siniaaltoinvertterin saisi kustannustehokkaiden valmistettua hyvällä hyötysuhteella ja käyttöominaisuuksilla. Työssä ei tarkemmin suunniteltu valmistaa invertteriä vaan pohdittiin mitkä komponentit olisivat balanssissa laitteen hinnan ja käytettävyyden kanssa.

Johtuen suhteellisen tuoreesta ja jatkuvasti kehityksen alla olevasta tehoelektronikan osa-alueesta, lähdeaineisto oli poikkeuksetta englannin kielistä. Myös allekirjoittaneen työhistoria elektronikan ja sähkökomponenttien parissa on syynä, miksi monet opinnäytetyössä olevat asiat on esitetty kokemuksella saadulla tiedolla.

## 2 Invertteri

Viimeisen sadan vuoden aikana sähkönsiirron standardiksi on muodostunut vaihtosähkö. Tästä johtuen monet kodin ja teollisuuden sähkölaitteet tarvitsevat vaihtosähköä. Tämä aiheuttaa ongelmia alueilla joihin sähköverkko ei yletä tai siihen ei haluta syystä tai toisesta liittyä.

Vaihtosähköä on käytetty muutaman tärkeän syyn takia. Ensimmäinen syy on, että jännitteen muuntaminen on suhteellisen helppoa vaihtosähköllä. Näin ollen sähköverkoissa jännitettä ollaan voitu pitää korkeampana ja muuntajalla laskea jännite käyttäjälle sopivaksi. Toiseksi käytännössä kaikki kulutettava verkkosähkö tuotetaan pyörivillä generaattoreilla, jotka tuottavat pyöriessään vaihtosähköä.

Kuitenkin tasasähköstä voidaan tehdä vaihtosähköä invertterillä. Invertteri eli vaihtosuuntain muuntaa tasasähkön (DC) vaihtosähköksi (AC). Inverttereitä on moneen tarkoitukseen. Pienimmät invertterit tekevät akkusähköstä verkkosähköä kohtalaisella hyötysuhteella hyvin pieneen kulutukseen sopivaksi. Toisaalta taas inverttereitä käytetään myös sähkönsiirrossa, jos halutaan yhdistää tasasähkölinja perinteiseen sähköverkkoon. [1.].

Lisäksi inverttereitä käytetään varavirtalähteissä (UPS), joiden tarkoituksena on turvata katkeamaton sähkönsyöttö akkuvirran avulla. Tämän tyyppisellä laitteistolla pystytään periaatteessa tekemään sähköistys alueelle, jossa sähköverkkoon ei ole syystä tai toisesta liitytty. Kuitenkin tällaisen laitteiston tulojännite on yleensä 230 V ja lähtöjännite myös. Tämä muodostaa ongelman sillä akustoihin on tuotettava sähköä ja haja-asutusalueille sopivat ratkaisut tuottavat UPS:lle liian pientä jännitettä.



Kuva 1. Siniaaltoinvertteri, jossa myös lataustoiminto akkuja varten (Studer)

Valmiita kaupallisia ratkaisuja tähän tarkoitukseen löytyy, mutta laitteistot ovat todella kalliita jopa suhteutettuna sähköverkkoliittymän hintaan. Näiden laitteistojen hintahaitari alkaa yleensä 1€/w. Perinteinen omakotitalon liittymäkoko on 3x25A, joten tällaisen laitteiston hankintahinta kasvaa liian suureksi. Ellei kyseessä ole todella erikoistapaus verkon suhteen, jolloin tarvittavan invertterin ja generaattorin hankintahinta olisi pienempi, kuin sähköliittymän hankinta. [2.].

### 3 Invertterin perustekniikoita

#### 3.1 Yleistä

Invertterit voidaan jakaa karkeasti kolmeen eri tyyppiin: ns. kanttiaalto, modifioitu siniaalto ja siniaalto. Luonnollisesti kanttiaalto invertteri on yksinkertaisin ja siniaalto on monimutkaisin, tämän johdosta myös siniaaltoinvertterin hinta on kalliimpi.



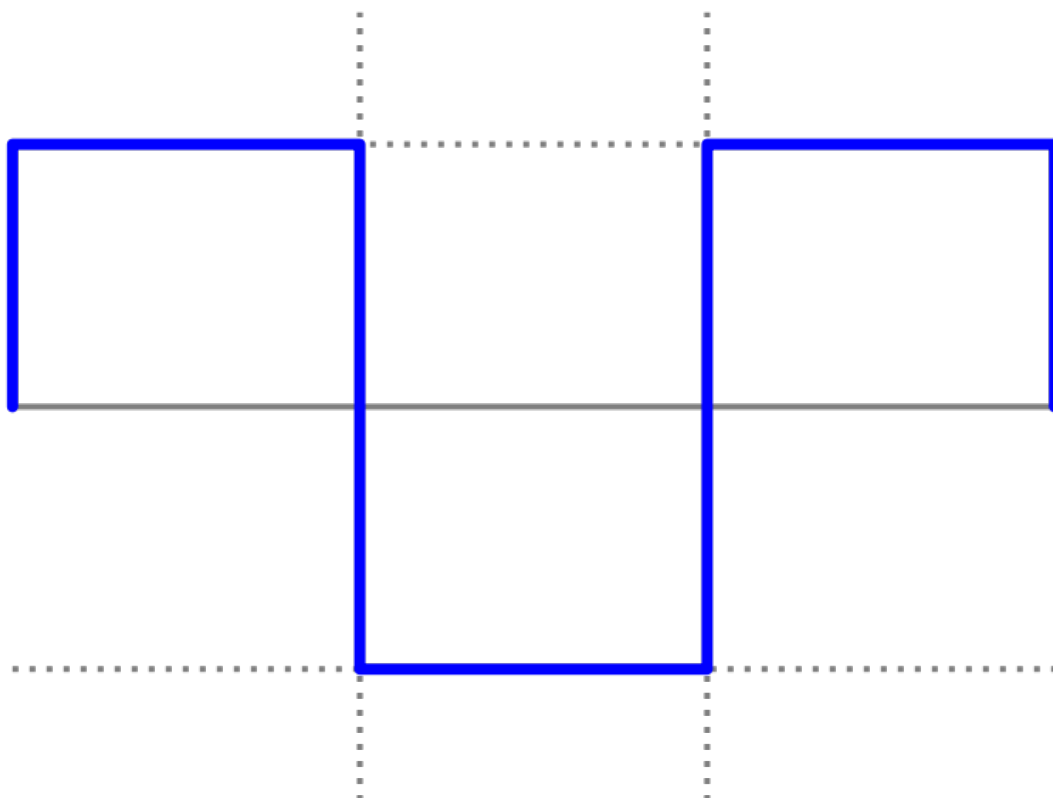
Riippuen käyttökohteesta, voidaan valita näiden eri inverttereiden väliltä. Puhtaasti resistiiviset kuormat eivät ole juurikaan välitä onko syötetty sähkö siniaaltoa vai kanttiaaltoa. Sen sijaan induktiivisilla kuormilla ja tehoelektronikalla tilanne on toinen ja nämä melkeinpä vaativat siniaalto syötön. Tosin tämäkin on laitekohtaista.

Jos invertterillä halutaan korvata sähköliittymä voidaan olettaa, että jatkossa tarvitaan siniaaltoinvertteri. Tämä sen takia, että kuluttajan ei tarvitsisi miettiä voinko käyttää tätä sähkölaitetta omassa käytössäni. Myös maallikon näkökulmasta perinteisen verkkovirran kaltainen sähkö on paras ratkaisu, sillä se ei aiheuta suurta päänvaivaa.

## **3.2 Eri tekniikoiden vertailua**

### **3.2.1 Kanttiaalto**

Kanttiaaltoinvertteri nimensä mukaisesti tuottaa kantiinmuotoista jännitettä. Tällaisessa invertterissä ohjausjaksoja on vain kaksi kappaletta jaksonaikaa kohden. Jännite on puolet jaksonajasta 230V ja toisen puolen -230V. Tämä poikkeaa perinteisestä vaihtovirrasta siten, että siniaallon muotoisessa jännitteessä nimellisjännite on 230V ja huippujännite noin. 325V. Kanttiaallon eräänä huonona puolena on se, että puoliaaltojen vaihtuessa jännite-ero on 460V.



Kuva 2. Kanttiaalto (Wikimedia Commons)

Toteutustavasta riippuen tässä vaiheessa syntyy kytkentäsäröä ja käytettävään laitteeseen kohdistuu erittäin suuret sähkömotoriset voimat. Tämän takia olisikin hyvä, että puoliaaltojen vaihtuessa olisi todella pieni hetki jolloin jännitetaso on kirjaimellisesti nollassa. Jos tätä toimenpidettä ei suoriteta, tämä kuormittaa liikaa laitteita joissa on käämejä ja esimerkiksi moottorien käämitykset löystyvät. Sama pätee myös 50Hz toimivia muuntajia.

Tämä ilmiö tapahtuu myös perinteisellä verkkovirrallakin, mutta laitteen vanheneminen on huomattavasti hitaampaa. Jos tätä ilmiötä ei oteta kanttiaaltoa käytettäessä huomioon, vanhenevat induktioon perustuvat laitteet huomattavasti nopeammin mitä vastaavassa verkkovirtaympäristössä.

Etenkin yksivaiheiset moottorit eivät pidä kanttiaallon muotoisesta virrasta, vaan käynti on erittäin epämääräistä. Kanttiaallon ominaispiirteenä voidaan pitää erittäin suurta häiriötä. Tämän tyyppisen jännitelähteen THD arvo lähentelee

45%, kun verkkovirran maksimiarvona voidaan pitää 3%. Myös yhtään harmonista-aaltoa ei voida kanttiaallolla hävittää, sillä kanttiaalto sisältää kyseiset harmoniset yliaallot. [1.].

### 3.2.2 Modifioitu siniaalto

Modifioitu siniaalto on kanttiaaltoa jonka reunoja on pyöristetty. Oikeastaan on väärä puhua modifioidusta siniaallosta, sillä ulostulosignaali muistuttaa enemmän kanttiaaltoa. Englannin kielessä tästä käytetään termiä ”*modified square wave*”, joka tarkoittaa modifioitua kanttiaaltoa. Modifioitu siniaalto onkin jäänyt vain elämään terminä suomenkieleen.

Pyöristäminen voidaan toteuttaa monella tapaa. Kirjaimellinen signaalin pyöristäminen olisi varmin, mutta jos ulostulosignaalia haluttaisiin pyöristää tällä tavoin. Jouduttaisiin tehoa hukkaamaan turhaan pääteasteessa, lisäksi täydellä teholla tässäkin syntyisi luultavasti turhaa säröä ja tehoa menisi hukkaan. Voidaankin olettaa, että käytännössä kaikki invertterikäytöt ovat akkujen varassa tai erittäin pienen energian tuotannon päässä. Tämän takia on hankala suosia menetelmää, joka hukkaa jokaisella jaksonajalla osan tuotetusta tehosta lämmöksi.

Energiatehokkuuden kannalta edellä mainittu ratkaisu olisi todella huono, ellei syntynyttä hukkalämpöä saataisi käytettyä lämmitykseen. Lisäksi ratkaisu on erittäin hankala toteuttaa suuremmassa teholuokassa. Yleisemmin käytetty keino onkin jakaa ulostulojännite jänniteportaisiin.

Yksinkertaisin ratkaisu on käyttää neljää ohjaussignaalia jaksonaikaa kohden. Tällöin ulostulojännite poikkeaa kanttiaallosta siten, että jokaista jaksonaikaa kohden on kaksi nollakohtaa. Tämä poikkeaa edellisessä kappaleessa mainitusta siten, että ns. nollajakson aika on noin puolet jännitejakson ajasta. Tällaista ratkaisua kutsutaan 3-portaiseksi kanttiaalloksi. Tällä ratkaisulla THD arvoksi saadaan >23,8%. Lisäksi kaikki kolmella jaolliset harmoniset yliaallot

häviävät tällä menetelmällä.

Seuraava parannus edelliseen ohjaukseen on lisätä kaksi porrasta lisää eli saamme 5-portaisen kanttiaallon. Ohjaussignaalien määrä kasvaa kahdeksaan tällaisessa ratkaisussa ja toteutus muutenkin hankaloituu. Sillä nyt pitäisi kehittää jänniteporras, joka on n. 115V.

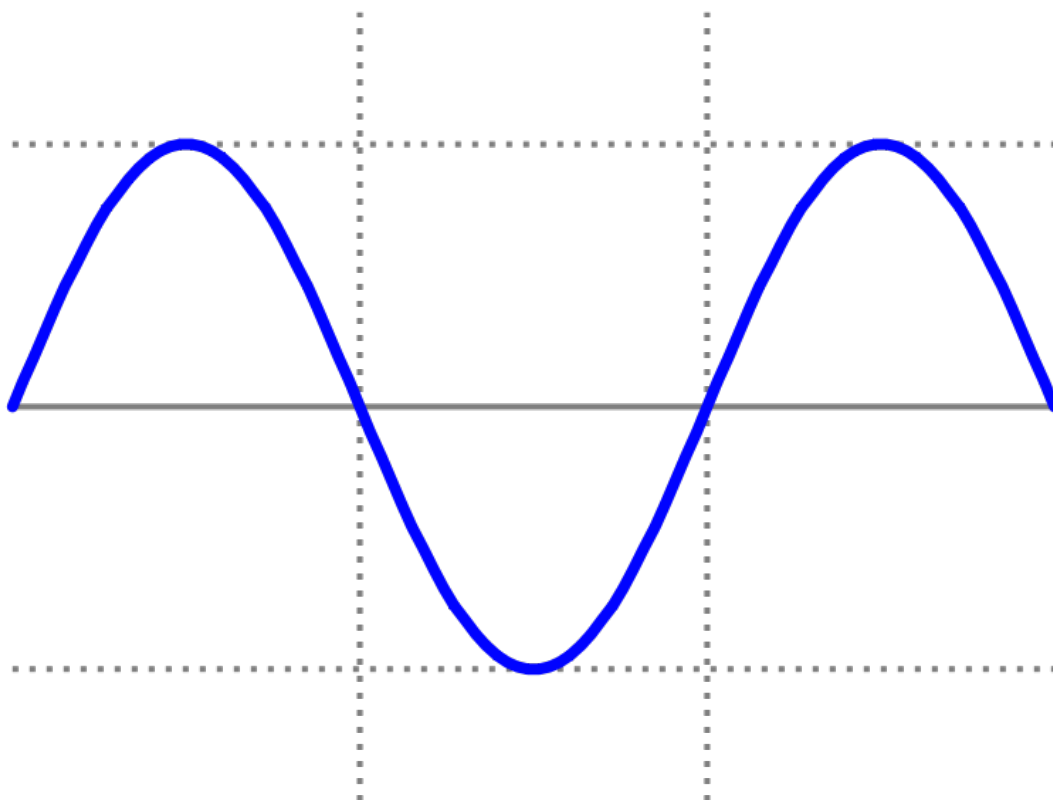
Vastuksiin eikä päätteeseen tehoa ei kannata hukata missään nimessä, vaan tällaisessa toteutuksessa olisi helpointa käyttää muuntajaa, jossa on joko ensiössä tai toisiossa ylimääräinen käämitys. Tämä siksi, että näin saataisiin suhteellisen helposti sopiva tosiojännite jos esimerkiksi käämikytkimellä lisättäisiin ensiöön kaksinkertainen käämien kierrosluku.

Tosin tällaisessa ratkaisussa tulee muuntajalle hintaa ja tarvitaan luultavasti erikoisvalmisteinen muuntaja. Eikä tämä ole oikeastaan kustannustehokas vaihtoehto. Toisena vaihtoehtona on käyttää kondensaattoreita jänniteväliportaiden muodostamiseen. Tällöin ei tarvita muuntajaan ylimääräistä käämistä, kuitenkin kytkentä monimutkaistuu hieman ja se asettaa suunnittelulle lisäkriteerejä.

