



INVERTTERITOPOLOGIOIDEN VERTAILU AURINKOSÄHKÖKÄYTISSÄ

Lappeenrannan–Lahden teknillinen yliopisto LUT

Sähkötekniikan diplomityö

2022

Juho Ryyänen

Tarkastajat: Professori Pasi Peltoniemi

Professori Pertti Silventoinen

TIIVISTELMÄ

Lappeenrannan–Lahden teknillinen yliopisto LUT

LUT School of Energy Systems

Sähkötekniikan koulutusohjelma

Juho Ryyänen

Invertteritopologioiden vertailu aurinkosähkökäytöissä

Sähkötekniikan diplomityö

2022

32 sivua, 59 kuvaa, 1 taulukko ja 2 liitettä

Tarkastajat: Professorit Pasi Peltoniemi ja Pertti Silventoinen.

Avainsanat: invertteri, topologia, aurinkovoima

Diplomityön tavoitteena on esitellä aurinkosähkökäyttöön soveltuvia invertteritopologioita ja vertailla niitä keskenään. Työssä esitellään 29 eri invertteritopologiaa, joista neljään perehdytään tarkemmin. Vertailtaviksi parametreiksi valittiin THD, ohjattavien puolijohdekomponenttien määrä, suositeltu teholuokka, galvaaninen erotus, jännitealue ja moduloinnin haastavuus. Havaittiin, että H-silta tuottaa pienimmän THD:n, kunhan tulojännitealue on pieni. Laajin käyttöalue pienellä THD:lla on HERIC-topologialla, mutta sen ohjaaminen on haastavampaa ja komponenttimäärä on suuri. Boost-topologiat mahdollistavat laajan käyttöalueen helpolla ohjauksella THD:n kustannuksella. Suurin osa inverttereistä sijoittuu 10-30 kW tehoalueelle, mutta tarkasteltavana on myös muutamia alle 300 W yli 30 kW konfiguraatioita. Työ on tyypiltään kirjallisuustutkimus.

ABSTRACT

Lappeenranta–Lahti University of Technology LUT

LUT School of Energy Systems

Electrical Engineering

Juho Ryyänen

Comparison of inverter topologies in solar energy systems

Master's thesis

2022

32 pages, 59 figures, 1 table and 2 appendices

Examiners: Professors Pasi Peltoniemi and Pertti Silventoinen

Keywords: inverter, topology, solar power

The aim of the thesis is to introduce inverter topologies that are suitable for solar power purposes. In the research, 29 different inverter topologies are presented. Four of which are taken into a further inspection. The compared parameters of the topologies are THD, the number of controllable semiconductors, preferable power level, galvanic isolation, voltage range and how challenging modulation is. It was observed, that the H-bridge produces the smallest THD as long as the input voltage range is limited. HERIC has the widest range with relatively small THD. However, modulating the topology is more challenging and it requires many components. Boost topologies enable wide voltage range with easy modulation at the cost of THD. Most of the inverters operate at 10-30 kW area. Nevertheless, there are also a few below 300 W and above 30 kW configurations.

Sisällysluettelo

Tiivistelmä

Abstract

1	Johdanto.....	5
2	Invertterin toiminta.....	6
2.1	Tyypillinen rakenne	6
2.1.1	Yksitasoinen tehonmuunto	7
2.1.2	Monitasoinen tehonmuunto.....	8
2.2	Modulointi.....	10
3	Topologioita	12
3.1	AC Moduulit	12
3.2	Ketjutetut invertterit.....	13
3.3	Moniketjuinvertterit	16
3.4	Keskitetyt invertterit	20
4	Mallinnus ja tulosten analysointi	22
5	Johtopäätökset.....	29
	Lähteet	30

Liitteet

Liite 1. Yhtälöiden johtaminen

Liite 2. Simuloitujen topologioiden PWM-signaalit

1 Johdanto

Diplomityön aiheena on invertteritopologioiden vertailu aurinkosähkökäytöissä. Aihe on enenevässä määrin olennainen fossiilisten energialähteiden korvaamisessa. Varsinkin, kun kauppasuhteet itänaapurimme kanssa eivät ole yhtä vakaalla tolalla kuin aiemmin. Vuonna 2021 jopa 34% Suomen kokonaisenergiankulutuksesta katettiin Venäjältä tuodulla energialla (Tilastokeskus, 2022). On selvää, että energian tuotantoa on lisättävä kaikilla osa-alueilla, jolloin tarve tutkimustiedolle kasvaa.

Tutkimuksessa esitellään 29 eri invertteritopologiaa, joista neljä yleisesti käytössä olevaa käydään läpi tarkemmin. Joissain yhteyksissä invertteri käsitetään yksinomaan DC-AC-muuntimena. Tässä tutkimuksessa invertterillä tarkoitetaan koko topologiaa kaikkine vaiheineen. Esimerkiksi DC-AC-DC-AC-topologiaa sanotaan invertteriksi.

Aiheesta ei ole tehty laajalti suomenkielistä tutkimusta, joten työ osaltaan paikkaa sitä aukkoa. Englanniksi aurinkovoimasta ja invertterisuunnittelusta on tehty laajalti julkaisuja jo reilun 20 vuoden ajan. Topologioiden esittelyssä päälähteenä käytetään R. Doggan ja M. K. Pathakin vuonna 2019 tekemää yleiskatsausta.

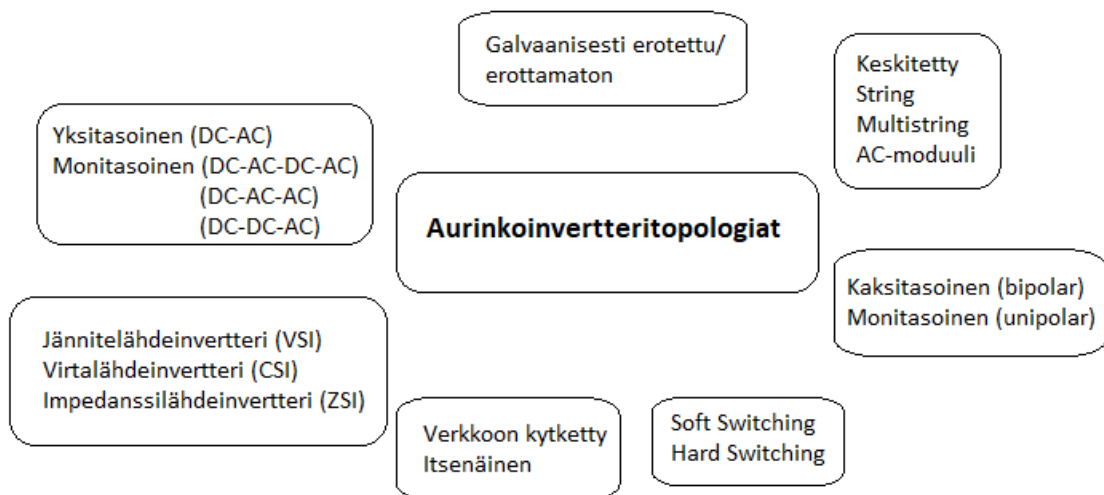
Tutkimus kokoaa yhteen useamman eri topologian suunnittelun kannalta olennaisia asioita. Vertailemalla topologioita keskenään saadaan tietoa siitä, miten tietty topologia toimii suhteessa muihin. Näin voidaan valita soveltuvin vaihtoehto tiettyyn sovellukseen. Tutkimus vastaa kysymyksiin:

- Millaisia invertteritopologioita on olemassa?
- Mikä topologia soveltuu mihinkin käyttöön?
- Miten niitä mallinnetaan ja suunnitellaan?

Tutkimuksessa keskitytään puhtaasti topologioihin. Modulointiin käytetään yksinkertaista kaksitasoista modulointia, joten sitä puolta ei ole optimoitu. Tarkempi tarkastelu tehdään vain neljälle topologialle omien resurssien ja ajan vuoksi. Aluksi esitellään topologioiden ryhmittelytapoja. Kolmannessa kappaleessa esitellään topologiat ja neljännessä kappaleessa tehdään tarkempi vertailu.