Hyvänä puolena 5-portaisessa jänniteratkaisussa on se, että kaikki kolmella jaolliset ja 5. harmoninen yliaalto häviää pois. Huonona puolena taas 7, 11, jne olevat yliaallot korostuvat. THD arvoksi saamme >6,5%. [1.].

### **3.2.3 Siniaalto**

Siniaallon toteuttamiseksi on monta hyvin erilaista tapaa. Eräs erittäin mielenkiintoinen toteutustapa on sveitsiläisen Studerin invertteri. Siinä siniaalto tehdään pienjännitepuolella, josta jännite syötetään toroidimuuntajiin. Muuntajat ovat 50Hz toimivia muuntajia, jotka eivät juuri eroa verkkokäyttöön tarkoitetuista kuin ensiö- ja tosiojännitteillään.



Kuva 3. Siniaalto (Wikimedia Commons)

Tällainen ratkaisu hyvin toteutettuna tuottaa erittäin puhdasta ja virheetöntä siniaaltoa, mikäli muuntajat ja kytkentä on suunniteltu invertteriin sopivaksi. Tällainen ratkaisu on tosin tilaa vievä ja ei sovellu helposti siirrettäväksi. Kaiken lisäksi 50Hz muuntajien käyttäminen on kallista verrattuna ferriittimuuntajiin rakennekustannusten puolesta. Toisaalta tällaisessa ratkaisussa yliaallot ja häiriöt saadaan soudettua päätemuuntajissa pois, mikäli mitoitus tehdään oikein.

Hinnasta ja rakenteesta huolimatta tämän tyyppisen ratkaisun hyviin puoliin kuuluu induktiivisten kuormien sieto. Koska energia varautuu suhteellisen hitaasti magneettivuon avulla muuntajan sydämeen, tämä toimii hyvänä puskurina käynnistäessä esimerkiksi moottoreita. Kuitenkin tämän tyyppisen ratkaisun ohjaaminen on erittäin vaativaa ja muistuttaa audiovahvistinta.

Hyötysuhteen puolesta kyseinen ratkaisu ei välttämättä ole kovin energiatehokas. Muuntajan ohjaukseen käytetään periaatteessa samanlaista vahvistinkytkentää mitä audiovahvistimissa. Jos kyseinen kytkentä tehdään A-luokassa maksimi hyötysuhde vahvistinkytkennässä voi olla enintään 25%. AB-luokassa teoreettinen hyötysuhde on noin 75%. Jos kyseessä on muutamien satojen wattien tehoinen invertteri voidaan ohjaukseen käyttää AB-luokan vahvistinta.

Parempi ratkaisu on käyttää D-luokan vahvistinta, jossa pääteasteessa komponentit toimivat kytkiminä eli johtavat tai eivät. Tässä luokassa päästään jopa 95% hyötysuhteeseen. Tosin tässä on vain pääteasteen hyötysuhde. Kokonaishyötysuhde laskee, koska muuntajat eivät ole ideaalikomponentteja vaan niissä on häviöitä. Kuitenkin laadukkailla muuntajilla voitaisiin päästä erittäin hyvään n.90% hyötysuhteeseen. Haittapuolena on erittäin kalliit muuntajat ja oheiskomponentit.

Aiemmissä esimerkeissä ensiöpuolen ohjauksella saadaan suoraan toisiosta käytettävä vaihtojännite. Monimutkaisimmissa ratkaisuissa ensin ensiöjännite nostetaan hakkuriosan avulla, josta se tasasuunnataan n.325V tasajännitteeksi. Tämän jälkeen jännitettä hakataan pulssinleveysmodulaatiolla eli PWM:llä. Tämä on periaatteessa samanlainen toimintaperiaate kuin aiemmin mainitussa D-luokan vahvistimessa.

Tässävaiheessa pitää huomioida, että PWM:llä tuotettu signaali ei todellakaan ole sinimuotoista. Jännitetaso ei myöskään vaihtelee muuta kuin nollan ja huippujännitteen välillä. Siniaallossa jännite vaihtelee jatkuvasti ja pulssinleveysmodulaatiossa ei. Pulssinleveysmodulaatiossa ainoastaan jännitteen kesto vaihtelee. Tarvitaan keinoja, miten ulostulojännite saadaan vaihtelevaan siniaallon tavalla.

Kumpaakin puolialtoa kohden tarvitaan useampi ohjauspulssi. Pulsseilla ohjataan pääteastetta johtaako se vai ei. Pulssinleveydet eivät tässä ratkaisuissa ole jatkuvasti samanleveyisiä, vaan ne noudattavat tiettyä kaavaa.

Ohjaussignaalin tekemiseen tarvitaan komparaattoria. Komparaattori vertailee kahden eri tulon tasoa toisiinsa. Tässä tapauksessa komparaattorille syötetään 50Hz siniaaltoa ja huomattavasti korkeampitaajuisista kolmio- tai saha-aaltoa nopeaa ohjausta varten.

Tästä saamme ulostulona 1-bittistä kanttiaaltoa jolla voidaan ohjata pääteastetta. Koska pääteaste toimii pelkkänä kytkimenä on hyötysuhde suhteellisen hyvä. Toisaalta päätteestä saatava ulostulojännite ei täytä tarvittavia standardeja, eikä sitä tulisi käyttää ilman suotoa.

Alipäästösuotimella voidaan ja pitääkin poistaa PWM:ssä syntyneet korkeat taajuudet pois jännitteestä siten saadaan, että oskilloskoopilla katsottaessa jännite näyttää olevan lähes siniaallon muotoista. Ulostulojännitteen puhtaus on suoraan verrannollinen syötetyn ohjaustaajuuden mukaan. Mitä korkeampi taajuus sitä enemmän siniaallolta lopputulos näyttää.

### **3.3 EMC-vaatimuksia**

EMC (*electromagnetic compatibility*) eli sähkömagneettinen yhteensopivuus on eräs erittäin tärkeä seikka sähkölaitteiden käytössä ja suunnittelussa. Suomeksi tämä tarkoittaa laitteiston tai kojeen kykyä toimia luotettavasti suunnitellulla tavalla, tällöin tuotetun sähkömagneettisen häiriön tulee kuitenkin säilyä kohtalaisena. Ohjeistuksena EMC-vaatimusten täyttämiseen valmistajille on Euroopan parlamentin ja neuvoston direktiivi 2004/108/EY.

Sähkömagneettisia häiriöihin tulee kiinnittää huomiota, sillä väärin toimivat laitteet aiheuttavat kohtuutonta haittaa muille käyttäjille ja ympäristölle. Invertterissä syntyy pääasiassa RF-häiriöitä, magneettisia häiriöitä ja maadoitushäiriöitä. RF-häiriöt eli radiotaajuushäiriöt syntyvät hakkuriosan suuresta kytkentätaajuudesta, sekä myös siniaallon muodostuksessa tarvittavasta PWM-säädöstä. Magneettiset häiriöt puolestaan syntyvät muuntajissa ja suotokuristimissa, koska energia ei siirry magneettikentästä

täysin takaisin käämeihin.

Invertterin ollessa kyseessä koteloinnilla voidaan hävittää suurin osa EMC-häiriöistä. Kotelon materiaali on suuressa roolissa häiriöiden leviämisen estämiseksi. Jos kotelo on sähköä johtavaa materiaalia toimii kotelo Faradayn häkkinä. Faradayn häkki on yksinkertaisesti selostettuna häkki tai kuori, joka estää sähkömagneettisen säteilyn pääsyn suuntaan tai toiseen. Kuitenkin kotelossa olevat reiät voivat aiheuttaa tilanteen, missä häiriötaajuus pääsee ulos. [3.].

Tämän takia esimerkiksi jäähdytystä varten olevat tuuletusaukot päästävät häiriötaajuuksia läpi, mikäli tuuletusaukkojen koko on väärä suhteessa häiriötaajuuden aallonpituuteen. Koska jäähdytys on erittäin ratkaisevassa osassa laitteen toiminnan kannalta, tuleekin erityistä häiriötä aiheuttavat komponentit suojata erikseen omalla Faradayn häkillä jotta jäähdytys voitaisiin järjestää normaalisti. Tämä myös siksi, että vaikka häiriöt eivät pääsisi ulos laitteen sisältä voivat nämä häiriöt kuitenkin aiheuttaa häiriötä laitteen toiminnassa.

Myös komponenttien sijoittelulla on merkitystä. Ei pelkästään laitteesta ulostulevien häiriöiden kannalta, koska hakkurin ja siniaallon muodostus toimii erittäin korkealla taajuudella voi tämä ratkaisevasti häiritä invertterin ohjausta. Kaikkia häiriöitä ei pystytä pelkällä sijoittelulla hävittämään vaan lisäksi tarvitaan tärkeiden komponenttien ja johtoteiden suojausta. Käytännössä kaikki ohjauksen ja signaaleihin liittyvät johdotukset tehdään erittäin hyvin eristetyistä johdosta. Piirilevyllä puolestaan pidetään RF-häiriöitä aiheuttavat osat omana lohkonaan.



## 4 Suunnittelun vaatimuksia

### 4.1 Turvallisuus

Invertterin suunnittelussa on otettava huomioon turvallisuus. Laitteen tulee olla turvallinen käyttäjälle sekä ympäristölle. Lisäksi riittävästi eristyksestä on pidettävä huoli ettei missään mahdollisessa tilanteessa päästä koskemaan jännitteellisiin osiin. Mahdollisessa vikatilanteessa myös turvajärjestelmät on suunniteltava hyvin.

Voidaankin siis olettaa, että käyttäjä ei ole sähköalan ammattilainen, joten invertterin tulee tarjota samanlaista ja yhtä turvallista sähköä kuin verkkovirtakin oikein käytettynä. Käytöstä ei saa aiheutua yhtään enempää hankaluutta käyttäjälle mitä verkkovirran käytöstä. Myös mahdolliset käyttäjän aiheuttamat vikatilanteet tulee ennakoida laitteiston suunnittelussa.

Käytännössä suunnittelussa tulee noudattaa kansallisia sähköalan standardeja, lisäksi komponenttien asettelulla on myös merkitsevä osuus laitteen turvallisuuden kanssa. Laitteen tulee olla suunniteltu ja valmistettu siten, että se täyttää kansalliset vaatimukset ja näin ollen läpäisisi sille tehtävät testit.

Laitteessa sähkö ei ole ainoa vaaratekijä vaan myös lämpökuormat tulevat olemaan merkittävät. Suhteellisen hyvästä hyötysuhteesta huolimatta puolijohteet lämpenevät todella kuumiksi ja ilman oikeanlaista jäähdytystä ne voivat aiheuttaa laitteiston rikkoutumisen lisäksi myös tulipaloriskin. Tämän ansiosta myös jäähdytykseen on kiinnitettävä huomiota turvallisuudenkin takia.

Sähköturvallisuus saadaan aikaiseksi pitämällä eri jännitetasojen välillä sopiva eristysväli, lisäksi pienjännitepuoli ja suurjännitepuoli tullaan erottamaan galvaanisesti toisistaan muuntajien avulla. Ension ja toision jännitteet eivät missään nimessä saa olla samassa potentiaalissa. Jos näin olisi, voisi vikatilanteessa pienjännitepuolelle tulla tappava jännite.

Lämpökuormaa saadaan vähennettyä lisäämällä aktiivisiin komponentteihin jäähdytysrimat. Muuntajien lämmönsietokykyä ja käämien elinikää voi parantaa yksinkertaisella tavalla. Muuntajat kannattaa valaa epoksihartsiin, jossa on tarpeeksi suuri lämmönkesto. Näin epoksi siirtää käämeissä syntynyttä resistiivisiä lämpöhäviöitä pois ilmaa paremmin.

Samalla epoksi sitoo muuntajan käämejä, jolloin sähkömotorisen voiman ansiosta käämit eivät pääse löystymään kellarungossa. Eliniän pidennyksen haittapuolena on se, ettei käämitystä päästä enää muuttamaan jos tarve sitä vaatisi sekä epoksi on ongelmajätettä.

## 4.2 Sähköstandardien huomiointi

Suomessa sähkölaitteita koskevat asetukset perustuvat eurooppalaisiin pienjännite- ja EMC-direktiiveihin. Lisäksi Suomessa on käytössä sähkölaitteistoja koskeva Kauppa- ja teollisuusministeriön asettama KTM-asetus 1193/1999 ([www.sähköala.fi](http://www.sähköala.fi)). Kuitenkin laitteistoja tuskin suunnitellaan pelkästään Suomen markkinoille pienen kysynnän vuoksi, joten kannattaa samalla suunnitella laite kansainvälisille markkinoille.

Sähkökäyttöön tarkoitetuissa laitteissa tulee Euroopan talousalueella olla CE-merkintä (*Conformité Européene*). Valmistajan tulee vakuuttaa, että valmistettu laite täyttää vaatimukset. Varsinaiset standardit ja vaatimukset sähkölaitteille määrittää CENELEC (*Comité Européen de Normalisation Électrotechnique*), joka on eurooppalainen standardisoimisjärjestö sähköalalle.

Nämä säädökset koskevat luonnollisesti myös invertteriä. Jos invertteri tullaan asentamaan kiinteästi tulee laite suunnitella siten, että sähköasennus vaatimukset täyttyvät. Kuitenkin johtuen invertterin hakkuritoimintaperiaatteesta suurin hankaluus on täyttää RF-häiriöitä ja jännitteen laatua koskevat vaatimukset. [4.].

Kaupallisessa käytössä invertteri tulisi hyväksyttävä kansallisella tutkimuslaitoksella, jotta laite varmasti täyttää kaikki standardit. Käytännössä laitevalmistajat itse hyväksyttävät ja takaavat laitteidensa toiminnan. Tosin näille laitteille tehdään aina välillä pistokokeita, jotta nähtäisiin pitääkö valmistajan väite standardien noudattamisesta paikkansa.

### **4.3 Energiatehokkuus**

Oletettavasti invertteriä tullaan käyttämään akkuvirralla, joten invertterin energiatehokkuuteen on kiinnitettävä paljon huomiota akkujen keston kannalta. Käytettiin invertterin energian lähteenä akkuja tai muuta energianlähdettä tulee energiatehokkuuden olla kunnossa.

Puhuttaessa kilowattiluokan invertteristä 90% hyötysuhteellakin häviötehon määrä on useita satoja watteja. Luonnollisesti tämä häviöteho muuttuu lämmöksi, eikä ole järkevää tuottaa sähköllä lämpöä jos kyseinen lämpö menee hukkaan hyödyntämättä.

Jos hyötysuhde on huonompi, lisääntyy häviötehon määrä entisestään. Invertteri tulisikin suunnitella mahdollisimman korkealla hyötysuhteella toimivaksi. Nykyiset kaupalliset invertterit toimivat n.80-90% hyötysuhteella, joten suunnitellessa uutta invertteria ei alle 80% hyötysuhdetta tule hyväksyä.

Siniaaltoinvertterissä kokonaishyötysuhdetta laskee siniaallon muodostaminen. Periaatteessa yksinkertaisimmassa kanttiaaltoinvertterissä hyötysuhde voi olla paras, sillä kyseisessä konstruktiossa on vähemmän komponentteja joihin tehoa häviää. Tämän takia komponentteihin ja suunnitteluun tulee kiinnittää erityistä huomioita.

Usean kilowatin invertteri haukkaa pelkällä tyhjäkäynnilläkin useita kymmeniä watteja energiaa. Rakenteesta riippuen kulutus voi olla suurempikin. Siniaaltoinvertterissä tyhjäkäyntikulutus on hieman suurempi. Kuitenkin

häviötehon määrä on suhteellista ja joissain tapauksissa voidaan se käyttää hyödyksi lämmityksessä.

Etenkin ympärivuotisessa käytössä ei hukkalämpö välttämättä ole pahaksi jos sillä saadaan muuten lämmitettyä kylmää teknistä tilaa. Tämän kokoluokan invertterin akuston tulee olla suhteellisen kattava jos sitä käytetään pitkiä aikoja kuormitettuna ilman latausta. Vaikka akkuja ladattaisiin jatkuvasti, tarvitsevat akut silti sopivan lämpötilan toimiakseen. Tämän seikan ansiosta kohtuullinen häviöteho on hyvästä, sillä se saadaan käytettyä laitteiston hyväksi.

Koska häviöttömiä komponentteja ei ole keksitty, hukkalämpö tulee olemaan osana invertterin käyttöä. Nyrkkisääntönä voidaan pitää mitä tehokkaampi invertteri on kyseessä, sitä enemmän tulee jäähdytykseen ja lämpökuormitukseen kiinnittää huomiota.

#### **4.4 Kustannustehokkuus**

Invertterin hinnan tulisi pysyä kilpailukykyisenä jotta sen hankkiminen olisi järkevää verrattuna sähköliittymään. Pelkästään ideologiset syyt invertterin hankintaan eivät riitä vaan sen hinta tulee saada kilpailukykyiseksi. Kyseessä on kuitenkin erityistarkoitusta varten oleva tuote jolloin hintakin nousee.

Kustannuksia saa parhaiten alas käyttämällä komponentteja joita löytyy yleisesti usealta valmistajalta. Erikoisvalmisteisten osien käyttöä tulisi kustannusmielessä välttää mahdollisimman paljon. Toisaalta jos tahdotaan tehdä hyvä siniaaltoinvertteri, kokoluokasta riippuen hakkuriosaan tarvittavat muuntajat menevät erikoisvalmistuksen piiriin. Valmiita muuntajia löytyy kuitenkin kohtuu hintaan. Toisaalta muuntajien valmistuttaminenkaan ei ole mahdottoman kallista, mikäli valmistuserät ovat sopivan kokoisia.

Yksinkertaisuus on kaunista, myös kustannusten kannalta. Komponenttien määrä tulee karsia minimiin suunnittelu- ja testausvaiheessa. Hakkuriosan ja pääteasteen komponentteja ei voi juuri karsia, mutta ohjauksen voi. Perinteisissä hakkureissa on käytetty joko erilliskomponentteja tai varta vasten suunniteltuja piirejä hakkurin ohjaukseen.

Ratkaisuksi ohjauspuolen komponenttien vähentämiseen löytyy mikrokontrolleista. Esimerkiksi Atmelin valmistamassa AVR-mikrokontrollereissa riittää tarpeeksi ominaisuuksia ja laskentakykyä vastatakseen kaikesta invertterin osien ohjauksesta. Lisäksi nämä ovat halpoja hankintahinnaltaan ja tarvitsevat hyvin vähän komponentteja toimiakseen. Etuina on myös muunneltavuus ja uudelleen ohjelmointi, jolloin voidaan parantaa ohjelmallisesti laitteistoa myöhemminkin.

Toisiopuolella tasasuuntaukseen voidaan käyttää peruskomponentteja joiden hinta ei kokonaiskustannuksissa huimaa päätä. Tietenkin on hyvä muistaa käyttää laadukkaita komponentteja joilla on riittävä jännitteen- ja lämpötilankesto. Tämä siksi, että muuten komponentit vanhenevat ennen aikojaan ja laitteen elinikä jää lyhyeksi. Usean tuhannen euron laitteessa jolta odotetaan 100% käyttövarmuutta tämä ei ole suotavaa.

Ulostulojännitteen muodostamiseen voidaan käyttää joko halpoja fettejä tai tarkoitukseen paremmin sopivia kolmevaiheisia IGBT moduuleita. Kyseiset IGBT moduulit ovat tosin kalliita. Vastaava toiminta saadaan myös aikaiseksi käyttämällä erilliskomponentteja, mutta niidenkin osalta hinta kasvaa riippuen miten ylimitoitettuja komponentteja käytetään.



Kuva 4. IGBT-moduuli ja IGBT erilliskomponentti TO-220 koteloinnilla

Jännitteen suotoon tarvittavaa valmista pakettia ei helpolla ja halvalla löydy. Kuitenkin peruskomponentit, joilla suoto saadaan tehtyä ovat suhteellisen halpoja. Siniaallon suotamiseen tarvittavat kuristimet, kondensaattorit ovat hyllytavaraa, mikäli alipäästösuodin mitoitetaan kustannustehokkaasti.

Ratkaisuja löytyy siis sangen helposti kustannusten laskemiseen. Pääasiassa muuntajat tulevat olemaan erikoisvalmisteisia. Ei pidä kuitenkaan unohtaa piirilevyä ja sen kasaamista, joista myös syntyy kustannuksia. Tosin huolellisella suunnittelulla tässäkin päästään pienempiin kustannuksiin. Hyvin pitkälti voidaan todeta, että invertterin osat yleistavaraa joita löytyy helposti ja kohtuu hintaan. Näistä seikoista johtuen hintakin asettuu kohtuulliselle tasolle.

## 5 Invertteri lohkoina

Seuraavissa osioissa käsitellään invertterin eri lohkoja. Invertteri on jaettu kahteen eri osaan, pienjännite- ja suurjännitepuoleen. Tärkeimmät komponentit tullaan käymään seuraavissa luvuissa.

## 5.1 Pienjännitepuoli

Invertterin pienjännitepuolena pidetään tässä tapauksessa puolta, jossa jännitetaso pysyy alle 50V DC:tä. Pienjännitepuoli kytkeytyy invertterissä käytännössä kaikkeen toimintaan. Tärkeimmät osat, jotka seuraavaksi käsitellään ovat ohjauspiiri, hakkuriosa ja muuntaja.

### 5.1.1 Ohjauspiiri

Ohjauspiiri vastaa invertterin toiminnasta ja sitä voidaan pitää melkein pä tärkeimpänä osana. Ohjaus voidaan toteuttaa monella eri tapaa riippuen invertterin tyypistä. Aiemmin on ollut järkevää käyttää erilliskomponentteja ohjauksen toteuttamiseen ja edelleenkin yksinkertaisessa invertterissä, joka tuottaa vain kanttiaaltoa tämä on sopiva ratkaisu.

Erilliskomponenttien käyttö on mikäli ei löydetä sopivaa integroitua piiriä ohjaukselta ei vaadita muuta kuin muuntajan ohjaus. Kuitenkin tarkoitukseen sopivia komponentteja on saavutella kohtuulliseen hintaan, joten erilliskomponenttien käyttö ei välttämättä ole kovinkaan järkevää.

Hakkurin ohjaukselta varten on olemassa lukematon määrä erilaisia kontrollereita. Kuitenkin valmiita järjestelmiä, jossa hakkuriosan sekä siniaallon muodostuksen ohjaus tehtäisiin ei juurikaan ole. Tässä vaiheessa ohjelmoitavat mikrokontrollerit tulevat erittäin mielenkiitoksiksi vaihtoehtoiksi.

Kontrollereiden käyttöä edesauttaa se, että perinteisessä erilliskomponenttikytkenässä toimintaa ei voida muuttaa kuin muuttamalla kytkentä. Mikrokontrollereilla voidaan ohjata suoraan komponentteja ja ohjaus perustuu ohjelmointiin, joka useimmiten perustuu C-kieleen.

Tässä opinnäytetyössä käsiteltävä kolmivaiheinen siniaaltoinvertteri on järkevää suunnitella käyttämään mikrokontrolleria, sillä muuten komponenttien määrä

piirilevyllä kasvaisi liian suureksi. Yksinkertaisuus on kaunista elektroniikan suunnittelussakin.

### 5.1.2 Hakkuriosa ja taajuus

Tässä luvussa käsitellään sopivaa kytkentätaajuutta, jolla muuntajia ohjataan sekä sopivaa kytkentää muuntajalle. Kuten aiemminkin on tähänkin olemassa monia eri vaihtoehtoja.

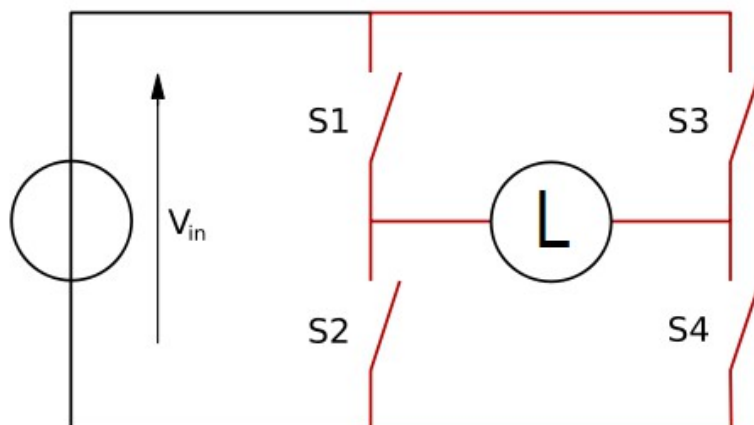
Riippuen hyötysuhteesta ja käytettävästä jännitteestä, voidaan esittää muutama esimerkki muuntajalle sopivasta ohjauksesta. Näissä kaikissa kytkentätyypeissä transistoreja tai fettejä käytetään kytkimen tapaan, eli kytkin on joko auki tai kiinni. Näin siksi, että vältetään turha hukkalämpö. Sillä transistori ei toimi kyseisessä tapauksessa säätyvänä vastuksena.

Yksinkertaisin tapa ohjata muuntajaa on käyttää yhtä transistoria. Tällaista muuntajan ohjausta on käytetty aikoinaan A-luokan vahvistimien päätemuuntajan ohjaukseen. Tämän kytkennän etuina on yksinkertaisuus, mutta vain 25% hyötysuhde. Lisäksi muuntajan ensiökäämissä on jatkuva virta. Myöskään jännitteen napaisuutta ei tässä ratkaisussa voi kääntää.

Hieman kehittyneempi ratkaisu on vuorovaihekytkentä. Tällainen on toteutettavissa kahdella kytkimellä, mikäli käytettävän muuntajan ensiössä on väliulostulo. Tämä siis tarkoittaa sitä, että muuntajan ensiökäämitys tulee joko katkaista keskeltä tai tehdä tuplakäämitys. Tässä kytkennässä vuorotellaan ensiökäämien välillä jatkuvasti ja saavutetaan korkeampi hyötysuhde mitä aiemmin mainitulla kytkennällä.

Vieläkin kehittyneempi ratkaisu on H-silta. Tässä kytkennässä on pelkistettynä neljä kytkintä, jotka toimivat pareittain. Perinteiseen muuntajaan ohjataan vuorotellen tasajännitettä kumpaankin suuntaan. Etuina tässä on ettei muuntajalta tarvita samanlaista erikoiskäämistä, mitä vuorovaihekytkennässä.





Kuva 5. H-silta

3-Vaiheisissa inverttereissä voidaan käyttää H-sillasta edelleen kehitettyä versiota, siinä on yhteensä kuusi kytkintä. Kytkimiä ohjataan samaan tapaan kuin H-sillassa, kuitenkin ainoastaan kaksi kytkintä voi johtaa tässä yhtä aikaa. Tämän tyyppinen kytkentä on suosittu taajuusmuuttajissa, mutta invertterikäytössä ei tämän tyyppistä ratkaisua kannata käyttää ellei haluta erottaa vaiheita toisistaan galvanisesti.

Taajuus riippuu puhtaasti käytettävästä muuntajasta ja ohjauspiiristä. Puhuttaessa hakkurityyppisestä ratkaisusta, voidaan alle kilohertsien taajuudet jättää huomioimatta huonon hyötysuhteen takia. Myös pitää ottaa huomioon se, että tietyt taajuudet aiheuttavat vinkumisääntä. Jos onkin vain mahdollista kannattaa kytkentätaajuus valita kuuloalueen yläpuolelle.

Tietysti käytettävät materiaalit käyttäytyvät eri tavalla korkeammilla taajuuksilla. Taajuutta ei tulisi nostaa turhan suureksi, sillä häviöt alkavat kasvamaan turhan suureksi. Tässäkin tulee huomioida kokonaisuus ja tarkastella koko invertteriä millä taajuudella kytkentä toimisi parhaiten.

Nopeasti ajateltuna tulee kysymys, miksi taajuutta tulisi nostaa. Taajuuden nostamisella päästään hakkurissa siihen, että komponenttien kokoa pystytään pienentämään. Etenkin muuntajan kokoa voidaan pienentää dramaattisesti suurennettaessa taajuutta ja valmistusmateriaali voidaan vaihtaa halvempaan

vaihtoehtoon.

Taajuuden valinta on aina kompromissi. Mikäli haluttaisiin mahdollisimman puhdasta siniaaltoa ulostuloon eikä kustannustehokkuutta tarvitsi miettiä. Valinta olisi selkeästi 50Hz ja hakkurijärjestelmä unohdettaisiin. Kuitenkin suunnitellessa kompaktia ja edullista invertteriä joudutaan siirtymään kilohertsien kytkentätaajuuteen.

Aiemmin todettiin, että suurempi taajuus pienentää muuntajien fyysistä kokoa ja käämien kierroslukumäärää. Toisaalta suurempi taajuus aiheuttaa päänvaivaa kytkentään, sillä suuret taajuudet käyttäytyvät eri tavalla mitä pienemmät.

Koska muuntajien materiaalia ei ole vielä päätetty tässä vaiheessa, voidaan taajuudelle esittää kompromissia. Tämän pohjalta etsitään sopiva muuntajamateriaali ja suoritetaan tarvittavat mitoitus. Ihmisen kuuloalue on karkeasti 50-22000Hz, joten tätä aluetta ei kannata käyttää sillä laitteen läheisyydessä voi sen käyntiäänien kuulla ikävänä vinkumisena. Mikäli invertteri sijoitetaan kauemmaksi, voidaan käyttää myös kuuloalueella olevia taajuuksia.

Kuitenkin tuplaamalla kuuloalueen ylätaajuuden 22kHz noin 40kHz:ksi voidaan käyttää vielä suhteellisen yksinkertaisia mitoituksia ja kytkennälle ei tule erityisiä vaatimuksia taajuuden takia. Mitä suurempi taajuus on sitä heikommin virta kulkee johtimessa ja induktanssi aiheuttaa tehohäviöitä. Myöskin suuremmilla taajuuksilla on suuri mahdollisuus, että muuntaja muuttuu induktiolämmittimeksi.

Osien sijoittelu vaikuttaa toimintaan ja 40kHz taajuudella vielä osien sijoitteluun ei tarvitse käyttää suunnatonta päänvaivaa, vaan lyhyet jännitelinjat riittävät. Kuitenkin prototyyppiä tehdessä joudutaan piirilevy suunnittelemaan monia kertoja uusiksi, sillä monet taajuuteen riippuvat häiriötekijät eivät ilmaannu suunnitellessa.

### 5.1.3 Muuntaja

Muuntajan tehtävänä on nimensä mukaan tarkoitus muuntaa ensiöjännite toisiojännitteeksi muuntosuhteen mukaan. Muuntaja muuntaa vain jännitteen tai virran, eikä se pysty muuttamaan taajuutta.

Muuntaja toimii sähkömagneettisella induktiolla. Ensiökäämiin tullut jännite muodostaa vaihtuvan magneettivuon, joka indusoituu muuntajan sydämeen josta magneettivuo indusoi sähkömotorisen voiman toisiokäämiin.



Kuva 6. Erilaisia muuntajia (Lundahl)

Koska ensiö- ja toisiokäämi eivät ole sähköisesti yhdessä, tapahtuu galvaaninen erotus. Tästä on hyötyä sillä eri jännitetasot ovat erotettuina toisistaan, lisäksi tämä tuo turvallisuutta sillä korkeamman jännitteen ei pitäisi päästä pienjännitepuolelle.