2 Invertterin toiminta

Invertterin tehtävänä on muuntaa ja käsitellä aurinkopaneelilta tuleva sähköenergia sähköverkkoon tai -käyttöön sopivaksi. Tyypiltään aurinkopaneelin tuottama sähkö on tasasähköä, jossa paneelin tuottaman virran ja jännitteen amplitudi vaihtelee kulloisenkin irradianssin mukaan (M. Hayat et. al. 2018). Invertterit voidaan jaotella ryhmiin monilla eri tavoilla. Muun muassa tehonmuunnon, galvaanisen erotuksen, kokoluokan, moduloinnin, syötön ja kytkemisen perusteella (Kuva 1).



Kuva 1. Aurinkoinvertteritopologioiden ryhmittelyä.

2.1 Tyypillinen rakenne

Valtaosa inverttereistä rakentuu seuraavista osista (K. Zeb et. al. 2018):

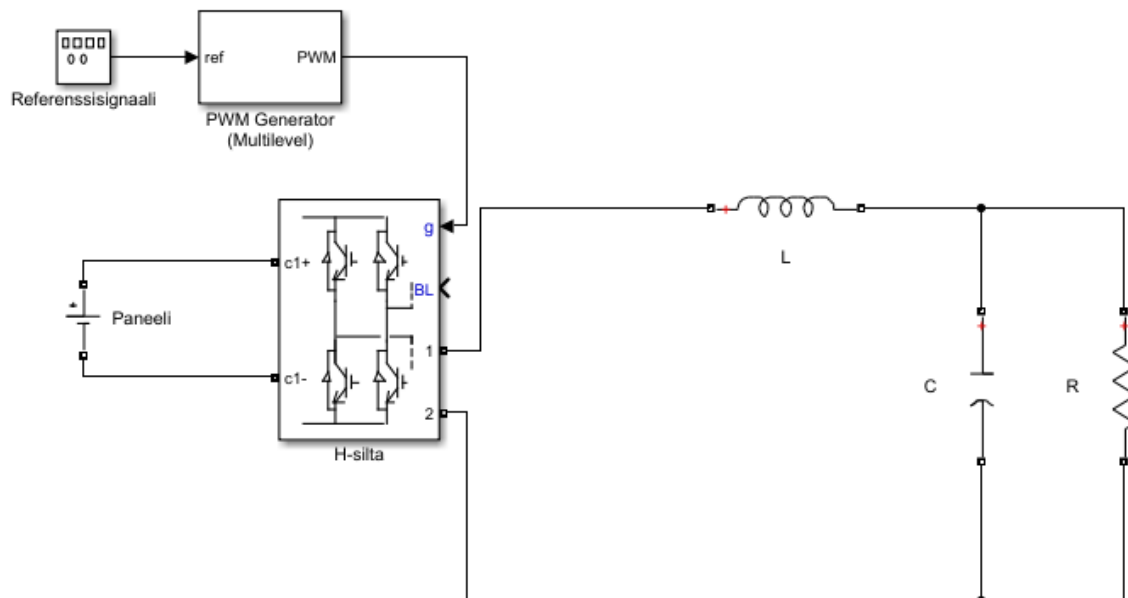
- Aurinkopaneeli/-paneelisto
- Tulon suodatus (valinnainen)
- DC-linkki
- Aurinkosähköinvertteri
- Lähdön suodatus
- Matalataajuusmuuntaja (valinnainen)

Valinnaiset osiot riippuvat invertterin tehonmuuntojen määrästä sekä sähkön laadulle ja energiatehokkuudelle asetetuista kriteereistä. Tyypillisesti hinta ratkaisee, joten komponenttimäärä pidetään minimaalisena.

2.1.1 Yksitasoinen tehonmuunto

Yksitasoisen tehonmuunnon alueelle kuuluvat invertteritopologiat, joissa on vain yksi DC/AC-muunnos. Niitä voidaan käyttää, jos paneeleilta saatava teho on sopivaa kokoluokkaa, jolloin jännitetasoa ei tarvitse nostaa tai laskea merkittävästi ennen verkkoon muuntamista. Tällöin paneeleilta saatava teho voidaan muuntaa yhdellä kertaa käyttöön sopivaksi. Hyviä puolia on muun muassa alhainen komponenttimäärä, yksinkertainen kytkentä sekä korkea luotettavuus ja suorituskyky. Huonoja puolia verrattuna monitasoisiin invertteritopologioihin ovat muun muassa kapea toiminta-alue, huono korkeiden taajuuksien suodatus sekä ohjauksen kuormittuminen, kun ohjausta ei voida jakaa usealle tehotasolle. (Xue et. al. 2004)

Hyvä esimerkki yksitasoisesta tehonmuunnosta on H-silta, jossa on vain neljä puolijohdekomponenttia ja lähdön suodatus (kuva 2.).



Kuva 2. H-siltakytkentä, jota ohjataan PWM-signaaleilla.

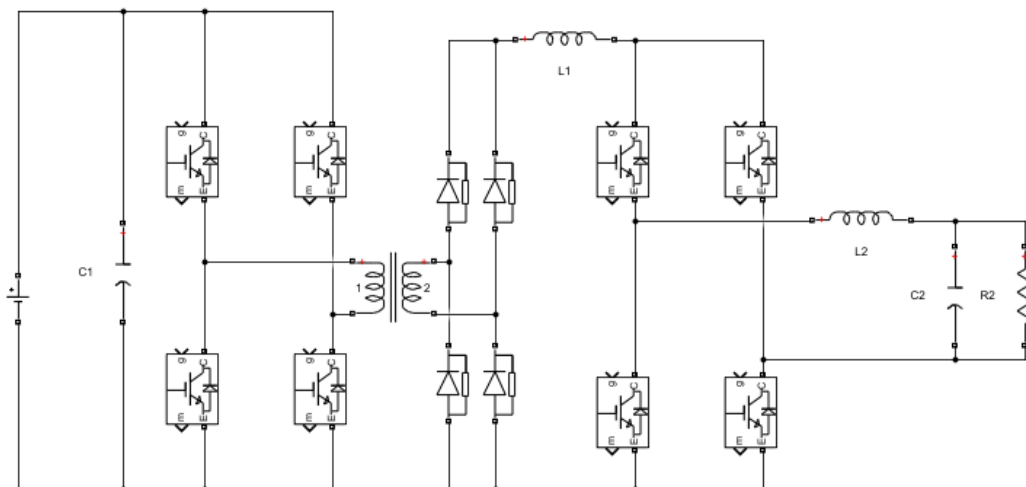
2.1.2 Monitasoinen tehonmuunto

Monitasoiseen tehonmuuntoon lasketaan invertteritopologiat, joissa on useita tehonmuunnoksia. Tyypillisimmät topologiat voidaan jakaa rakenteensa perusteella kolmeen ryhmään:

1. DC-AC-DC-AC
2. DC-AC-AC
3. DC-DC-AC

DC-AC-DC-AC -tyypin inverttereissä tulon on puolella korkeataajuinen DC-AC-invertteri. Korkeataajuinen AC muunnetaan korkeataajuusmuuntajalla halutulle jännitetasolle. Muuntajan jälkeen sähkö tasasuunnataan ja suodatetaan DC-linkin läpi. Näin saadaan vähäsäröistä tasajännitettä viimeisen vaiheen invertterille, joka muuntaa sähköön verkkoon sopivaksi. (Bizon et. al. 2007)

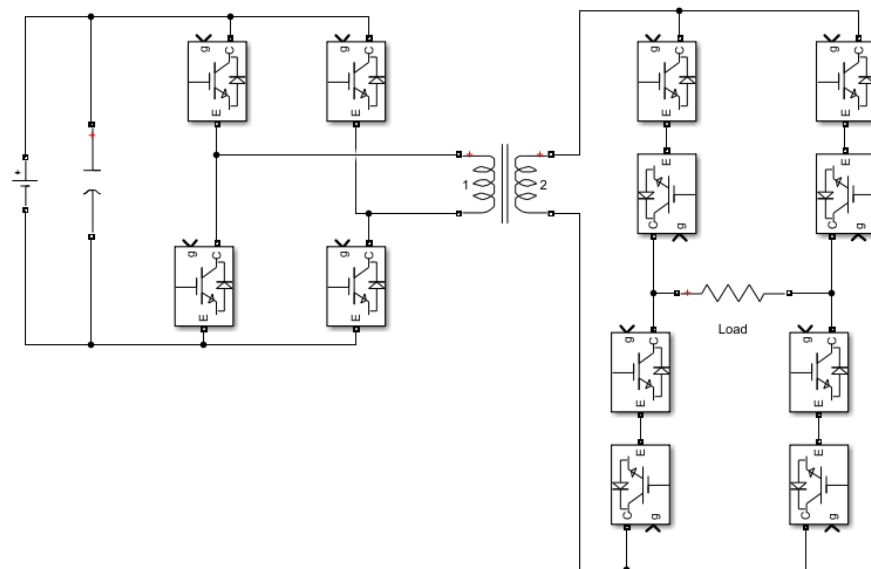
Hyvä puoli tämän tyyppin topologioissa on, että ohjausvaihtoehtoja on, ja signaaleita voidaan säätää monessa vaiheessa (L. Zhang et. al., 2014). Huonona puolena taas luonnollisesti tulee komponenttien lukumäärästä ja muuntajasta johtuen korkea hinta sekä häviöt. Topologia rohkaisee käyttämään soft switchingiä, eli kytkinten kytkemistä joko virran tai jännitteen ollessa nolla häviöiden vähentämiseksi (Zhang L. et. al., 2014, Toshiba, 2022).