Muuntosuhde on yksi tärkeimpiä muuntajan yksiköitä, se kertoo suhteen millä ensiö- ja toisiojännite muunnetaan keskenään. Teoriassa häviöttömässä ympäristössä toimiva ideaalimuuntaja, jossa ei ole häviöitä. Muuntosuhde on seuraavanlainen.

$$\frac{U_1}{U_2} = \frac{N_1}{N_2} = \frac{I_2}{I_1}$$

Jossa:	U1	=	Ensiöjännite
	U2	=	Toisiojännite
	N1	=	Ensiökäämin kierrokset
	N2	=	Toisiokäämin kierrokset
	I1	=	Ensiövirta
	I2	=	Toisiovirta

Todellisessa ympäristössä toimivassa muuntajassa, tulee käämityksessä ottaa huomioon lämpöhäviöt, jännitteen alenema, pyörrevirta ja käämiresistanssit. Valitettavasti muuntajan käämien kierrosmäärää ei voi heittää niin sanotusti hatusta, vaan ensiö- ja toisiokäämien kierrosmäärät riippuvat käytetystä taajuudesta ja sydänmateriaalista.

Perinteisten jakelumuntajien sydänmateriaalina käytetään kidesuunnattua muuntajalevyä. 50Hz toimiessa vaaditaan käämityksessä enemmän kierroksia mitä suuremmalla taajuudella, käytettäessä eri sydänmateriaalia kuten ferriittiä voidaan sydämen kokoa pienentää ja samalla pienentää muuntajankin kokoa.

Ferriittisydäntä käytettäessä valitettavasti ei voida käyttää 50Hz taajuutta hyvällä hyötysuhteella, realistiset käyttötaajuudet ovat kilohertsistä kymmeniin kilohertseihin. Jotta voisimme tarkistella muita muuntajan ominaisuuksia, meidän tulee tietää muuntajan universaali EMF yhtälö. Tämä yhtälö pätee vain sinimuotoisella virralla, mutta sitä voidaan käyttää myös kantiaallolla jos halutaan tehdä karkea mitoitus.

$$E_{rms} = \frac{2 \Pi f N a B_{peak}}{\sqrt{2}} = 4,44 f N a B_{peak}$$

Jossa:	Erms	= Jatkuva ulostulojännite V
	f	= taajuus Hz
	N	= Kierrosten lukumäärä
	a	= Sydämen poikkileikkauspinta-ala m <sup>2</sup>
	B	= Magneettivuon tiheyspiikki Wb/m <sup>2</sup>

Yhtälöstä näemme miten taajuus, kierroslukumäärä, poikkileikkauspinta-ala ja magneettivuo vaikuttavat toisiinsa. Mikäli taajuus nousee on kierroslukumäärän täytyy pienentyä. Kuten jo aiemmin mainittiin ei taajuutta voi nostaa paljoa, mikäli käytetään perinteistä kidesuunnattua muuntajalevyä. Jotta voidaan ymmärtää taajuuden merkitystä sydänmateriaalille tulee palauttaa mieleen Faradayn induktiolaki. [5.]

Faradayn induktiolaissa magneettivuon muutos ajan derivaattana indusoi jännitteen, jonka synnyttämä sähkövirta pyrkii vastustamaan magneettikentän muutosta. Tästä huomaamme, että vuo sydämessä on integraali, joka reagoi ajan suhteen. Teoreettisesti muuntaja voisi toimia tasavirralla jos sydämen vuo kasvaisi lineaarisi.

Kuitenkin todellisuudessa vuo nousee pisteeseen, jossa sydänmateriaali saturoi magneettisesti ja muuntaja lämpenee. Tämä sama ilmiö tapahtuu myös vaihtovirralla, kun taajuus nousee riittävän suureksi kyseiselle sydänmateriaalille.

Muuntajan sähkömotorinen voima kasvaa, kun vuon tiheys kasvaa taajuuden ansiosta. Tämän ansiosta suurempia taajuuksia käytettäessä voidaan muuntajan kokoa pienentää, koska tarvittavaa kierroslukumäärää voidaan pienentää ja käämiin saadaan silti sopiva impedanssi. Tämä voidaan huomata aiemmin tarkastellussa EMF-yhtälössä.

Kuitenkin taajuuden noustessa sydämen häviöt kasvavat, pyörrevirrat kasvavat jotka aiheuttavat muuntajan kuumentumista. Lisäksi skin-efekti ilmaantuu, eli virta siirtyy johtimen pintaosiin. Näiden asioiden ansiosta muuntaja alkaa

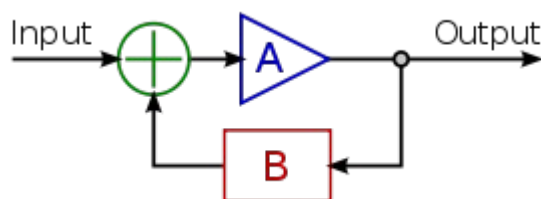
muistuttamaan enemmän induktiolämmitintä, kuin muuntajaa.

Aiemmistä tekstistä voidaan todeta, että muuntaja ei ole kovinkaan yksinkertainen komponentti todellisuudessa, vaikka paperilla se vaikuttaakin siltä. Kuitenkin perusteiden ymmärtämisen avulla voidaan mitoittaa invertteriin juuri sopiva muuntaja jos valmista tuotetta ei löydy.

#### 5.1.4 Takaisinkytkentä

Ohjauksen ja hakkurin toimintaan kuuluu oleellisesti takaisinkytkentä. Takaisinkytkentää käytetään ohjaamaan hakkuria muuttamalla sen kytkentätaajuutta tai pulssinleveyttä. Ideana on, että muuntajan toisiolta tarkkaillaan tasasuunnattua jännitetasoa. Jos toisiojännite kasvaa liikaa tulee kytkentätaajuutta tai pulssinleveyttä pienentää. Vastaavasti jos jännite laskee liikaa, tehdään käänteinen operaatio.

Jotta ei jäisi epäselväksi mitä takaisinkytkentä tarkoittaa, avataan termi seuraavaksi. Yksinkertaistettuna takaisinkytkentä tarkoittaa lopputuloksen käyttämistä ohjaussuureena, jotta tässä tapauksessa järjestelmästä saataisiin stabiilimpi.



Kuva 7. Yksinkertaisen takaisinkytkennän periaate (Wikimedia Commons)

Takaisinkytkennän tarkoituksena on säätää hakkurin toimintaa kuormituksen mukaan, sillä jännite ei juurikaan vaihtelee kuormituksen pysyessä vakiona. Tosin akkuvirralla toimivassa järjestelmässä ensiojännite voi laskea liikaa, jolloin vaaditaan toimenpiteitä ensiojännitteen nostoon.

Koska ohjaukseen käytettävä takaisinkytkennän tieto otetaan tosiopuolelta, täytyy ensiön ja toision pystyä toisistaan erotettuina. Tosiolta tarvitaan tietää jännite ja se täytyy optoerottimen avulla siirtää ohjauspiirille.

## **5.2 Korkeajännitepuoli**

Korkeajännitepuolena käsitellään tässä puolta, jossa jännitetaso on yli 50V. Käytännössä kaikki toisiopuolella sijaitsevat komponentit kuuluvat korkeajännitepuoleen. Seuraavaksi käsitellään tasasuuntaus, siniaallon muodostaminen ja monitorointia.

### **5.2.1 Tasasuuntaus**

Toisista saadaan korkeataajuuksista kanttiaallon muotoista vaihtosähköä, luonnollisesti tämä on käyttökeltvotonta elektronikan käyttöön ennen tasasuuntausta. Tasasuuntauksessa vaihtosähkö muutetaan sykkiväksi tasasähköksi tasasuuntaussillan avulla, jonka jälkeen se suodetaan suotokondensaattorilla.

Koska vaihtosähkö on korkeataajuisista, ei suotokondesaattoriksi tarvitse valita niin suuri kapasitanssista mitä pienemmällä taajuudella. Lisäksi kondensaattorilla saadaan vähennettyä kytcentähäiriöitä pois, mitä hakkuri toimiessaan aiheuttaa.

Tasasuuntauksen jälkeen voidaan tehdä myös jännitteen vakavointi yksinkertaisesti zener-diodin tai regulaattorin avulla. Näiden komponenttien avulla brummijännite hävitetään pois ulostulojännitteestä. Brummijännite muuttuu näissä komponenteissa lämmöksi, joten se taas heikentää kokonaishyötysuhdetta.

Kuitenkin invertterissä pelkästään sopivan kokoinen suotokondensaattori riittää suodoksi eikä zener-vakavointi tai regulointi ole tarpeellista, sillä jännitettä

tullaan vielä muuntamaan tämän jälkeen. On hyvä huomioida, että invertterin ulostulojännite saa vaihdella 220-240V välillä. Tosin suotavaa olisi, että jännite pysyisi suurin piirtein 230V alueella, eikä laskisi tai nousisi paljoa kuorman muutoksen yhteydessä.

### 5.2.2 Siniaallon muodostaminen

Tässä kappaleessa perehdytään siniaallon muodostamiseen hyödyntäen pulssinleveysmodulaatiota siksi, että se on kustannustehokas ja järkevä siniaallon muodostamistapa. Aiemmassa siniaaltoinvertteriä käsitelleessä kappaleessa käytiin erilaisia tekniikoita läpi sekä myös pulssinleveysmodulaatio.

Verkkovirran jännite tulee asettua 220-240V välille ja taajuuden tulee olla 50Hz. Lisäksi THD arvon tulee olla maksimissaan 3%. Kun nämä arvot täyttyvät jännite on standardin mukaista. Jännitteen tason säädön voi toteuttaa samalla pulssinleveysmodulaatiolla tai jättää sen hakkurin tehtäväksi.

Helppointa on jättää jännitteen säätö hakkurin tehtäväksi, sillä näin hakkuri pitää tasasuunnatun toisiojännitteen n.325V ja samalla säätää omaa toimintaansa takaisinkytkennän avulla. Näin saadaan kuormitukseen vastaavuuskin toimimaan huomattavasti paremmin.

Käytännössä tässä vaiheessa vain siniaalto muodostetaan tasajännitteestä. Toimintaperiaate muistuttaa D-luokan vahvistinta sillä erotuksella, että tässä tapauksessa ”vahvistetaan” vain yhtä taajuutta.

Puhuttaessa siniaaltoinvertteristä pitää ulostulevan jännitteen myös olla sinimuotoista eikä vain koostua epämääräisistä palkeista. Käytännössä pulssinleveysmodulaatiossa aalto koostuu, joka tapauksessa palkeista. Kuitenkin jännitteestä saadaan sinimuotoista alipäästösuotimen avulla, jonka jälkeen oskilloskoopilla tarkastellessa jännite näyttää sinimuotoiselta. [6.].



Pulssinleveysmodulaation taajuuden tulee olla huomattavasti suurempi kuin 50Hz. Tämän taajuuden virallinen nimi on näytteenottotaajuus. Näytteenottotaajuus tarkoittaa yksinkertaisesti sitä, montako näytettä signaalista otetaan sekunnin aikana. Näytteenottotaajuuden tulee olla suuri verrattuna lähtötaajuuden. Näytteenottoteoreeman mukaan taajuuden tulee olla vähintään kaksinkertainen. (Wikipedia)

Kuitenkin tämä ei välttämättä riitä, sillä signaali voi vääristyä liikaa liian pienellä taajuudella. Siksi taajuuden on syytä olla suuri, äänentoistossa käytetään nykyään 192kHz, vaikka ylin kuultava taajuus on n.20kHz. Pyöreästi tämä on lähes kymmenen kertaa suurempi taajuus. Invertterissä ei tarvita päästä samoihin laadullisiin tarkkuuksiin, mitä äänentoistossa kuitenkin tästä voi ottaa mallia.

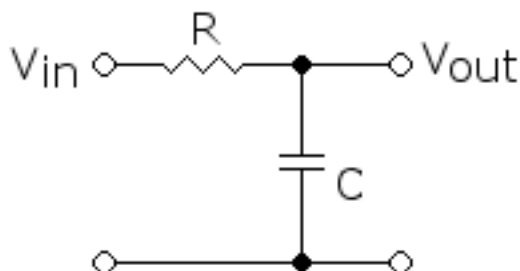
Kuitenkin invertterin siniaallon muodostus pääteasteessa ei ole D-luokan vahvistin, vaikka se sitä hyvin paljon muistuttaakin. Ensinnäkin invertterissä ei ole analogista signaalia jota vahvistetaan, vaan vahvistettava siniaalto on vain sarja päälle/pois komentoja tallennettuna bittimuodossa mikrokontrolleille.

Tästä tiedosta puristetaan ulos ohjaus, joka ohjaa IGBT pääteastetta päälle ja pois ohjaustaajuuden määräämällä vauhdilla. Siis ohjaus määrittelee johtavuuden kestoa kuinka pitkän aikaa IGBT johtaa. Näin saadaan ulostulojännite, jonka amplitudilla on kolme eri tilaa 325V, 0V ja -325V. Jos ulos saatua jännitettä tarkastellaan 50Hz taajuudella alkaa se jo näyttämään siniaallolta. Kuitenkin tämä jännite tulee ajaa alipäästösuotimen läpi, jotta siitä saadaan suodettua häiriöt ja ylitaajuudet pois.

### **5.2.3 Suotoprosessi**

Siniaallon muodostamisen jälkeen saatu pulssinleveysmodulaatio täytyy suotaa hyvin. Suotoon tarvitaan alipäästösuodin. Alipäästösuodin päästää matalat taajuudet lävitseen ja vaimentaa korkeiden taajuuksien etenemisen.

Käytännössä invertterissä vaimennetaan kaikki yli 50Hz:n taajuudet, jolloin ulostulojännite on lähes puhdasta siniaaltoa.



Kuva 8. Yksinkertainen RC-tyyppinen alipäästösuodin (Wikimedia Commons)

Alipäästösuodin voidaan tehdä käyttämällä vain vastusta ja kondensaattoria. Kyseisessä ratkaisussa liian korkeat taajuudet muuttuvat lämmöksi vastuksessa ja kondensaattorissa. Kuitenkin tehohäviö on pieni kondensaattorissa 50Hz:llä, sillä kondensaattorissa ei silloin kulje juurikaan virtaa. Kuitenkin etuvastus aiheuttaa tehohäviöitä. Yksinkertainen alipäästösuotimessa tulo- ja lähtöjännitteen riippuvuus on alla olevan kaavan mukainen. [7.].

$$\frac{V_{out}}{V_{(In)}} = \frac{1}{\sqrt{1 + (2\pi R C f)^2}}$$

Jossa:

- $V_{out}$  = ulostulojännite
- $V_{in}$  = sisäänmeno­jännite
- R = resistanssi
- C = kapasitanssi
- f = taajuus

Alipäästösuodin suodin toimii siten, että kondensaattorin ja vastuksen läpi ei kulje juuri virtaa matalilla taajuuksilla. Kun taajuus kasvaa yli nimellisarvon, kondensaattori on oikosulussa ja ylitaajuuksinen jännite ajetaan vastukseen, jolloin ulostulojännite on nollassa.

Alipäästösuotimen mitoitus onnistuu seuraavan kaavan avulla.

$$f_o = \frac{1}{2\pi RC}$$

Jossa:       fo     = taajuus  
               R     = resistanssi  
               C     = kapasitanssi

Kuitenkin tehoelektronikassa tämän tyyppinen alipäästösuodin voidaan unohtaa käytännössä katsoen heti. Tämä johtuu siitä, että vastukseen joudutaan hukkaamaan tehoa. Koska virrat ovat ampeeriluokkaa, pienikin jännitteen alenema vastuksessa aiheuttaa suhteellisen suuren tehohäviön ja heikentää entisestään kokonaishyötysuhdetta.

Parempi onkin käyttää RLC-tyyppistä alipäästösuodinta, jossa vastus on korvattu kelalla. Kelalla itsellään on toki itsessään resistanssia, mutta verrattuna RL-tyyppiseen hyvin vähän. RLC-tyyppinen suodin mitoitetaan seuraavan kaavan mukaisesti.

$$f_o = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$$

Jossa:       f<sub>c</sub>     = taajuus  
               L     = induktanssi  
               C     = kapasitanssi

RLC-tyyppisessä ratkaisussa kuorma toimii suodinpiirin resistanssina. Eli toisin kuin RL-tyyppisessä suotimessa R toimi etuvastuksena, tässä maksimikuormaa hyödynnetään vastuksena. Tämän suodinpiirin heikkous on se, että se toimii optimitilassaan maksimikuormituksella ja puhtaasti resistiivisellä kuormalla.

Eräs mahdollisuus olisi käyttää useampaa RLC-tyyppistä suodinta rinnankytkettynä sen mukaan mikä kuormitus on. Tosin tämä hankaloittaa suunnittelua ja ensiksi olisin syytä valmistaa prototyyppi ja testata miten se toimisi kyseisellä suotimella.

#### **5.2.4 Monitorointi**

Monitoroinnin tehtävänä on tarkkailla, että ulostulojännite pystyy stabiilina. Lisäksi akkukäyttöisessä invertterissä pitää tarkkailla jatkuvasti akkujännitteen tilaa, mutta se ei kuulu suurjännitepuolelle. Välttämättä monitorointia ei tarvitse toteuttaa ollenkaan invertteriin, mutta siitä on myös hyötyä.

Jos alipäästösuodin on aktiivinen, voi aktiivisella monitoroinnilla säätää sen toimintaa paremmaksi käytön aikana. Kuitenkin passiivi alipäästösuodin toteutuksessa monitorointia ei voi käyttää näin hyödyksi.

Hajautetussa sähköntuotannossa monitoroinnista on kuitenkin hyötyä, sillä jos tieto saadaan ladattua ulos invertteristä esimerkiksi tietokoneelle. Voidaan tehdä tarkkoja laskelmia, kuinka paljon sähköä kuuluu mihinkin aikaan. Tämän avulla lisäksi voidaan tarkistella kokonaiskulutusta, jonka avulla voidaan määrittää tarvittava akuston koko kyseessä olevalle energiantuotanto menetelmälle.

Pelkistetysti monitorointi voidaan toteuttaa takaisinkytkennän avulla, jolloin ohjauspiirille annetaan reaaliaikainen tieto korkeajännitepuolen toiminnasta ja toimintapistettä säädetään sen mukaan.

## 6 Suunnittelu

### 6.1 3-Vaiheisuuden lisävaatimuksia

Siniaaltoinvertterin ollessa monimutkainen laite ei kolmevaiheisuus helpota suunnittelu-urakkaa. Perinteisesti verkkovirrassa vaiheiden vaihe-ero on 120 astetta, tästä ei tietenkään tule poiketa edes invertterikäytössä, koska virran tulee olla standardit täyttävää.

Sähköverkossa sähkö tuotetaan yleensä pyörivillä generaattoreilla, jossa käämitys on jaettu tasaisesti kolmeen osaan. Näin pyörimisliikkeellä tuotetaan yhtä aikaa kolmea siniaaltoa, jotka ovat toisiinsa nähden 120 asteen vaihe-erossa. Näin on ollut ja näin asia tulee olemaan tulevaisuudessakin.

Generaattoreissa käämit ovat toisistaan erotettuja galvaanisesti, mutta yleensä käämien aloitukset yhdistetään toisiinsa, jotta saataisiin nollapiste järjestelmään. Jos käytettäisiin valmiita yksivaiheisia inverttereitä, onnistuisi kolmivaiheisuus yhdistämällä inverttereiden ohjaus ja tekemällä kahteen invertteriin vaihe-eroa. Tällaisessa ratkaisussa ei kyllä ole juurikaan järkeä, sillä laitteiden takuu ja käyttömukavuus olisi tämän jälkeen mennyttä.

Suunnitellessa invertteriä puhtaalta pöydältä. Voidaan kolmivaiheisuus ottaa mukaan jo varhaisessa vaiheessa. Pitääkin päättää tahdotaanko vaiheet erottaa toisistaan galvaanisesti vai ei. Verkkosähkössä vaiheet eivät ole erotettuja toisistaan galvaanisesti, joten päästään tulokseen, että invertterissäkin voidaan tehdä näin. Invertterin hakkurin ei tarvitse poiketa yksivaiheisesta toteutuksesta juuri ollenkaan. Riippuen tietysti tehon tarpeesta voi komponentteja joutua suurentamaan.

Kolmivaiheisuus aiheuttaakin lähinnä muutoksia ohjaukseen ja pääteasteeseen. Ohjauksesta tarvitaan lisäksi ohjaustieto L2 ja L3 vaiheita varten. Pääteasteessa IGBT tulee vaihtaa kolmivaiheiseen versioon tai käyttää kolmea

erillistä IGBT:tä. Järkevämpää on kuitenkin käyttää kolmivaiheista versiota, jolloin komponenttien määrää voidaan vähentää. Tässäkin tulee muistaa suunnittelufilosofia yksinkertainen on kauniimpaa.

Kolmivaiheisuutta ajatellen tulee miettiä mikä on tehon tuottotarve. Pienimmät Suomessa käytössä yleisessä olevat kolmivaihepistorasiat ovat mitoitettu 16A, joten jos invertteriin halutaan kolmivaihepistorasia tulee invertterin vastata vähintään 3x16A sähköliittymää tuotoltaan. Eli invertterin tehon tulee olla vähintään  $3 \times 230V \times 16A = 11040W$ . Jos verrataan tätä yksivaiheiseen 16A invertteriin teho on vain 3680W.

Tästä päästäänkin siihen, että suunnitteluvaiheessa on hyvä mitoittaa komponentit kertaluokkaa suuremmaksi mitä yksivaiheisessa toteutuksessa. Riippuen toteutustavasta ja tehosta voidaan kolmivaiheissa invertterissä käyttää samoja muuntajia, mitä yksivaiheisessa tosin niiden lukumäärää tulee kasvattaa ja kytkeä ne rinnan.

Toisiojännitettä ei tarvitse kolmivaiheissa toteutuksessa kasvattaa yksivaiheiseen verrattuna, vaikka kolmivaiheissa kytkennässä vaiheiden väliltä saadaan n.400V jännite ja invertterin toisiossa oleva jännite on hieman yli 325V. Sopiva jännite syntyy 120 asteen vaihe-erosta ja näin ollen jännite summautuu IGBT pääteasteessa, jolloin saadaan 400V käytettäväksi.

## 6.2 Ohjauksen toteutus

Kolmivaiheiseen invertteriin ei löydy helpolla valmiita ohjauspiirejä. Itse invertterin ohjaukseen soveltuvia piirejä löytyisi, mutta näiden muuttaminen toimimaan kolmivaiheisesti olisi monimutkaista. Aiemmissa kappaleissa tutuksi tullut mikrokontrolleri on tähän tarkoitukseen huomattavasti parempi ratkaisu.

Kustannustehokasta vaihtoehtoa hakiessa parhaaksi vaihtoehdoksi muodostuu Atmelin megaAVR sarja, jossa on 4-512kB muistia. Tärkeintä AVR-sarjassa on se, että näistä löytyy vakiona PWM-lähtöjä, digitaaliulostuloja, analogisia- sekä digitaalisia sisäänmenoja. Lisäksi AVR:stä löytyy sisäänrakennettu kellopiiri ja ohjelmointi tapahtuu kätevästi C-kielellä.



Kuva 9. ATMega16 (Atmel)

Kontrollerin tulee pystyä ohjaamaan vähintään neljää PWM-lähtöä, jotka ovat hakkurin ohjaus ja jokaiselle kolmelle vaiheelle oma lähtö. Tämän takia 8-bittinen ATmega8 voidaan jättää laskuista pois, sillä siinä on vain kolme PWM-lähtöä. Kuitenkin 8-bittinen ATmega16 mikrokontrolleri omaa 4 PWM-lähtöä, joten sitä on syytä tarkastella invertterin sydämeiksi. Datalehden ensimmäinen sivu liitteenä.

ATmega16 mikrokontrollerissa on 16kilotavua muistia, jolle voidaan siirtää ohjelma jota käytettäessä ajetaan. Mikäli ohjelmasta tulee suurempi kuin kontrollerissa oleva tila, täytyy valita mallistosta seuraava malli. Joten lopullinen mikrokontrollerin valinta tulee tehdä vasta ohjelman valmistumisen jälkeen.

### 6.3 Muuntaja

Opinnäytetyössä käsiteltävälle invertterille ei löydy helpolla valmiita muuntajia käytettäväksi. Eräs mahdollisuus on käyttää tietokoneen virtalähteen ferriittimuuntajia rinnankytkettynä. Kuitenkin on parasta suunnitella ja valmistuttaa juuri sopivat muuntajat invertteriin. Näin saadaan laitteeseen juuri oikeanlainen muuntaja ja vältetään turhilta muutoksilta joita jouduttaisiin muuten käyttämään.



Kuva 10. Tietokoneen virtalähteen ferriittimuuntajia

Suurin ongelma valmiin muuntajan käyttämisessä on teho ja muuntosuhde. Kilowattiluokan tehoiset muuntajat maksavat valmiina paljon, eikä niitä juurikaan valmisteta kuin tilauksesta. Invertterissä erittäin suureksi ongelmaksi muodostuu ensiökäämi ja sen virta.

Myöskin akuston jännite näyttelee merkittävää roolia, sillä 12V järjestelmässä ensiövirta on tuplasti suurempi mitä 24V järjestelmässä. Käytännössä mitä suurempi virta sitä suurempi johdon poikkipinta-ala. Tämä vaikeuttaa ensiön käämimistä, sillä paksumpi johto rikkoo helpommin kellarungon. Ongelmana on myös ensiökäämin mahtuminen kellarungolle, vaikka kierroksia tarvitaan vain muutama.

Eräs keino on käämiä useita ensiökäämejä ohuemmalla käämilangalla ja kytkeä ne lopulta rinnan. Toinen vaihtoehto on taas käyttää useampia muuntajia rinnankytkettynä, jolloin voidaan käyttää pienempiä kellarunkoja ja sydämiä tai vaihtoehtoisesti käämiä väljemmin.



Kustannustehokkain tapa on käämiä ohuemmalla käämilangalla ja järjestää käämitykselle jäähdytys. Hyvää jäähdytystä tehdessä vesijäähdytys on erinomainen vaihtoehto, tosin se tuo lisäkomponentteja jotka lisäävät virrankulutusta. Niin sanottu cheap and dirty ratkaisu on valaa käämi hyvin kuumuutta kestävään epoksiin ja järjestää kunnollinen jäähdytys lämpötilan mukaan.

Tehokkuuden kannalta liian ohut käämilanka aiheuttaa jännite- ja tehohäviöitä. Vaikka voidaankin olettaa, ettei invertteriä tulla käyttämään jatkuvasti täydellä teholla. Tulee sen kyetä antamaan kyseinen teho ulos jatkuvasti jos niin on suunniteltu. Käämilangan hinta ei näyttele kovin suurta roolia sillä sitä menee hyvin vähän ferriittimuuntajaan. Ainoastaan käämiminen hajottamatta kelarunkoa on hankalaa.

Koska kierrosmäärät ovat tämäntyyppisessä muuntajassa pieniä, voidaan kelarungolle käämintä suorittaa, vaikka käsin. Piensarjatuotantona tämäntyyppinen ratkaisu on varsin järkevää ja kustannustehokasta. Muuntajien laatu ei kärsi vaikka ne käämittäisiin käsin, mutta näin saadaan varmistettua ettei kelarunkoon tule säröjä.

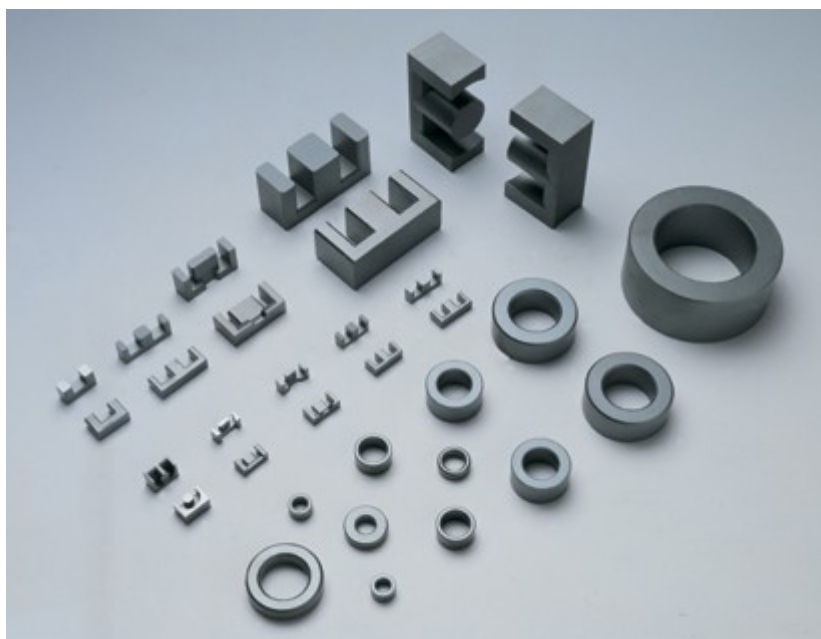
### **6.3.1 Materiaalin valinta**

Muuntajan sydänmateriaalin valinta tulee tehdä sen perusteella, mikä on taajuudelle sopiva ja kustannustehokas. Hakkurityyppisessä jännitteen konvertoinnissa voimme jättää perinteisen kidesuunnatun muuntajalevyn pois laskuista. Tämä siksi, että muuntajalevy saturoi voimakkaasti kilohertsien taajuudella.

Luonnollinen valinta sydänmateriaaliksi on siis ferriitti. Ferriiteillä tarkoitetaan metalliseosta, jossa on rautaoksidiin lisätty keraamisia materiaaleja. Toiselta nimeltään ferriitti on myös keraaminen magneetti. Ferriitillä on suuri magneettinen permeabiliteetti ja matala sähkönjohtavuus, joka heikentää

pyörrevirtojen syntymistä.

Muuntajasydämessä käytetään pääasiassa kahta eri seosferriittiä. Magnesium-Sinkki ferriitti (**MnZn**,  $\text{Mn}_a\text{Zn}_{(1-a)}\text{Fe}_2\text{O}_4$ ) ja Nikkeli-Sinkki ferriitti (**NiZn**,  $\text{Ni}_a\text{Zn}_{(1-a)}\text{Fe}_2\text{O}_4$ ). MnZn ferriitti omaa suuremman permeabiliteetin ja saturaatiopisteen. NiZn ferriitti omaa puolestaan suuremman resistiivisyyden ja soveltuu paremmin yli 1MHz taajuuksille.



Kuva 11. Erilaisia ferriittisydämiä

Koska materiaali vaihtoehtona on käytännössä ainoastaan MnZn, voidaankin aloittaa selvitystyö millainen magneettivuon tiheys materiaalilla on ja kuinka suuri poikkileikkauspinta-ala sydämelle tarvitaan. Näiden arvojen avulla onkin hyvä alkaa etsimään katalogeista sopivia vaihtoehtoja sydämeiksi.

### 6.3.2 Mitoitus

Jotta voisimme aloittaa muuntajan mitoituksen aiemmassa kappaleessa mainitulle materiaalille, täytyy taajuus ja muuntosuhde löydä lukkoon. Lisäksi kannattaa miettiä monellako muuntajalla hakkuri toteutetaan. Mikäli

kustannusten ja valmistusteknisistä syistä voidaan käyttää yhtä muuntajaa, on se paras vaihtoehto sillä muuten muuntajien pitää olla erittäin tarkasti yhteen sovitettuja. Vaihtoehtoisesti muuntajien ohjaus täytyy tehdä vaiheittain, joka aiheuttaa lisää päänvaivaa kytkennän toteuttamisen ja toimivaksi saamisen kanssa.

Aiemmassa kappaleessa todettiin, että ainut realistinen sydänmateriaali on MnZn. Tästä materiaalista valmistettuja sydämiä löytyy kohtuulliseen hintaan esimerkiksi Elfa elektroniikalta. Valmistajan (Epcos) kaupallinen nimi materiaalille on N27, N87. Kyseisestä materiaalista valmistettu E 65/27-sydän B66387-G-X187 on eräs harkinnan arvoinen vaihtoehto muuntajan sydänmateriaaliksi. Tarkemmat tiedot liitteestä 2.