Kuva 3. DC-AC-DC-AC -tyypin topologia LC-suodatuksella.

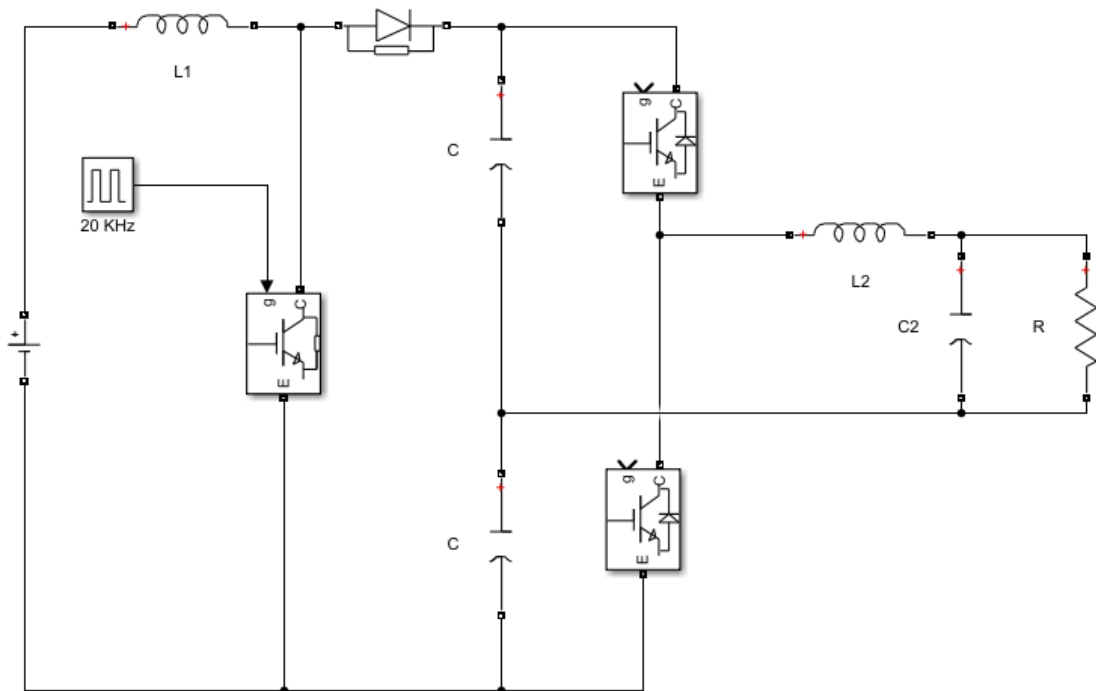
Toisessa kategoriassa (DC-AC-AC) korkeataajuusmuuttajalta tuleva vaihtosähkö muunnetaan suoraan verkkoon sopivaksi verkkosuuntaajalla. Hyviä puolia ovat galvaaninen erotus, joka suojelee verkkoa ja paneeleita johtuvilta häiriöiltä. Yksi tehotaso vähemmän kuin edellisessä topologiatyypissä, jolloin komponenttimäärä ja -häviöt pienenevät. (Beristain et al. 2003)

Topologian heikkouksina ovat tehon laatu, kun taajuusmuutos on suuri korkeataajuusmuuttajan ja verkkotaajuussillan välillä, sekä mahdollisuus epätoivotulle tehon kytkeytymiselle (power decoupling), kun DC-tehoa ei saada suodatettua pois AC-tasojen välissä.



Kuva 4. Beristain et. al. esittelemä DC-AC-AC-tyypin topologia.

Kolmas kategoria (DC-DC-AC) on yleisimmin käytetty. Se on muutoin sama kuin ensimmäinen, mutta välissä ei käytetä muuntaajaa, jolloin komponenttien määrä pienenee ja muuttajassa aiheutuvia pyörrevirtahäviöitä ei synny, mutta galvaaninen erotus menetetään. Alun buck-asteella voidaan säätää jännitetaso sopivaksi, minkä jälkeen jännite muunnetaan H-sillalla ja lähdön suodatuksella siniaalloksi. Topologiatyypissä ei ole AC-AC-muunnoksia, joten synkronointia eri tehotasojen välillä ei tarvita. (Bizon et. al. 2007)



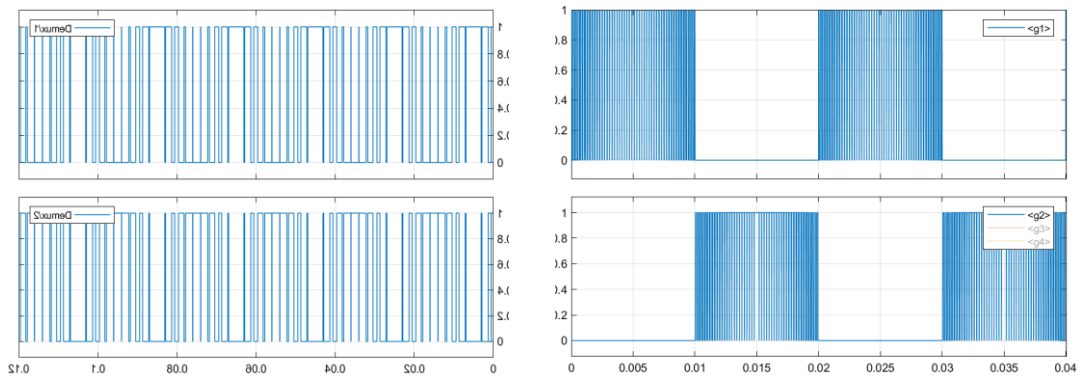
Kuva 5. DC-DC-AC -tyypin topologia LC-suodatuksella.

2.2 Modulointi

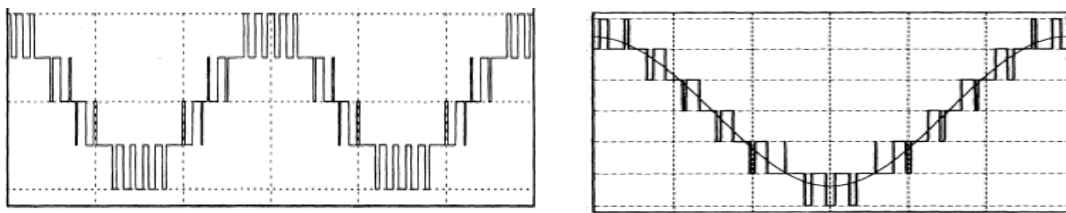
Moduloinnilla tarkoitetaan puolijohdekomponenttien kytkinten ohjaamista. Korkeataajainen kytkinten käyttö saa aikaan harmonisia yliaaltoja, joiden huomioiminen on olennaista modulointitapaa valitessa ja invertterin suodatusta suunniteltaessa. Lisäämällä modulointitapoja voidaan saavuttaa muun muassa suurempi jännitealue ja pienentää lähdön harmonisia yliaaltoja (B. P. McGrath, 2002). Kuvissa 6 ja 7 on esitetty kaksitasoisia ja monitasoisia moduloituja jännitteitä.

Pulssinleveysmodulaatio eli PWM on kytkinten ohjaustapa, jossa verrataan kantosignaalia/-signaaleita (carrier) yhteen tai useampaan referenssisignaaliin (reference). Kytkinten tiloja muutetaan, kun referenssisignaali ylittää tai alittaa kantosignaalin (hard switching) tai, kun kantosignaalin jännite tai virta on nolla tai lähellä sitä (soft switching).