Kyseisen sydämen mitat ovat 65x27x27mm. Tämä on ferriitiksi aika kookas, mutta suurempi koko helpottaa kelarungolle käämimistä ja Epcosin E-sarjan ferriittejä voidaan käyttää jopa 10kW tehonsiirrossa. Materiaalin energiansiirtokyky on siis parempi, mitä tarvittaisiin. Ylimoitettu muuntajasydän ei lämpene niin paljoa, mitä juuri sopivaksi mitoitettu.

Kyseistä ferriittisydäntä saa kohtuullisen edulliseen hintaan esimerkiksi Elfa elektroniikalta n.10€ kappalehintaan. Tästä syystä ei kannata valita pienempää sydäntä, jolle käämiminen olisi hankalampaa ja luultavasti tuotantokustannukset kasvaisivat. Lisäksi aiemmin mainitun ferriitin suuri energiansiirtokyky palvelee muuta muuntajan toimintaa. Koska kaikkia muuttujia ei mitoituksessa voida ottaa huomioon, todellisuudessa kannattaa tehdä karkea mitoitus, jonka perusteella valmistetaan prototyyppi.

Prototyypin valmistuttua tehdään rasituskokeita, rasituskokeiden perusteella muuntajan käämityksiä muutetaan suuntaan tai toiseen. Lähtökohtana on se, että muuntajan toimiessa nimellistehollaan tulisi ulostulojännitteen oltava ilmoitetun suuruinen. Selkeytettynä tämä tarkoittaa sitä, että muuntajan ollessa tyhjäkäynnillä tyhjäkäyntijännite on huomattavasti suurempi mitä nimellisulostulojännite.

Muuntajan ollessa induktiivinen komponentti on pelkillä perustietojen avulla hankalaa mitoittaa täydellisesti toimiva muuntaja jokaiseen tilanteeseen sopivaksi. Tämän tyyppisessä invertterissä suuri tyhjäkäyntijännite ei haittaa, sillä jännite tullaan vielä tasasuuntaamaan ja jännitetaso tullaan tekemään pääteasteessa.

Edellä kerrottujen seikkojen ansiosta voidaan päätellä, että prototyypimuuntajan mitoitukseen riittää karkea mitoitus. Aiemmin esitettyä universaalialia muuntajan EMF-yhtälöä muokkaamalla voidaan ratkaista kuinka monta kierrosta muuntajan ensiökäämiin tarvitaan. [1.].

$$E_{rms} = \frac{2 \Pi f N a B_{peak}}{\sqrt{2}} = 4,44 f N a B_{peak}$$

Jossa,

- Erms = Jatkuva ulostulojännite V
- f = taajuus Hz
- N = Kierrosten lukumäärä
- a = Sydämen poikkileikkauspinta-ala m<sup>2</sup>
- B = Magneettivuon tiheyspiikki T

Pyörittelemällä kaavaa saamme ensiön kierroslukumäärän selville seuraavalla tavalla.

$$N = \frac{E_{Rms}}{4,44 * f * a B_{Peak}} = \frac{24V}{4,44 * 40kHz * 0,000535 m^2 * 200mT} = 1,26 \text{ Kierrosta}$$

Ferriittimuuntajan ensiökäämiin ei todellakaan tarvita montaa kierrosta. Tässä tapauksessa valmistusteknisistä syistä kierroslukumäärää olisi hyvä kasvattaa siksi, että ensiön aloitus- ja lopetusaste saataisiin kelarungon samalle puolelle vierekkäin. Kierroslukumäärän nostaminen tosin aiheuttaa kierroshäviöitä, mutta näin pienissä kierroslukumäärissä sillä ei ole suurta merkitystä.

Muuntajan ensiöjännitteeksi on nyt valittu 24V. Valinta on tehty siksi, että näin ensiövirta saadaan pienemmäksi ja esimerkiksi hajautetussa energiantuotannossa 24V on 12V ohella erittäin yleinen jännitetaso. Koska invertterin haluttu ulostuloteho on 11040W, tarkoittaa tämä 24V jännitteellä 460A virtaa. Vastaavasti 12V jännitteellä virta olisi kaksinkertainen, jolloin voidaankin päätellä, että käämiminen on erittäin hankalaa.

Koska ensiössä on pienjännite, ei SFS 6000 standardia tarvitse käyttää ensiökäämin mitoitukseen. Kuitenkin ensiökäämissä kannattaa käyttää poikkipinta-alaltaan suurinta mahdollista vaihtoehtoa, joka on vain käämittävissä järkevästi kellarungolle. Edellä mainittua ferriittisydäntä käytettäessä, voidaan käyttää 26mm kelarunkoa. Tämä tarkoittaa sitä, että 50mm<sup>2</sup> kaapelia käytettäessä saadaan käämittyä kaksi kierrosta. Kyseisen 50mm<sup>2</sup> kaapelin halkaisija on n.8mm ilman eristettä ja on juuri käämittyä käsin. Puhuttaessa käsin käämimisestä tässä tarkoitetaan sitä, että kelarunkoa pyöritetään käsikäyttöisesti ja käämilanka ohjataan käsin.

Jos 50mm<sup>2</sup> käämilankaa käytettäisiin, olisi sen syytä olla monisäikeistä helpomman käämimisen takia. Yksisäikeistä käämilankaa käytettäessä on vaara, että kelarunko murtuisi. Kellarungon murtumisen haittana on se, että vikatilanteessa jännite voi hypätä käämistä kelarunkoon. Yleensä E/I-tyyppisissä muuntajissa ensiökäämin ja muuntajan sydämen välille tehdään eristejännitekoe 4.47kV jännitteellä yhden minuutin ajan. Näissä muuntajassa ensiökäämin jännite on yleensä 230-400V välillä. Rengassydän muuntajissa eristejännitekokeessa käytetään 500V jännitettä. Vuotovirran tulee olla näillä jännitteillä alle 10mA, tämän virran ylittyessä muuntaja tulee hylätä.

Nämä jänniterajat saadaan hyvin täytettyä, jos kelarunko säilyy vain ehjänä ja muuntaja eristetään hyvin. Ensiö- ja toisiokäämin välille tehdään eristejännitekoe 500V:lla, tässäkin vuotovirran täytyisi säilyä alle 10mA. Ensiö- ja toisiokäämin väliin tulee asettaa eristekerros, joka on valmistettu esimerkiksi lasikuituteipistä. Lasikuituteipin eristävyys on n.1kV/1mm joten se sopii tarkoitukseen erittäin hyvin ja on kohtuu hintaista.

Periaatteessa suunnitellussa muuntajassa meidän ei tarvitsisi välittää näin suuresta eristävydestä ensiön ja ferriittisydämen välillä, koska ensiön jännite on vain 24V. Kuitenkin ensiön ja toisin välille tulee saada vähintään 500V eristävyys, jotta vikatilanteessa ensiö ja toisio eivät olisi galvaanisesti yhdessä. Eristävyyden saavuttamiseksi riittää eristeiksi lasikuituteippi ja käämilangan oma pinnoite.

Jotta pääsisimme suunnittelussa eteenpäin, tulee meidän valita toisiojännite. Toisiojännitteen valinnan jälkeen voimme ratkaista muuntosuhteen. Koska tyhjäkäyntijännitteen on oltava suurempi, mitä täydellä kuormituksella oleva jännite. Kannattaa aluksi mitoittaa toisiojännite esimerkiksi 10% suuremmaksi, mitä nimellisjännite on. Invertterikäytössä liian suuri jännite voidaan laskea sopivaksi hakkuriosassa lyhentämällä ohjauspulssin pituutta.

Toisiojännitteeksi 10% lisämarginaalilla tulee 264V. Toivottu ulostulojännite toisiopuolella olisi n.240V, josta eri prosesseissa aiheutuvien häviöiden jälkeen todellinen ulostulojännite olisi 230V. Kuitenkin muuntajan ulostulojännite laskee kuormituksen alaisena, joten tyhjäkäyntijännite on hyvä asettaa hieman korkeammaksi.

Selvittääksemme toision kierroslukumäärän käytetään aiemmin esiteltyä kaavaa muuntajan muuntosuhteen määrittelyyn. Muuntosuhde ja toision kierroslukumäärä on seuraavanlainen.

$$\frac{U_1}{U_2} = \frac{N_1}{N_2}$$

Tätä kaavaa pyörittelemällä saadaan toision kierroslukumäärä ratkaistua seuraavalla tavalla.

$$N_2 = \frac{N_1}{\frac{U_1}{U_2}} = \frac{2}{\frac{24V}{264V}} = 22$$

Tulokseksi saadaan 22 kierrosta, mikäli ensiössä käytetty kierroslukumäärä on kaksi kierrosta. Jos ensiössä käytettäisiin kolmea kierrosta tulisi toisioon 33 kierrosta. Tämä on mahdollista, mikäli ensiössä käytetään 35mm<sup>2</sup> käämilankaa.

Nyt meillä on tarvittavat tiedot joiden avulla voimme valmistaa muuntajan prototyypin. Luultavasti ensimmäinen prototyyppi ei toimi halutulla tavalla, joten mitoitusta ei kannata tehdä tätä tarkemmaksi vaan käytännön testeillä selvittää mihinkä suuntaan muuntajaa tulee kehittää.

Tärkeimmät tiedot muuntajan valmistamiseksi ovat käytettävät materiaalit ja muuntosuhde. Sydänmateriaaliksi valikoitui Epcosin E 65/27-sydän, ensiökäämiksi 50mm<sup>2</sup> käämilanka ja toisioon 6mm<sup>2</sup>. Toisioon täytyy laittaa 6mm<sup>2</sup> käämilanka SFS 6000 standardin mukaan. Käämilankojen mitoitukset ovat tehty kuparijohtimelle eikä ole syytä käyttää alumiinia halvemman hinnan ansiosta, sillä käytettävät määrät ovat vähäisiä.

#### **6.4 Hakkuri**

Hakkuria suunnitellessa ei kannata keksiä pyörää uudestaan, vaan käyttää hyväksi havaittuja ratkaisuja. Opinnäytetyössä käsiteltävä hakkuri sisältää käytännössä komponentit, joilla muuntajille ohjataan virtaa suuntaan ja toiseen. Hakkurin toimintaperiaatetta käsitelleessä kappaleessa tutustuttiin H-siltaan, jota tässä opinnäytetyössä aiotaan käyttää.

Jos H-sillassa haluttaisiin päästä optimaaliseen suorituskykyyn, tulisi mosfettien olla N-tyyppisiä. Tämä johtuu siitä, että N-tyypin mosfetissa on tyypillisesti vain kolmannes resistanssista johtavuustilassa verrattuna P-kanavaan. (Wikipedia H-bridge)

Kuitenkin suorituskykyistä kytkentää ajatellen, ei yksinkertaisin kytkentä välttämättä ole toimivin. Lisäksi operoidessa yli kuuloalueen taajuuden, tulee myös ongelmia komponenttien sijoittelun kanssa. Paperilla hyvä suunnitelma

voikin todellisuudessa olla täysin toimintakelvoton tai se aiheuttaa liikaa häiriöitä.

Tässä vaiheessa on kuitenkin hyvä mainita, että melkein kaikki yksinkertaiset sähköiset kytkennät on patentoitu. Tämä tarkoittaa sitä, että kaupallista käyttöä ajatellen ei valmista kytkentää voida käyttää. Kuitenkin tässä opinnäytetyössä ei ole tarkoitus suunnitella kaupallista käyttöä varten invertteriä vaan tutkailla eri näkökantoja sen toteuttamiseen kustannustehokkaasti.

Seuraavaksi onkin aika mitoittaa sopivat MOSFETit H-siltaa varten. Opinnäytetyössä ei hakkuria tulla suunnittelemaan enempää kuin hakkurin H-sillan mitoitus. Työssä on otettu lähtökohdaksi mitoittaa sopivat komponentit invertteriin ja miettiä onko invertteriä järkevä toteuttaa kustannustehokkaasti. Koska invertteristä tulisi saada ulos kolmivaiheisesti 11040W, tarkoittaa tämä ensiössä 460A virtaa ilman häviöitä.

Tämä asettaa H-sillan feteille erittäin kovat vaatimukset niin virrankestolle kuin lämpötilan kestollekin. Jos fetin kynnysjännite on 0,6V tarkoittaa tämä 460A virralla 276W tehohäviötä. Teoreettisesti ensiössä ja toisiossa teho olisi sama, mutta todellisuudessa ensiössä tehonkulutus on suurempi sillä muuntajassa ja H-sillassa tapahtuvat häviöt tulee kompensoida, mikäli tosioon halutaan 46A virta. [6.].

Myös teho mosfettien mitoituksessa kannattaa ottaa virhemarginaalia ylöspäin. Laskennallisesti ensiössä tarvittaisiin 460A virrankesto maksimi kuormituksella, mutta tähän on hyvä ottaa 10% lisää. Näin saamme ensiön virraksi 506A, tämä tarkoittaa sitä, että valittavien mosfettien virrankesto tulee olla yli 506A tai käyttää useampaa pienempi tehoista rinnankytkettynä.

Toteutuksessa olisi hyvä testata toimiiko H-silta peruskytkennällä moitteettomasti, jos toiminta on kelpollista ei lisäsuunnitteluun ole tarvetta. Mosfettien suojaksi on kuitenkin rinnankytkettävä diodit, jotta jännitepiikit eivät hajottaisi mosfetteja.



Tässä vaiheessa otolliseksi vaihtoehdoksi H-sillan mosfetiksi on International Rectifierin IRLP3034PbF tehomosfetti. Kyseisen mosfetin nielu-lähde jännitekesto on 40V ja jatkuva nieluvirta 327A 25°C lämpötilassa. Kyseinen mosfetti soveltuu erittäin hyvin nopeaan kytkentään, mitä hakkurissa tarvitaan. Näitä mosfetteja pitää käyttää tehonkeston vuoksi käyttää kaksin kappalein rinnankytkettynä. Lisäksi kyseinen komponentti kestää suuria taajuuksia ja kytkentävirtoja. Tarkemmat tiedot löytyvät liitteestä 3.

## 6.5 Jännitteen tasasuuntaus

Hakkurin jälkeen saatu jännite on tasasuunnattava, jotta sitä voitaisiin hyödyntää. Muuntajan rakenteesta johtuen tasasuuntaus kannattaa hoitaa kokoaaltotasasuuntauksella, joka toteutetaan neljällä erillisellä diodilla tai tasasuuntaussillalla. Kokoaaltotasasuuntauksella on myös se etu, että suotokondensaattoriksi riittää puolet pienempi elektrolyyttikondensaattori.

Tasasuuntaus kannattaa siis toteuttaa tasasuuntaussillalla, koska se on halpa ja järkevämpi ratkaisu tuotannollisesti. Näin saadaan komponenttien määrää vähennettyä piirilevyllä ja hävitettyä mahdollisia vikakohteita, jotka johtuvat kylmäjuotoksesta. Tasasuuntaussillan mitoittamiseen emme tarvitse muita tietoja kuin jännitteen- ja virrankeston. Jännitteenkeston on oltava vähintään 400V ja virrankeston yli 46A, vakiokokoa katsottaessa seuraava yleinen vakio koko on 1000V ja 55A. Esimerkiksi Diotecin GBI35M tasasuuntaussilta on sopiva invertteriin.

Tasasuuntauksen jälkeen jännite on sisältää pienen brummijännitteen. Brummijännite jota myös rippelijänniteeksi ja -virraksi kutsutaan on tasasuuntauksesta jäävä aaltomuodon ”harjanne” ulostuloon.

Siniaallolla brummijännite aiheuttaa hurinaa ja häiriötä laitteen toimintaan, riippuen tosin laitteen toimintaperiaatteesta. Hakkurin vaihtojännite on kanttiaaltoa, jossa tosin on pieniä muotovirheitä. Nämä muotovirheet voivat aiheuttaa tasasuuntauksen jälkeen toimintahäiriöitä laitteelle ilman suotoa. Suodoksi tähän kuitenkin riittää elektrolyyttikondensaattori.

Suotokondensaattorin koko voidaan mitoittaa, kun tiedetään brummijännitteen suuruus ja jaksonaika. Lisäksi täytyy tietää kuinka paljon virtaa kulkee täydellä kuormituksella kondensaattorin lävitse. Kondensaattorin varausta kuvataan kapasitanssilla  $C$ , jonka yksikkö on Faradi  $F$ . Kapasitanssi määritellään seuraavalla tavalla.

$$C = \frac{Q}{U}$$

Jossa:                     $Q = \text{Varaus}$   
                                $U = \text{Jännite}$

Tarkkaan mitoitukseen tarvittaisiin tieto oskilloskoopilta, kuinka monta voltia brummijännitteen suuruus on. Kuitenkin tässä tapauksessa voidaan mitoitus tehdä arviolta ja hieman suuremmaksi. Sillä kustannus teknisesti tämän kokoluokan elektrolyyttikondensaattorit eivät maksa kovinkaan paljoa. Toisaalta liian suuri suotokondensaattori muuntajan toisiossa aiheuttaa liian suurta kuormitusta muuntajalle.

Teoreettiseen mitoitukseen tarvitsemme taajuuden jota hakkuri käyttää, jotta voimme saada selville jaksonajan. Kuormitusvirta ja arvioitu brummijännite tulee tietää. Brummijännitteen voimme heittää arviolta lukemaan, jonka tahdomme suodon laaduksi. Kondensaattorin mitoitus onnistuu näillä tiedoilla kaavan mukaisesti.

$$C = \frac{I * T}{U_{brummi}} = \frac{46A * \left(\frac{1}{40000\text{Hz}} * 2\right)}{1V} * 1000000 = 2300 \mu F$$

Jossa:	C	= Kapasitanssi mikrofaradeina
	I	= Maksimi kuormitusvirta
	T	= Jaksonaika
	U	= Sallittu brummijännite

Lopputulos tulee kertoa miljoonalla niin saamme tuloksen mikrofaradeina. Myös jaksonaika tulee kertoa kahdella jotta saamme mitoitettua kondensaattorin oikein kokoaaltotasasuuntaukselle. Jos tasasuuntaus tehtäisiin vain puoliaaltona tuplaantuisi kondensaattorin koko. Tuloksesta näemme suuntaa antavan kondensaattorin koon. Kuitenkin todellisuudessa harvoin koko osuu kohdilleen, joten kyseistä tuloksesta valitaan taulukoiden mukaan lähin standardikoko joka on 2200 $\mu$ F ja lisäksi 150 $\mu$ F kondensaattori rinnankytkettynä.

Lisäksi kondensaattorin mitoitukseen tulee tietää jännitteenkesto. Koska jännitetaso toisiopuolella on n. 325V tarvitaan suurjännitteelle sopiva kondensaattori. Seuraava standardikoko on 450V joten kondensaattoreiden on oltava tätä kokoluokkaa tai suurempia. Vaihtoehtoisesti kondensaattorin jännitteenkesto voidaan kasvattaa kytkemällä ne sarjaan, jolloin voidaan käyttää pienemmän jännitekeston kondensaattoreita.

## 6.6 Pääteaste

Invertterin pääteasteessa tullaan käyttämään IGBT suurtehotransistoria. IGBT eli (Insulated Gate Bipolar Transistor) on suurtehotransistori, jossa on eristetty hila. IGBT on käytännössä bipolaaritransistori, jota ohjataan MOSFETillä. Miksi IGBT:tä käytetään tässä johtuu siitä, että IGBT kestää suuria virtoja kiinni tilassa ja suuria jännitteitä auki tilassa.

Tästä johtuen IGBT:tä onkin hyvä käyttää kytkimenä ja siihen käyttöön se onkin suunniteltu. Useasti IGBT löytääkin taajuusmuuttajan pääteasteesta. IGBT toimii hyvin yksinkertaisella kytkennällä, mutta se vaatii purkuvastuksen tai hilamuuntajan jotta hilan varauksenkuljettajat saadaan poistettua.

IGBT tulee mitoittaa sopivan kokoiseksi pääteastetta varten. Prototyyppiä varten voidaan ohjaus ja säätö tehdä mahdollisimman yksinkertaisesti. Tämä tarkoittaa sitä, että kytkentä tehdään mahdollisimman vähäisellä komponenttien määrällä. Tämän kokoluokan invertterissä erilliskomponenteilla ja moduulilla toteutetun pääteasteen hintaero jää niin pieneksi, että kannattaa valita moduuli. Moduulien etuina on se, että niitä valmistetaan myös valmiina pakettina kolmivaiheista toteutusta varten.

IGBT tehotransistori kaipaa hilalle oman muuntajan, jotta mikrokontrollerin signaalilla saadaan ohjattua eri vaiheita. Vaikka hilamuuntaja on lisäkomponentti kytkentään, sen avulla saadaan pien- ja suurjännitepuoli erotettua toisistaan. Sillä muuten nämä olisivat yhteydessä toisiinsa galvaanisesti mikrokontrollerin takia.

Hilamuuntajia on perinteisesti 1:1 ja 4:9 muuntosuhteella, nämä muuntajat on tyypillisesti käämitty ferriittitoroidisydämen ympärille. (H-Bridge en.wikipedia.org) Näillä muuntajilla saadaan IGBT:n hilalle tarpeeksi suuri jännite, jotta AVR-mikrokontrolleri pystyisi ohjaamaan sitä.



Kuva 12. Hilamuuntaja (Direct Industry)

Pääteastetta varten on siis etsittävä sopiva IGBT-moduuli. Perusteina moduulille on jännitteen- ja virrankesto. IGBT:n tulisi kestää ainakin 16A:n virta ja jännittekestoisuuden 600V. Nämä kriteerit täyttyvät Infineonin BSM 25GD

120DN2 IGBT-moduulilla. Kyseinen moduuli kestää 1200V jännitteen ja 20A:n kuormitusvirran. Tarkemmat tiedot löytyvät liitteestä 4.

## 6.7 Jännitteen vakavointi

Jännitteen vakavointiin tarvitaan alipäästösuodin, kuten aiemmassa kappaleessa on jo todettu. Alipäästösuotimen tehtävänä invertterissä on laskea 50Hz taajuus läpi ja estää sitä suurempien taajuuksien läpipääsy. Kolmivaiheissa ratkaisussa näitä alipäästösuotimia tarvitaan kolme kappaletta.

Valitettavasti alipäästösuotimet hukkaavat tehoa, mutta ne ovat pulssinleveysmodulaation takia välttämättömiä. Mitoitukselle kriteerejä asettaa lähtöjännite, joka on 230V, 16A:n virta ja 50Hz:n taajuus. Tästä johtuen ei kannata käyttää perinteistä RC-suodinta vaan käyttää siitä eteenpäin kehiteltyä RLC-suodinta.

Aluksi tarkastella valmiita alipäästösuotimia tai kuristimia, mikäli alipäästösuodin kasataan itse. Pelkästään valmiin kuristinkomponentin löytäminen alentaa kustannuksia merkittävästi, joten tarpeeksi lähelle osuva kuristin kannattaa ottaa tarkempaan tarkasteluun.

Pikaisesti tarkisteltuna 16A ja 1mH kuristimia löytyy suhteellisen edullisesti ja ne ovat varastotavaraa. Kyseisen kuristimen ympärille on mahdollista suunnitella alipäästösuodin, sillä tiedossa on kuormitusvirta, induktanssi ja taajuus. Jäljelle jää vain kapasitanssin määrittäminen. Tarkkaan suotimen mitoitukseen löytyy valmiita laskureita eikä käsin laskeminen ole välttämättä järkevää tämän RLC-tyyppisen suotimen mitoitukseen.

Koska 50Hz taajuus on yleinen, kannattaa etsiä myös valmiita alipäästösuodinta. Vaikka tämä vaihtoehto olisi hinnakkaampi, säästäisi tämä aikaa kokoonpanotyöltä sekä mitoittamiselta.

## 7 Invertterin valmistuskustannuksia

Invertterissä komponentit ovat suurin yksittäinen menoerä. Seuraava kustannuksia nostava asia on invertterin valmistaminen. Koska työn teettäminen on kallista, pitäisi invertterin kasauskustannukset saada mahdollisimman pieneksi.

Tässä työssä ei puututa invertterin ihmistyöstä aiheutuviin valmistuskustannuksiin ja niiden muodostumiseen. Vaan enemmänkin paljonko inverttereiden pääkomponenttien hinta on ja kuinka invertterin kokonaishintaa ja valmistusaikaa saisi pienennettyä.

Ensimmäisenä seikkana kustannusten vähentämisessä tulisi ottaa huomioon suunnittelu. Invertteri pitäisi suunnitella niin pitkälle, että valmistuksessa kokoonpanotyön osuus olisi pienin. Myös kotelointi tulisi suunnitella siten, että koteloon ei tarvitse porailla monia reikiä, piirilevy ja tarvittavat komponentit saataisiin mahdollisimman helposti ja nopeasti kiinni.

Piirilevyt ja kotelot tulisikin siis tilata valmiina, eikä todellakaan alkaa valmistamaan itse. Näin myöskin laatu saadaan kohdilleen ja virheiden mahdollisuus pienenee. Myöskin kunnolla valmistettu piirilevy on hakkurissa paljon parempi vaihtoehto, kuin itse syövytetty piirilevy. Lähtökohtaisesti kokoonpanovaiheessa ainoana työnä olisi komponenttien kiinnittäminen ja laitteen kasaus.

Koska ilman prototyypin valmistusta ja suunnittelua on hankala arvioida kuinka paljon invertteri tulee kustantamaan, voidaan tarkastella edellä valittujen komponenttien hintoja. Kyseiset komponentit ovat vain osa invertteriä, mutta edustavat hinnaltaan molempaa päätä. Kaikki taulukossa olevat komponentit komponentit löytävät Elfa elektroniikan valikoimista ja hinnat on kerätty huhtikuun 2.päivä. [8.].

Taulukko 1.

Nimike	Hinta	Määrä	Yhteensä
Ferriittisydän	9,83 €	1	9,83 €
Mosfet	7,15 €	8	57,20 €
Tasasuuntaus	3,39 €	1	3,39 €
IGBT	91,80 €	1	91,80 €
			<b>162,22 €</b>

Taulukosta näemme, että näiden osien hinta ei ole mikään mahdottoman suuri. Kuitenkin tässä on vain osa osista mitä invertteri tulee sisältämään ja kokonaiskustannus komponenttien osalta on moninkertainen verrattuna taulukossa olevaan. Myöskään kotelointia ja sopivaa koteloa ei voi valita ennenkuin kaikki muut komponentit on valittu ja sijoiteltu piirilevylle oikein. Tämä siinä tapauksessa, mikäli haluaa rakentaa mahdollisimman kompakti invertteri. Lisäksi lopulliseen invertterin hintaan tulee myös kokoamisesta aiheutuvat valmistuskustannukset.

Jos ajatellaan rakennettavan tämän tyyppistä invertteriä, pelkästään osien hinnalla saa valmiin yksivaiheisen siniaaltoinvertterin. Onkin siis syytä miettiä mitä invertteriltä haluaa ja saako valmiin ratkaisun kaupasta. Yksittäiskappaleen valmistamisessa hinta nousee korkeaksi, sillä kaikkea suunniteltua ei välttämättä pysty hyödyntämään muualla ja on niin sanotusti kertakäyttöistä.

Yhteenvetona yksittäiskappaleina tuotettuna tällainen invertteri tulee kalliiksi, mutta jos valmistusmäärät ovat suuria. Saadaan sarjatuotannolla ja isommalla komponenttien tilausmäärällä hintaa alas, jolloin invertteristä tulee hinnaltaan kilpailukykyinen. Sarjatuotannolla saadaan myös kokoamisen työvaiheetkin tehokkaammiksi, jolloin invertterin rakentaminen olisi järkevämpää.

## 8 Loppupäätelmät

Aiemmissa kappaleissa käsiteltyjen asioiden perusteella voidaan todeta, että invertteri ei ole yksinkertainen laite suunnitella, vaikka laitteen peruseriaate onkin suhteellisen yksinkertainen. Onkin syytä miettiä vakavasti kannattaako invertteriä lähteä toteuttamaan hakkurityyppisesti, mikäli valmistusmäärä on pienehkö.

Vaikka hakkurityyppinen invertteri tuleekin perinteistä ratkaisua halvemmaksi komponenteiltaan, vaati se erittäin paljon työtä ja testausta toimivan prototyypin valmistumiseksi. Jos tarkoituksena on valmistaa vain muutama kappale kannattaa invertterin toteutus tehdä ilman hakkuritekniikkaa. Ellei puhtaasta mielenkiinnosta aleta valmistamaa erikoisvalmisteisia ferriittimuuntajia ja niille soveltuvaa ohjauspiiriä.

Hakkuritekniikan erinomaisina puolina on tosin pieni koko ja kustannustehokkuus. Puolestaan heikkous induktiivisia kuormia ja jännitepiikkejä kohtaan osoittautuvat hakkurityyppisen invertterin akileen kantapääksi. Nämä ongelmat ovat kuitenkin ratkaistavissa hyvällä suunnittelulla ja huolellisella testauksella, ennen varsinaisen valmiin laitteen käyttöönottoa.

Kuitenkin suunnittelu- ja testaustyö on kallista, joten kovin pienen valmistuserän takia kustannukset nousisivat hyvinkin suureksi. Ellei aiota valmistaa eri kokoluokan inverttereitä, jotka jakaisivat saman perusalustan. Opinnäytetyössä tutkaillun piensarjavalmistuksen kannalta ei hakkurityyppistä invertteriä kannata ruveta itse rakentamaan, vaan etsiä valmiita ratkaisuja.



## Lähteet

- 1 [http://en.wikipedia.org/wiki/Power\\_inverter](http://en.wikipedia.org/wiki/Power_inverter). 7.1.2013.
- 2 [http://powerelectronics.com/site-files/powerelectronics.com/files/archive/powerelectronics.com/mag/608P\\_ET21.pdf](http://powerelectronics.com/site-files/powerelectronics.com/files/archive/powerelectronics.com/mag/608P_ET21.pdf). 1.2.2013.
- 3 Euroopan parlamentin ja neuvoston direktiivi 2004/108/EY <http://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=OJ:L:2004:390:0024:0037:fi:PDF>. 10.4.2013.
- 4 KTM-asetus 1193/1999  
<http://www.edilex.fi/tukes/fi/lainsaadanto/19991193?toc=1>. 13.2.2013.
- 5 <http://en.wikipedia.org/wiki/Transformer>. 7.1.2013.
- 6 [http://en.wikipedia.org/wiki/Class-D\\_amplifier](http://en.wikipedia.org/wiki/Class-D_amplifier). 20.1.2013.
- 7 [http://en.wikipedia.org/wiki/Low-pass\\_filter](http://en.wikipedia.org/wiki/Low-pass_filter). 20.1.2013.
- 8 <https://www.elfaelektronikka.fi/elfa3/index.html>. 2.4.2013.