Tässä tutkimuksessa modulointi on sivuosassa, joten kaikissa kytkennöissä käytetään yksinkertaista kaksitasoista pulssinleveysmodulointia.



Kuva 6. Kaksitasoisia PWM-modulointitapoja. Ensimmäisessä ylä- ja alapuolen signaalit ovat toistensa käänteisarvoja. Toisessa kytkin pidetään kokonaan pois päältä toisen ollessa päällä.



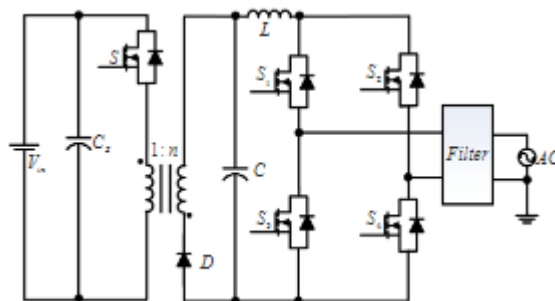
Kuva 7. Ensimmäisessä kuvassa on viisitasoinen ja toisessa kuvassa seitsentason PWM-signaali. (D. G. Holmes, 2003)

3 Topologioita

Kappaleessa esitellään 29 eri invertteritopologiaa, joilla ovat omat vahvuutensa ja heikkou- tensa. Topologiat ovat ryhmitelty tehon mukaan neljään eri luokkaan, jotka ovat AC modu- lit, kennokohtaiset invertterit, monikennoinvertterit ja keskitetyt invertterit.

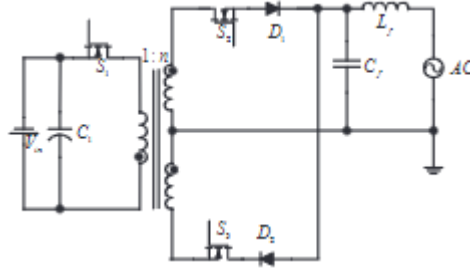
3.1 AC Moduulit

AC moduulit sopivat alle 300 W invertterisovelluksiin. Kategoriaan kuuluvat pääsääntöisesti erotetut flyback-invertterit. Saha ja Sundarsingh esittelivät kaksitasoisen erotetun buck- boost -invertterin (1996 a) (kuva 8). Kytkeä toimii matalalla tasajännitteellä. Ensimmäi- sessä vaiheessa olevan korkeataajuusmuuntajan vuoksi kytkentää ei kannata käyttää kor- keilla tehoilla. Syynä ovat muuntajassa syntyvät pyörrevirtahäviöt.

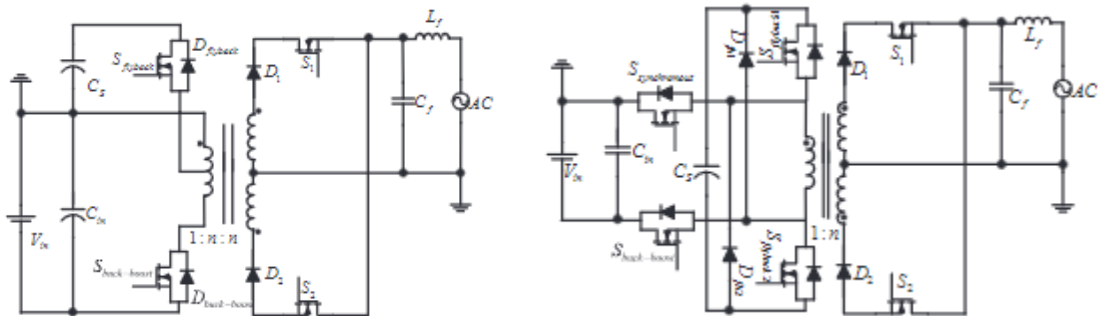


Kuva 8. Sahan ja Sundarsinghn buck-boost -invertteri. Kuvan lähde: R. Dogga ja M. K. Pathak, 2019

Kasa et. al. vuonna 1999 esittelemä flyback-invertteri soveltuu pieniin sovelluksiin. Siinä on vähän komponentteja, se on erotettu ja se tuottaa melko laadukasta lähtöjännitettä. Tämän pohjalta parannellut topologiat, flyback invertteri aktiivisella (Shimizu et. al. 2006) ja vahvistetulla (Kjaer ja Blaabjerg, 2003) dc-tehon poistolla, on esitelty kuvissa 10 ja 11. Topo- logioiden alussa buck-boost -konvertterilla säädetään jännite halutulle tasolle. Välissä oleva kondensaattori toimii energiavarastona, mikä vähentää matalataajuisia häiriöjännitettä ja harmonista säröä. Kondensaattorin energia käsitellään flyback-piirissä.



Kuva 9. Flyback-invertteri pienikokoisiin sovelluksiin (Kasa et. al. 1999). Kuvan lähde: R. Dogga ja M. K. Pathak, 2019.



Kuva 10. Kjaerin ja Blaabjergin 2003 julkaisema flyback invertteri vahvistetulla tehonpoistolla. Kuvan lähde: R. Dogga ja M. K. Pathak, 2019

Kuva 11. Shimizu et. al. julkaisema flyback-invertteri aktiivisella tehonpoistolla. Kuvan lähde: R. Dogga ja M. K. Pathak, 2019

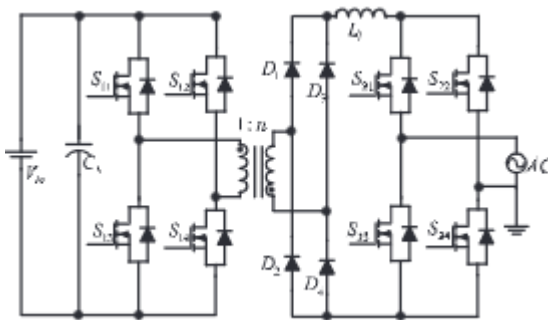
3.2 Ketjutetut invertterit

Ketjutetuilla inverttereillä tarkoitetaan monen sarjaan kytketyn invertterin muodostamaa jonoa. Ketjuttamisen vahvuutena on korkean jännitteen saaminen matalalla virralla sekä asentamisen helppous (inverter.com, 2020). Suurin heikkous on, että jos ketjun yksikin paneeli hajoaa, virtapiiri katkeaa, eivätkä paneelit tuota tehoa. Suuressa osassa topologioista on monta tehotasoa, ne ovat galvaanisesti erotettuja ja puolisolarakenteita suositaan. Tehotasoilla mahdollistetaan kuormituksen jakaantuminen tasaisemmin, jolla pyritään pidentämään paneelien elinkaarta. Galvaanisella erotuksella varmistetaan, ettei vikatilanteessa virta-/jännitepiikki pääse kytkeytymään muihin ketjun paneeleihin. Topologiat soveltuvat 1-10 kW kokoluokan sovelluksiin.

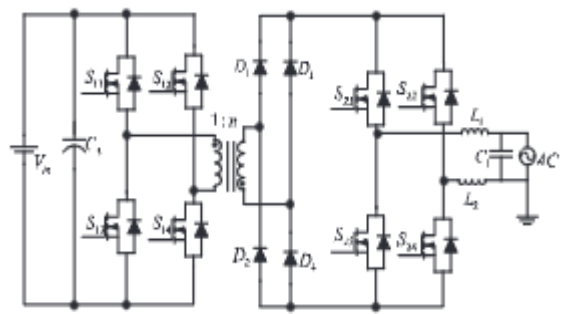
Muutamia monitasoisia inverttereitä on esitelty kuvissa 12-14. Bose et. al. julkaisema kytkentä (kuva 12) on tyypiltään DC-AC-DC-AC, jossa käytetään L-tyypin DC-linkkiä, jolloin säästetään yhden kondensaattorin kustannukset verrattuna LC-tyypin DC-linkkiin. LC-tyypin DC-linkkiin nähden topologiassa on huonompi tehon poisto. Ensimmäisessä AC-

muunnossa muodostetaan puolisiniaaltoja, jotka muutetaan viimeisessä vaiheessa kokoaloiksi. Viimeisen vaiheen invertteri on kelan vuoksi oltava virtaohjattu.

Kuvan 13 (Saha et. al. 1996 b) invertteri on muutoin toimintaperiaatteeltaan sama kuin 12, mutta DC-linkin paikalla ei ole komponentteja, joten se on näennäis-DC-linkki. Näin saavutetaan halvempi hinta ja pienempi koko, mutta harmonisten määrä lisääntyy ja tehon poisto jää vähäiseksi.

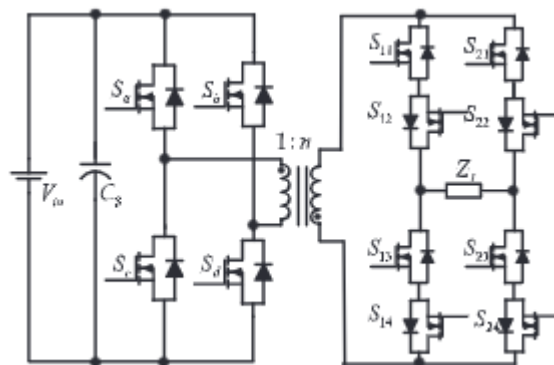


Kuva 12. Monitasoinen boost-invertteri L-tyypin DC-linkillä. Kuvan lähde: R. Dogga ja M. K. Pathak, 2019



Kuva 13. Monitasoinen boost-invertteri näennäis-DC-linkillä. Kuvan lähde: R. Dogga ja M. K. Pathak, 2019

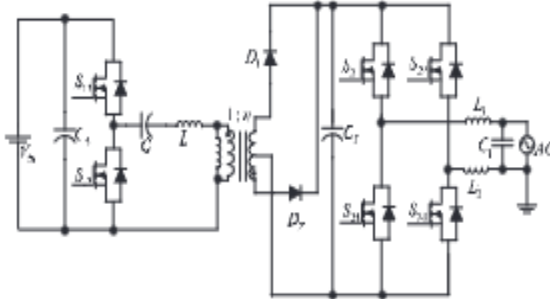
Kuvan 14 (Beristain et. al., 2003) julkaisema kaksisuuntainen DC-AC-AC-invertteri poisti edellisiin nähden tasasuuntaussillan kokonaan ja muuttaa korkeataajuisen vaihtosähkön suoraan verkkotaajuudelle. Yhden tehotason poisto vähentää häviöitä, mutta tehon laatu heikenee merkittävästi, jos taajuusero AC-AC-muunnoksessa on suuri. Lisäksi DC-linkin puuttuessa DC-tehon poistokyky on huono.



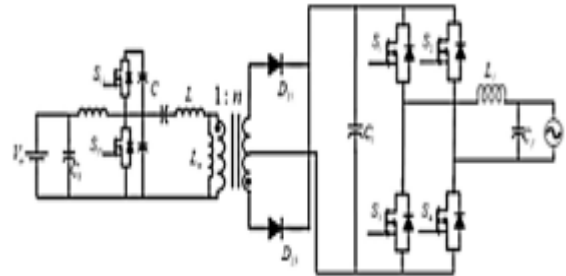
Kuva 14. Kaksisuuntainen DC-AC-AC-invertteri. Kuvan lähde: R. Dogga ja M. K. Pathak, 2019.

Kuvien 15 (Lazar ja Martinelli, 2001) ja 16 (Wolfs, 1993) kytkennässä hyödynnetään resonanssia ja nollijännitteellä kytkemistä häviöiden vähentämiseksi. Puolisilta on

kuluttavampaa kuorman kannalta täyssiltaan nähden. Kytkeäjen erona on, että 15 toimii jännitesyötöllä ja 16 virtasyötöllä. Virtasyötöllä jännitteenvahvistusta saadaan suuremmaksi.



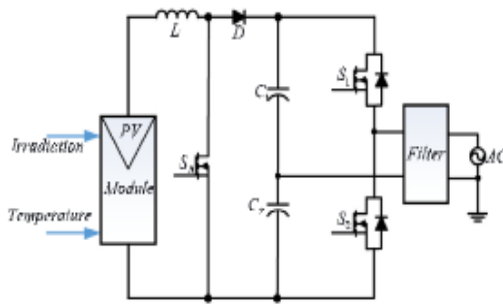
Kuva 15. Puolisilta DC-DC-AC-invertteri LLC-resonanssilla. Kuvan lähde: R. Dogga ja M. K. Pathak, 2019.



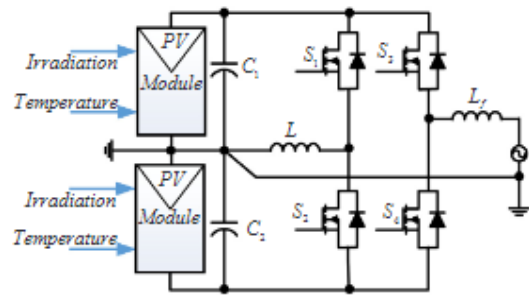
Kuva 16. Virtasyötetty puolisilta DC-DC-AC-invertteri LC-resonanssilla. Kuvan lähde: R. Dogga ja M. K. Pathak, 2019.

Kuvissa 17-19 esitellään keskenään samantyyliä puolisiltatopologioita. Yksi tavanomaisista aurinkovoimatopologioista on kuvan 17 (Boutot ja Chang, 1998) kytkentä, jossa boost-vaiheella nostetaan paneeleilta saatu jännite korkeammalle tasolle, josta se moduloinnin ja suodatuksen jälkeen lasketaan verkkoon. Kondensaattorit ovat yhtä suuria ja toimivat kolminapaisena syöttönä vaihtosuuntaussillalle, jolloin modulointiin saadaan kolme eri jännitetasoa.

Kuvan 18 kytkennässä (Blaabjerg et. al., 2004) vahvuutena on monitasoisen jännitteen mahdollisuus, jolloin moduloitu jännite on lähempänä siniaaltoa. Kun kytkimet S1 ja S2 ovat päällä, saadaan muodostettua positiivinen jännite. Kytkimillä S2 ja S3 saadaan nolla ja kytkimillä S3 ja S4 saadaan negatiivinen. Näin saavutetaan pienempi tulosärö, alhainen jännitteenvaihtelu ja mahdollistetaan korkea kytkentätaajuus pienillä harmonisilla. (M. Calais ja V. G. Agedilis, 1998)

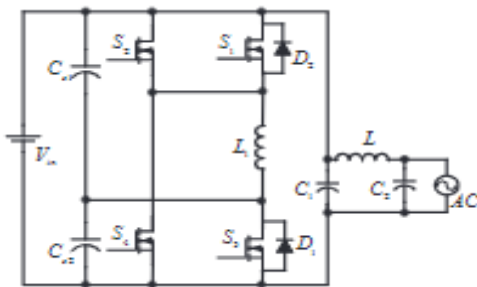


Kuva 17. Puolisiltatopologia DC-DC boostilla. Kuvan lähde: R. Dogga ja M. K. Pathak, 2019.

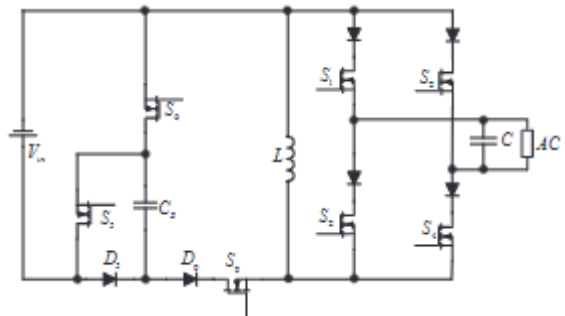


Kuva 18. Monitasoinen diodiklampattu puolisiltainvertteri. Kuvan lähde: R. Dogga ja M. K. Pathak, 2019.

Kuvan 19 ja 20 topologiat toimivat luotettavasti laajalla taajuus- ja tulojännitealueella, mutta ovat rakenteeltaan monimutkaisia, jolloin kustannukset ja komponenttihäviöt kasvavat ja ohjaus hankaloituu.



Kuva 19. Sarjaresonanssia hyödyntävä buck-boost-puolisiltainvertteri. Kuvan lähde: R. Dogga ja M. K. Pathak, 2019.



Kuva 20. Buck-boost invertteri. Kuvan lähde: R. Dogga ja M. K. Pathak, 2019.