## Features

- High-performance, Low-power Atmel® AVR® 8-bit Microcontroller
- Advanced RISC Architecture
  - 131 Powerful Instructions – Most Single-clock Cycle Execution
  - 32 x 8 General Purpose Working Registers
  - Fully Static Operation
  - Up to 16 MIPS Throughput at 16 MHz
  - On-chip 2-cycle Multiplier
- High Endurance Non-volatile Memory segments
  - 16 Kbytes of In-System Self-programmable Flash program memory
  - 512 Bytes EEPROM
  - 1 Kbyte Internal SRAM
  - Write/Erase Cycles: 10,000 Flash/100,000 EEPROM
  - Data retention: 20 years at 85°C/100 years at 25°C<sup>(1)</sup>
  - Optional Boot Code Section with Independent Lock Bits
  - In-System Programming by On-chip Boot Program
  - True Read-While-Write Operation
  - Programming Lock for Software Security
- JTAG (IEEE std. 1149.1 Compliant) Interface
  - Boundary-scan Capabilities According to the JTAG Standard
  - Extensive On-chip Debug Support
  - Programming of Flash, EEPROM, Fuses, and Lock Bits through the JTAG Interface
- Peripheral Features
  - Two 8-bit Timer/Counters with Separate Prescalers and Compare Modes
  - One 16-bit Timer/Counter with Separate Prescaler, Compare Mode, and Capture Mode
  - Real Time Counter with Separate Oscillator
  - Four PWM Channels
  - 8-channel, 10-bit ADC
    - 8 Single-ended Channels
    - 7 Differential Channels in TQFP Package Only
    - 2 Differential Channels with Programmable Gain at 1x, 10x, or 200x
  - Byte-oriented Two-wire Serial Interface
  - Programmable Serial USART
  - Master/Slave SPI Serial Interface
  - Programmable Watchdog Timer with Separate On-chip Oscillator
  - On-chip Analog Comparator
- Special Microcontroller Features
  - Power-on Reset and Programmable Brown-out Detection
  - Internal Calibrated RC Oscillator
  - External and Internal Interrupt Sources
  - Six Sleep Modes: Idle, ADC Noise Reduction, Power-save, Power-down, Standby and Extended Standby
- I/O and Packages
  - 32 Programmable I/O Lines
  - 40-pin PDIP, 44-lead TQFP, and 44-pad QFN/MLF
- Operating Voltages
  - 2.7V - 5.5V for ATmega16L
  - 4.5V - 5.5V for ATmega16
- Speed Grades
  - 0 - 8 MHz for ATmega16L
  - 0 - 16 MHz for ATmega16
- Power Consumption @ 1 MHz, 3V, and 25°C for ATmega16L
  - Active: 1.1 mA
  - Idle Mode: 0.35 mA
  - Power-down Mode: < 1 µA



**8-bit AVR®  
Microcontroller  
with 16K Bytes  
In-System  
Programmable  
Flash**

**ATmega16  
ATmega16L**





E 65/32/27

Core

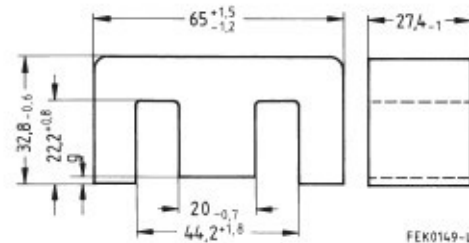
B66387

■ E cores are supplied as single units

**Magnetic characteristics (per set)**

$\Sigma/A = 0,27 \text{ mm}^{-1}$   
 $l_e = 147 \text{ mm}$   
 $A_e = 535 \text{ mm}^2$   
 $A_{\text{min}} = 529 \text{ mm}^2$   
 $V_e = 78600 \text{ mm}^3$

Approx. weight 394 g/set



**Ungapped**

Material	$A_L$ value nH	$\mu_e$	$A_{L1\text{min}}$ nH	$P_V$ W/set	Ordering code
N27	7200 + 30/- 20 %	1570	5730	< 14,60 (200 mT, 25 kHz, 100 °C)	B66387-G-X127
N87	7900 + 30/- 20 %	1700	5730	< 6,70 (100 mT, 100 kHz, 100 °C)	B66387-G-X187

**Gapped**

Material	$g$ mm	$A_L$ value approx. nH	$\mu_e$	Ordering code ** = 27 (N27) = 87 (N87)
N27,	0,50 ± 0,05	1214	265	B66387-G500-X1**
N87	1,00 ± 0,05	716	156	B66387-G1000-X1**
	1,50 ± 0,05	526	115	B66387-G1500-X1**

The  $A_L$  value in the table applies to a core set comprising one ungapped core (dimension  $g = 0$ ) and one gapped core (dimension  $g > 0$ ).

**Calculation factors** (for formulas, see "E cores: general information", page 382)

Material	Relationship between air gap – $A_L$ value		Calculation of saturation current			
	$K1$ (25 °C)	$K2$ (25 °C)	$K3$ (25 °C)	$K4$ (25 °C)	$K3$ (100 °C)	$K4$ (100 °C)
N27	716	- 0,762	1231	- 0,847	1154	- 0,865
N87	716	- 0,762	1168	- 0,796	1131	- 0,873

Validity range:  $K1, K2: 0,20 \text{ mm} < s < 5,00 \text{ mm}$   
 $K3, K4: 230 \text{ nH} < A_L < 2290 \text{ nH}$

# IRLP3034PbF

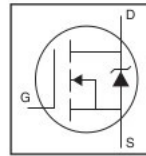
HEXFET® Power MOSFET

**Applications**

- DC Motor Drive
- High Efficiency Synchronous Rectification in SMPS
- Uninterruptible Power Supply
- High Speed Power Switching
- Hard Switched and High Frequency Circuits

**Benefits**

- Optimized for Logic Level Drive
- Very Low  $R_{DS(ON)}$  at 4.5V  $V_{GS}$
- Superior  $R^*Q$  at 4.5V  $V_{GS}$
- Improved Gate, Avalanche and Dynamic  $dV/dt$  Ruggedness
- Fully Characterized Capacitance and Avalanche SOA
- Enhanced body diode  $dV/dt$  and  $dI/dt$  Capability
- Lead-Free



$V_{DSS}$		<b>40V</b>
$R_{DS(on)}$	typ.	<b>1.4mΩ</b>
	max.	<b>1.7mΩ</b>
$I_D$ (Silicon Limited)		<b>327A</b> Ⓣ
$I_D$ (Package Limited)		<b>195A</b>



<b>G</b>	<b>D</b>	<b>S</b>
Gate	Drain	Source

**Absolute Maximum Ratings**

Symbol	Parameter	Max.	Units
$I_D$ @ $T_C = 25^\circ\text{C}$	Continuous Drain Current, $V_{GS} @ 10\text{V}$ (Silicon Limited)	327Ⓣ	A
$I_D$ @ $T_C = 100^\circ\text{C}$	Continuous Drain Current, $V_{GS} @ 10\text{V}$ (Silicon Limited)	232 Ⓣ	
$I_D$ @ $T_C = 25^\circ\text{C}$	Continuous Drain Current, $V_{GS} @ 10\text{V}$ (Package Limited)	195	
$I_{DM}$	Pulsed Drain Current Ⓣ	1308	
$P_D$ @ $T_C = 25^\circ\text{C}$	Maximum Power Dissipation	341	W
	Linear Derating Factor	2.3	W/°C
$V_{GS}$	Gate-to-Source Voltage	$\pm 20$	V
$dv/dt$	Peak Diode Recovery Ⓣ	4.6	V/ns
$T_J$	Operating Junction and Storage Temperature Range	-55 to + 175	°C
$T_{STG}$			
	Mounting torque, 6-32 or M3 screw	10lbf-in (1.1N-m)	

**Avalanche Characteristics**

$E_{AS}$ (Thermally limited)	Single Pulse Avalanche Energy Ⓣ	224	mJ
$I_{AR}$	Avalanche Current Ⓣ	See Fig. 14, 15, 22a, 22b,	A
$E_{AR}$	Repetitive Avalanche Energy Ⓣ		mJ

**Thermal Resistance**

Symbol	Parameter	Typ.	Max.	Units
$R_{\theta JC}$	Junction-to-Case Ⓣ	—	0.44	°C/W
$R_{\theta CS}$	Case-to-Sink, Flat, Greased Surface	0.24	—	
$R_{\theta JA}$	Junction-to-Ambient	—	40	

IRLP3034PbF

International  
IGR Rectifier


Static @ T<sub>J</sub> = 25°C (unless otherwise specified)

Symbol	Parameter	Min.	Typ.	Max.	Units	Conditions
V <sub>(BR)DSS</sub>	Drain-to-Source Breakdown Voltage	40	—	—	V	V <sub>GS</sub> = 0V, I <sub>D</sub> = 250µA
ΔV <sub>(BR)DSS/ΔT<sub>J</sub></sub>	Breakdown Voltage Temp. Coefficient	—	0.04	—	V/°C	Reference to 25°C, I <sub>D</sub> = 5mA <sup>②</sup>
R <sub>DS(on)</sub>	Static Drain-to-Source On-Resistance	—	1.4	1.7	mΩ	V <sub>GS</sub> = 10V, I <sub>D</sub> = 195A <sup>③</sup>
		—	1.6	2.0		V <sub>GS</sub> = 4.5V, I <sub>D</sub> = 172A <sup>③</sup>
V <sub>GS(th)</sub>	Gate Threshold Voltage	1.0	—	2.5	V	V <sub>DS</sub> = V <sub>GS</sub> , I <sub>D</sub> = 250µA
I <sub>DSS</sub>	Drain-to-Source Leakage Current	—	—	20	µA	V <sub>DS</sub> = 40V, V <sub>GS</sub> = 0V
		—	—	250		V <sub>DS</sub> = 40V, V <sub>GS</sub> = 0V, T <sub>J</sub> = 125°C
I <sub>GSS</sub>	Gate-to-Source Forward Leakage	—	—	100	nA	V <sub>GS</sub> = 20V
	Gate-to-Source Reverse Leakage	—	—	-100		V <sub>GS</sub> = -20V
R <sub>G(int)</sub>	Internal Gate Resistance	—	2.1	—	Ω	

Dynamic @ T<sub>J</sub> = 25°C (unless otherwise specified)

Symbol	Parameter	Min.	Typ.	Max.	Units	Conditions
g <sub>fs</sub>	Forward Transconductance	286	—	—	S	V <sub>DS</sub> = 10V, I <sub>D</sub> = 195A
Q <sub>g</sub>	Total Gate Charge	—	108	162	nC	I <sub>D</sub> = 185A
Q <sub>gs</sub>	Gate-to-Source Charge	—	29	—		V <sub>DS</sub> = 20V
Q <sub>gd</sub>	Gate-to-Drain ("Miller") Charge	—	54	—		V <sub>GS</sub> = 4.5V <sup>④</sup>
Q <sub>sync</sub>	Total Gate Charge Sync. (Q <sub>g</sub> - Q <sub>gd</sub> )	—	54	—		I <sub>D</sub> = 185A, V <sub>DS</sub> = 0V, V <sub>GS</sub> = 4.5V
t <sub>i(on)</sub>	Turn-On Delay Time	—	65	—	ns	V <sub>DD</sub> = 26V
t <sub>r</sub>	Rise Time	—	827	—		I <sub>D</sub> = 195A
t <sub>i(off)</sub>	Turn-Off Delay Time	—	97	—		R <sub>G</sub> = 2.1Ω
t <sub>f</sub>	Fall Time	—	355	—		V <sub>GS</sub> = 4.5V <sup>④</sup>
C <sub>iss</sub>	Input Capacitance	—	10315	—	pF	V <sub>GS</sub> = 0V
C <sub>oss</sub>	Output Capacitance	—	1980	—		V <sub>DS</sub> = 25V
C <sub>rss</sub>	Reverse Transfer Capacitance	—	935	—		f = 1.0MHz
C <sub>oss eff. (ER)</sub>	Effective Output Capacitance (Energy Related) <sup>⑤</sup>	—	2378	—		V <sub>GS</sub> = 0V, V <sub>DS</sub> = 0V to 32V <sup>⑥</sup>
C <sub>oss eff. (TR)</sub>	Effective Output Capacitance (Time Related) <sup>⑥</sup>	—	2986	—		V <sub>GS</sub> = 0V, V <sub>DS</sub> = 0V to 32V <sup>⑥</sup>

Diode Characteristics

Symbol	Parameter	Min.	Typ.	Max.	Units	Conditions
I <sub>S</sub>	Continuous Source Current (Body Diode)	—	—	327 <sup>⑦</sup>	A	MOSFET symbol showing the integral reverse p-n junction diode. 
I <sub>SM</sub>	Pulsed Source Current (Body Diode) <sup>⑧</sup>	—	—	1308		
V <sub>SD</sub>	Diode Forward Voltage	—	—	1.3	V	T <sub>J</sub> = 25°C, I <sub>S</sub> = 195A, V <sub>GS</sub> = 0V <sup>⑨</sup>
t <sub>rr</sub>	Reverse Recovery Time	—	39	—	ns	T <sub>J</sub> = 25°C
		—	41	—		T <sub>J</sub> = 125°C
Q <sub>rr</sub>	Reverse Recovery Charge	—	39	—	nC	T <sub>J</sub> = 25°C
		—	46	—		T <sub>J</sub> = 125°C
I <sub>RRM</sub>	Reverse Recovery Current	—	1.7	—	A	T <sub>J</sub> = 25°C
t <sub>on</sub>	Forward Turn-On Time	Intrinsic turn-on time is negligible (turn-on is dominated by LS+LD)				

Notes:

- ① Calculated continuous current based on maximum allowable junction temperature Bond wire current limit is 195A. Note that current limitation arising from heating of the device leads may occur with some lead mounting arrangements.
- ② Repetitive rating; pulse width limited by max. junction temperature.
- ③ Limited by T<sub>Jmax</sub>, starting T<sub>J</sub> = 25°C, L = 0.013mH  
R<sub>G</sub> = 25Ω, I<sub>AS</sub> = 195A, V<sub>GS</sub> = 10V. Part not recommended for use above this value.
- ④ I<sub>SD</sub> ≤ 195A, di/dt ≤ 841A/µs, V<sub>DD</sub> ≤ V<sub>(BR)DSS</sub>, T<sub>J</sub> ≤ 175°C.

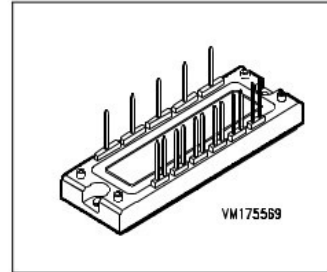
- ⑤ Pulse width ≤ 400µs; duty cycle ≤ 2%.
- ⑥ C<sub>oss eff. (TR)</sub> is a fixed capacitance that gives the same charging time as C<sub>oss</sub> while V<sub>DS</sub> is rising from 0 to 80% V<sub>DSS</sub>.
- ⑦ C<sub>oss eff. (ER)</sub> is a fixed capacitance that gives the same energy as C<sub>oss</sub> while V<sub>DS</sub> is rising from 0 to 80% V<sub>DSS</sub>.
- ⑧ R<sub>q</sub> is measured at T<sub>J</sub> approximately 90°C

## BSM 25 GD 120 DN2

eupec

## IGBT Power Module

- Power module
- 3-phase full-bridge
- Including fast free-wheel diodes
- Package with insulated metal base plate



Type	$V_{CE}$	$I_C$	Package	Ordering Code
BSM 25 GD 120 DN2	1200V	35A	ECONOPACK 2	C67076-A2505-A67
BSM 25 GD120DN2E3224	1200V	35A	ECONOPACK 2K	C67070-A2505-A67

## Maximum Ratings

Parameter	Symbol	Values	Unit
Collector-emitter voltage	$V_{CE}$	1200	V
Collector-gate voltage	$V_{CGR}$	1200	
$R_{GE} = 20 \text{ k}\Omega$		1200	
Gate-emitter voltage	$V_{GE}$	$\pm 20$	
DC collector current	$I_C$		A
$T_C = 25 \text{ }^\circ\text{C}$		35	
$T_C = 80 \text{ }^\circ\text{C}$		25	
Pulsed collector current, $t_p = 1 \text{ ms}$	$I_{Cpuls}$		
$T_C = 25 \text{ }^\circ\text{C}$		70	
$T_C = 80 \text{ }^\circ\text{C}$		50	
Power dissipation per IGBT	$P_{tot}$		W
$T_C = 25 \text{ }^\circ\text{C}$		200	
Chip temperature	$T_j$	+ 150	$^\circ\text{C}$
Storage temperature	$T_{stg}$	-40 ... + 125	
Thermal resistance, chip case	$R_{thJC}$	$\leq 0.6$	KW
Diode thermal resistance, chip case	$R_{thJCD}$	$\leq 1$	
Insulation test voltage, $t = 1 \text{ min.}$	$V_{is}$	2500	Vac
Creepage distance	-	16	mm
Clearance	-	11	
DIN humidity category, DIN 40 040	-	F	sec
IEC climatic category, DIN IEC 68-1	-	40 / 125 / 56	