3.3 Moniketjuinvertterit

Moniketjuinvertterit koostuvat monesta vierekkäin asennetusta invertteriketjusta. Hyvänä puolena on, että suuressa tuotannossa yhden ketjun vikaantuminen ei vaikuta kokonaistuotantoon merkittävästi ja tuotantolaitoksen monitorointi on helpompaa (inverter.com, 2020). Tähän käyttötarkoitukseen suunnatuilla topologioilla muodostetaan tyypillisesti 10-30 kW tehoa. Teholuokassa on paljon edellisen kappaleen topologioista muokattuja täyssiltaversioita, jotka eivät aiheuta niin suurta rasitetta kuormalle (Dogga, 2017). Kuvissa 21-24 on monitasoisten topologioiden kokosiltaversioita. Loput ovat suoria DC-AC-inverttereitä.

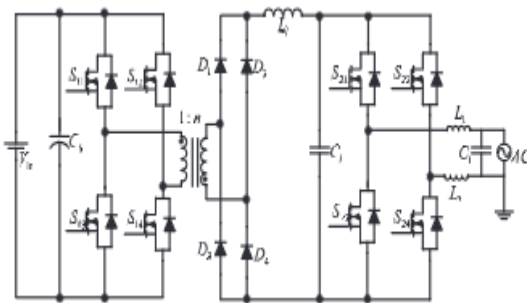
Kuvan 21 (Bose et. al., 1985) kytkentä on kehityksen alkuvaiheen kytkentöjä, missä käytetään korkeataajuusmuuntajaa. LC-tyyppin DC-linkki varmistaa tasaisen tasajännitteen ja

laadukkaan lähtötehon. Topologiassa on kuitenkin paljon komponentteja ja sisäiset resonanssit aiheuttavat haasteita luotettavuuden kanssa.

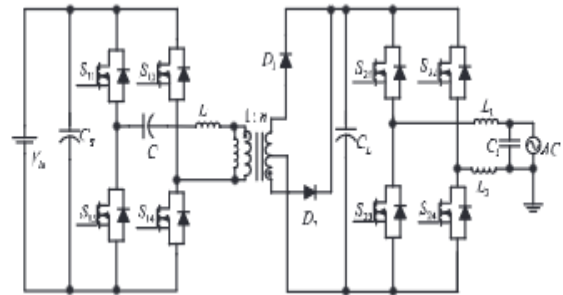
Kuvan 22 (Zhang et al., 2016) kytkentä on kokosiltaversio kuvan 15 kytkennästä, jossa resonanssilla ja nolajännitteellä kytkemisellä saadaan häviöitä pienennettyä ja monella tehotasolla varmistettua korkealaatuinen lähtösignaali. Kokosilta ei ole yhtä kuormittava kuorman kannalta kuin puolisolta- mutta vaatii enemmän komponentteja.

Jalbrzykowski ja Citko tekivät vuonna 2008 kokosiltaversioon (kuva 23) vanhasta P. J. Wolfson virtasyötetystä LC-resonanssi-invertteristä, joka mahdollistaa vastaavasti jännitesyötettyä topologiaa korkeamman jännitevahvistuksen.

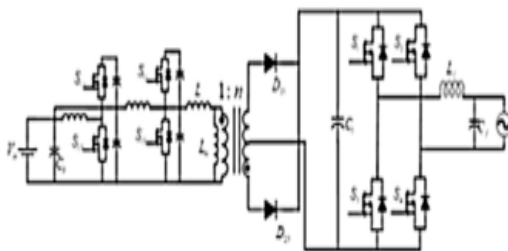
Kuvan 24 topologia (Rahman, 1997) on kokosiltaversio kuvan 17 perus aurinkovoimatopologiasta.



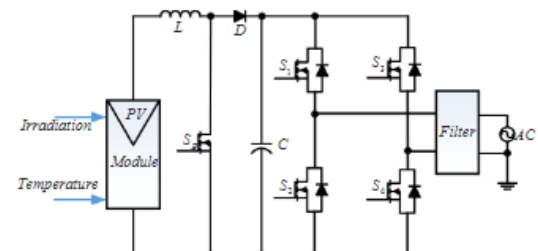
Kuva 21. Monitasoinen invertteri korkeataajuusmuuttajalla. Kuvan lähde: R. Dogga ja M. K. Pathak, 2019.



Kuva 22. Kokosiltainvertteri LLC-resonanssilla. Kuvan lähde: R. Dogga ja M. K. Pathak, 2019.



Kuva 23. Virtasyötetty kokosiltaresonanssi-invertteri. Kuvan lähde: R. Dogga ja M. K. Pathak, 2019.



Kuva 24. Tyypillinen aurinkoinvertteritopologia (kokosilta-boost). Kuvan lähde: R. Dogga ja M. K. Pathak, 2019.

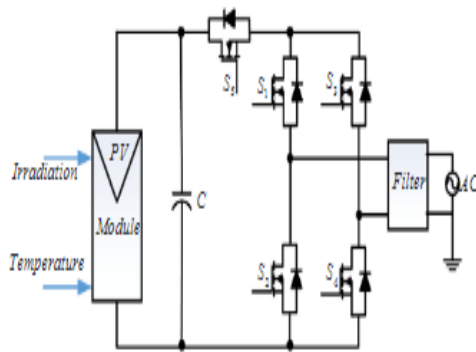
Kuvien 25-27 topologiat ovat melko yksinkertaisia, joissa ei ole boost-vaihetta, joten ne vaativat korkean tulojännitteen, jotta ne voidaan liittää verkkoon. H5 kytkentä (kuva 25), jossa on H-sillan lisäksi kytkin DC-tulon puolella ennen siltaa. Kytkennällä voidaan päästä

hyvin korkeisiin hyötysuhteisiin, jopa 97% asti, mutta tulojännitealue on kapea (Wang et al., 2012).

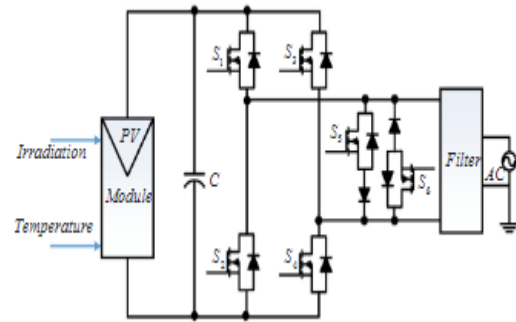
Kuvan 26 HERIC-kytkentä (González et. al., 2007) on laajalti käytetty. Siinä on kaksi ylimääräistä kytkintä, joilla estetään virran pääsy takaisin DC-puolelle. Hyötysuhde voi nousta vielä H5 kytkentää korkeammaksi.

Kuvan 27 kytkentä on perus H-silta, jossa on erotusmuuntaja lopussa ennen verkkoa. Voidaan käyttää, jos asennus vaatii galvaanista erotusta. Muutoin ylimääräinen muuntaja lisää kokoa, häviöitä ja hintaa.

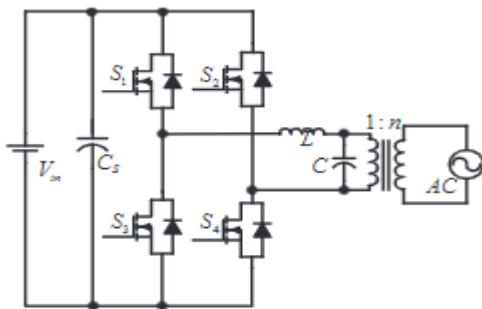
Kuvan 28 kytkentä on suunniteltu käyttönopeutta ja turvallisuutta silmälläpitäen. Buck-boost mahdollistaa laajan tulojännitealueen. Kahden ylimääräisen kytkimen turvaamana, siirtyminen puoliaalloilta toiselle voidaan tehdä välittömästi ilman oikosulkuvaaraa. Kytkentä tarjoaa maadoituksen paneeleiden ja verkon välille.



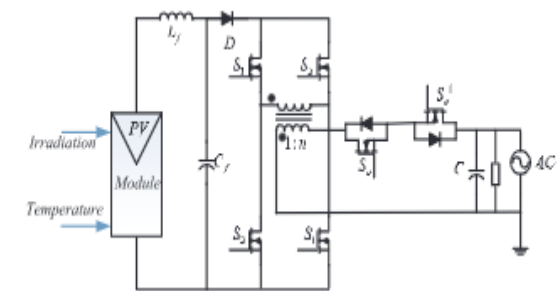
Kuva 25. H5-topologia. Kuvan lähde: R. Dogga ja M. K. Pathak, 2019.



Kuva 26. HERIC. Kuvan lähde: R. Dogga ja M. K. Pathak, 2019.



Kuva 27. Buck-invertteri verkkotaajuusmuuntajalla. Kuvan lähde: R. Dogga ja M. K. Pathak, 2019.



Kuva 28. Kuuden kytkimen erotettu buck-boost invertteri. Kuvan lähde: R. Dogga ja M. K. Pathak, 2019.

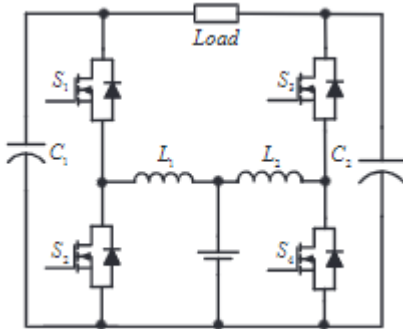
Kuvien 29-32 topologiat ovat hieman monimutkaisempia ja poikkeavat selvästi aiemmin esitellyistä kytkennöistä. Kuvassa 29 esitellään neljän kytkimen boost-invertteri (Caceres ja Barbi 1999). Topologiassa DC-konvertterien tulot liitetty yhteen rinnan lähteen kanssa ja kuorma kytketty differentiaalisesti DC-konvertterien lähtöjen väliin. Kytkentää moduloidaan tuottamaan yksinapaista siniaaltoa 180 asteen vaihe-erolla. Erinomainen suorituskyky muihin yksitasoisiin verkkoon liitettäviin inverttereihin nähden, mutta pakotettu modulointi aiheuttaa EMI-ongelmia ja suuria kytkentähäviöitä (Dogga, 2019).

Kuvan 30 kytkennässä hyödynnetään resonanssia ja kytketään kytkimiä noljavirralla, mikä vähentää kytkentähäviöitä ja EMI:a. Kytkimet S3 ja S4 kytketään päälle LC-tanquilla, mikä vähentää kytkentähäviöitä entisestään. Heikkoutena on epäsymmetrinen toiminta.

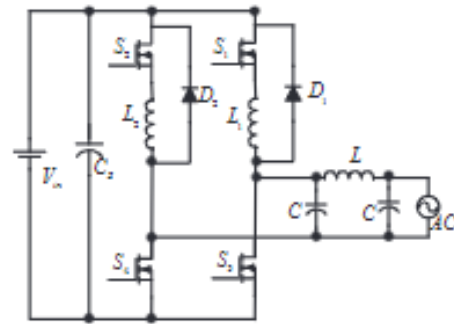
Kuvan 31 kytkennässä (Schekulin, 1999) säädettävyys on ollut pääprioriteettina. Kytkentä toimii buck-, boost- ja buck-boost -moodeissa. Negatiivisella puoliaallolla se toimii buck-boost -moodissa. Positiivisella puoliaallolla, kun tulojännite on suurempi kuin lähtö, on kytkentä buck-moodissa, ja positiivisella puoliaallolla, kun tulojännite on pienempi kuin lähtöjännite, kytkentä on boost-moodissa. Hyvällä säädettävyydellä on

haittapuolensa. Ohjaus ja ajoitusten sovittaminen ovat vaikeita, kytkentä on epäsymmetrinen ja on olemassa mahdollisuus, että DC-virtaa pääsee verkkoon, koska kytkennässä ei ole kondensaattoria suodattamassa DC-komponenttia pois.

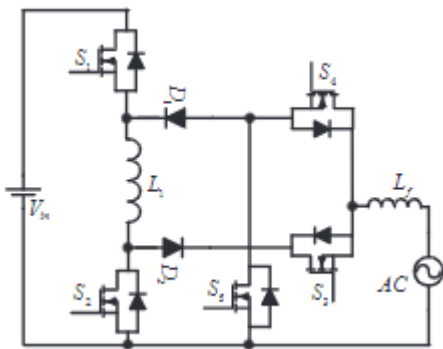
Kuvan 32 (Patel, 2009) on edelliseen nähden toteutettu järkevämmän. Se on symmetrinen, käyttää yksinkertaista modulointia ja kytkentähäviöt sekä EMI ovat vähäisiä.



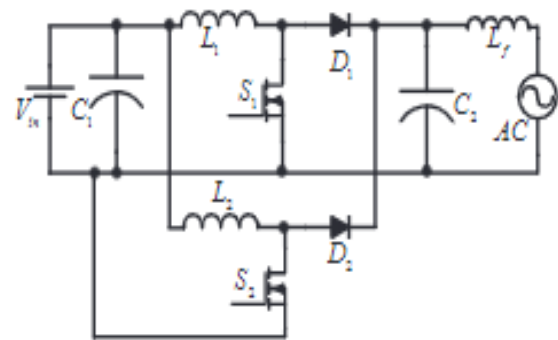
Kuva 29. Neljän kytkimen boost-invertteri. Kuvan lähde: R. Dogga ja M. K. Pathak, 2019.



Kuva 30. Neljän kytkimen resonanssia hyödyntävä buck-boost. Kuvan lähde: R. Dogga ja M. K. Pathak, 2019.



Kuva 31. "Flying inductor inverter". Kuvan lähde: R. Dogga ja M. K. Pathak, 2019.



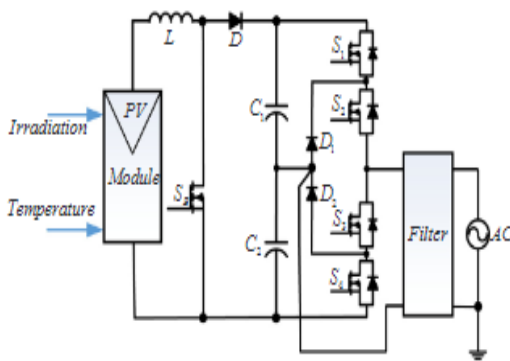
Kuva 32. Verkkoon liitettävä yksitasoinen invertteri suurimman tehon seurannalla. Kuvan lähde: R. Dogga ja M. K. Pathak, 2019.

3.4 Keskitetyt invertterit

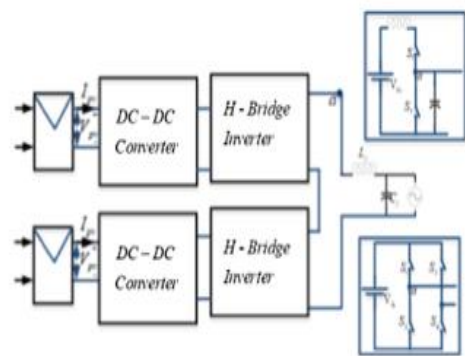
Keskitettyyn invertteriin on johdettu monta invertteriketjua, jolloin yhdellä invertterillä ohjataan useiden paneelien jännitteitä yhtenäkkäisesti (inverter.com, 2020b). Tällaiset invertterit ovat tyypillisesti suuriin yli 30 kW voimalasovelluksiin. Etenkin suurilla tehoilla häviöt halutaan minimoida, joten topologioissa ei ole muuntajia. Kytkemällä invertterimoduuleita porrastetusti (cascade), voidaan kullakin moduulilla muodostaa itsenäisiä jännitetasoja. Nämä yhdistämällä saadaan tehtyä moduloinnista monitasoisia, jotta moduloidusta

signaalista saadaan suodatettua puhtaampaa siniaaltoa pienemmillä harmonisilla yliaalloilla ja kytkentähäviöillä (Ling et. al., 2018).

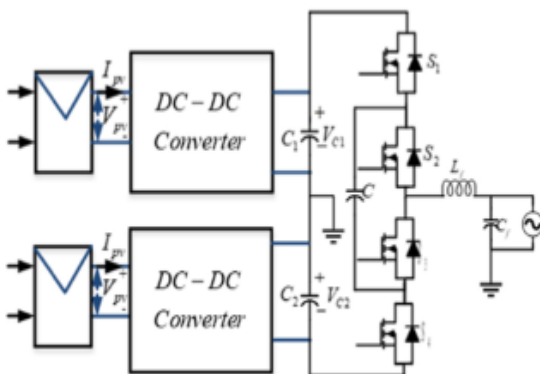
Kuvissa 33-35 on esitelty moduloinniltaan monitasoisia invertteritopologioita. Kuvan 33 topologia (Lee, 2011) on puolisolta, joten vain puolet tulon jännitteestä saadaan muunnettua vaihtosähköksi. Tuplamaadoitus mahdollistaa korkealla tehoalueella toimimisen ja monitasoinen modulointi vähentää häviöitä korkeatehoisissa inverttereissä huomattavasti. Kuvassa 34 on näytetty, miten kaksi edellistä puolisoltaa on kytketty yhteen, jotta saadaan lähtöön tuloa vastaava jännite. Kuvassa 35 on diodit korvattu kondensaattorilla kytkentähäviöiden vähentämiseksi. Viimeinen topologia (Shimizu et. al., 2003) hyödyntää ”Generation control circuit”:a korkeimman tehon seuraamiseksi, mikä toimii myös, vaikka osa paneeleista ei toimisi. Heikkoutena on buck-piiri, mikä vaatii lukuisia kytkettyjä paneeleita riittävän jännitteen luomiseksi.



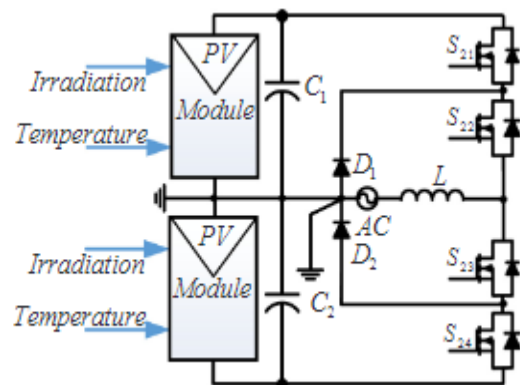
Kuva 33. Invertteri, jossa klamppaus diodeilla neutraaliin pisteeseen. Kuvan lähde: R. Dogga ja M. K. Pathak, 2019.



Kuva 34. ”Cascaded H-bridge multi-level inverter”. Kuvan lähde: R. Dogga ja M. K. Pathak, 2019.



Kuva 35. Kondensaattoriin klampattu invertteri. Kuvan lähde: R. Dogga ja M. K. Pathak, 2019.



Kuva 36. Korkean suorituskyvyn vuorovaikuttava invertterijärjestelmä. Kuvan lähde: R. Dogga ja M. K. Pathak, 2019.

4 Mallinnus ja tulosten analysointi






Topologioista valitaan 4 kappaletta mallinnettavaksi tarkempaa tarkastelua varten. Topologioita simuloidaan MATLAB- ja Simulink -ohjelmistoilla. Vertailtavissa topologioissa käytetään samaa syöttöjännitettä (100 V) ja kuormaa (1 Ω). Vertailtavia asioita ovat THD, ohjattavien puolijohdekomponenttien määrä, suositeltu teholuokka, galvaaninen erotus, moduoloinnin haastavuus ja toimintajännitealue.

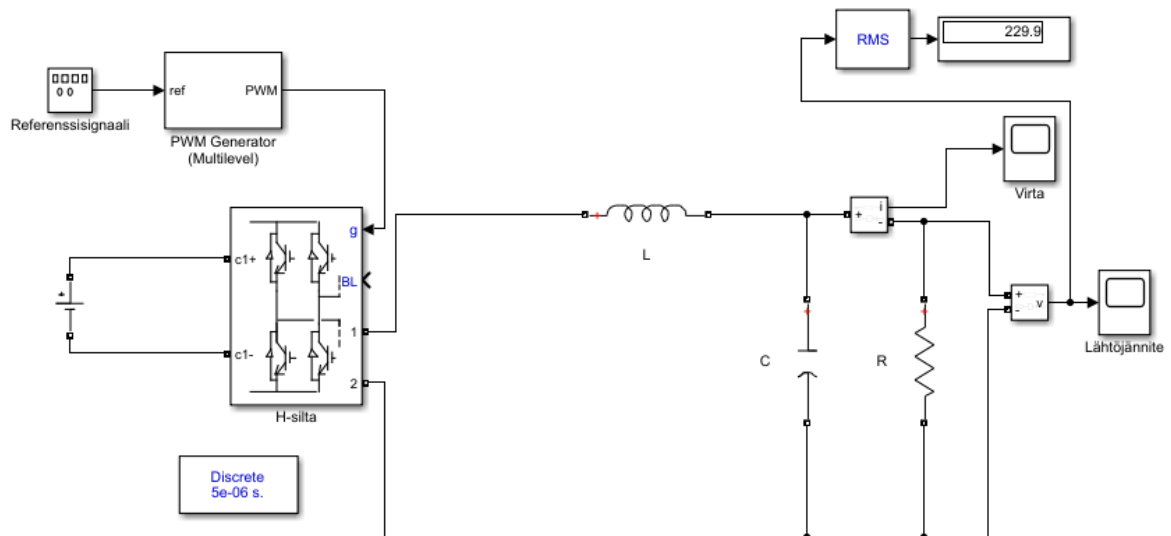
Ensimmäinen topologia on yksinkertainen H-silta. Syötetty tasajännite moduloidaan ja suodatetaan LC-suotimella puhtaaksi siniaalloksi. Ohjaus on yksinkertaista ja LC-suodattimen arvoja tai PWM säätämällä tulojännitealue on laaja. Tosin reaali maailmassa komponenttiarvoja ei niin vain säädetäkään asentamisen jälkeen, joten kytkennän voi asettaa toimimaan tietyillä tuloarvoilla, mutta se ei sovellu suuresti vaihteleviin olosuhteisiin sellaisenaan. Kuvan 37 kytkennän komponenttien ja syötön arvot ovat:

- $V_{in} = 100 \text{ V}$
- $L = 0.955 \text{ mH}$
- $C = 10.6 \text{ mF}$
- $R = 1 \Omega$

Kelan induktanssi on saatu kokeellisesti. Kapasitanssi on laskettu resonanssitaajuuden avulla (liite 1). Jos muutetaan syöttöjännite 350 Volttiin, komponenttiarvoista tulee:

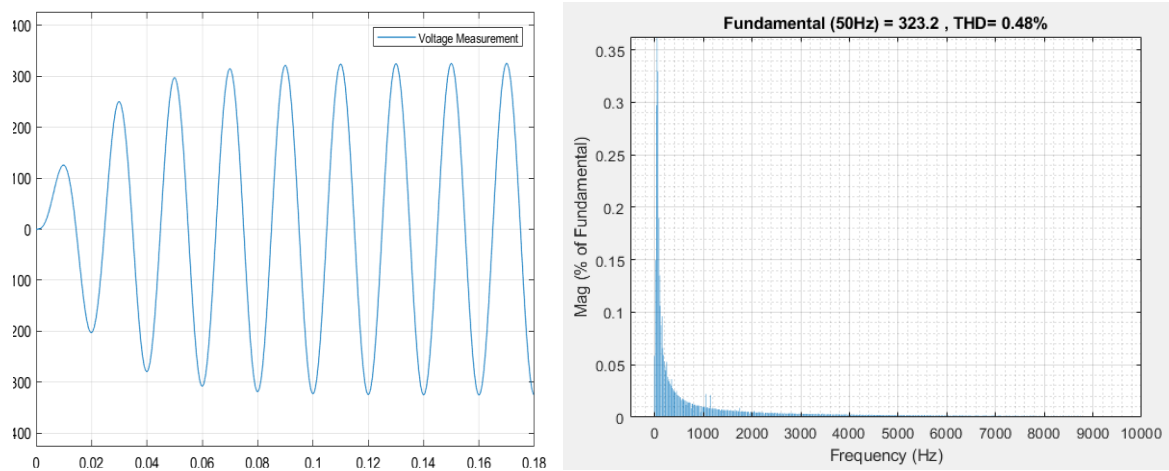
- $L = 3.4 \text{ mH}$
- $C = 3.0 \text{ mF}$
- $R = 1 \Omega$

Kuvassa x  on virtamittari,  on jännitemittari,  ovat oskilloskooppikuvia simuloinnista,  on signaalin muunto RMS-arvoksi ja  avulla määritetään, miten simulaatio laskee kytkennän arvoja.



Kuva 37. H-silta

Käytetyillä arvoilla H-sillan jännitteellä kestää kolme jaksoa saavuttaa stabiili tila (kuva 38). Jatkuvuustilan aikana THD on 0,48 %, mistä huomaa, että kytkentä on ideaalinen, eikä huomioi esimerkiksi kuorman reaktiivisuutta, komponenttien arvojen muuttumista lämpötilan mukaan tai ympäristön EMI:stä johtuvia häiriöitä.



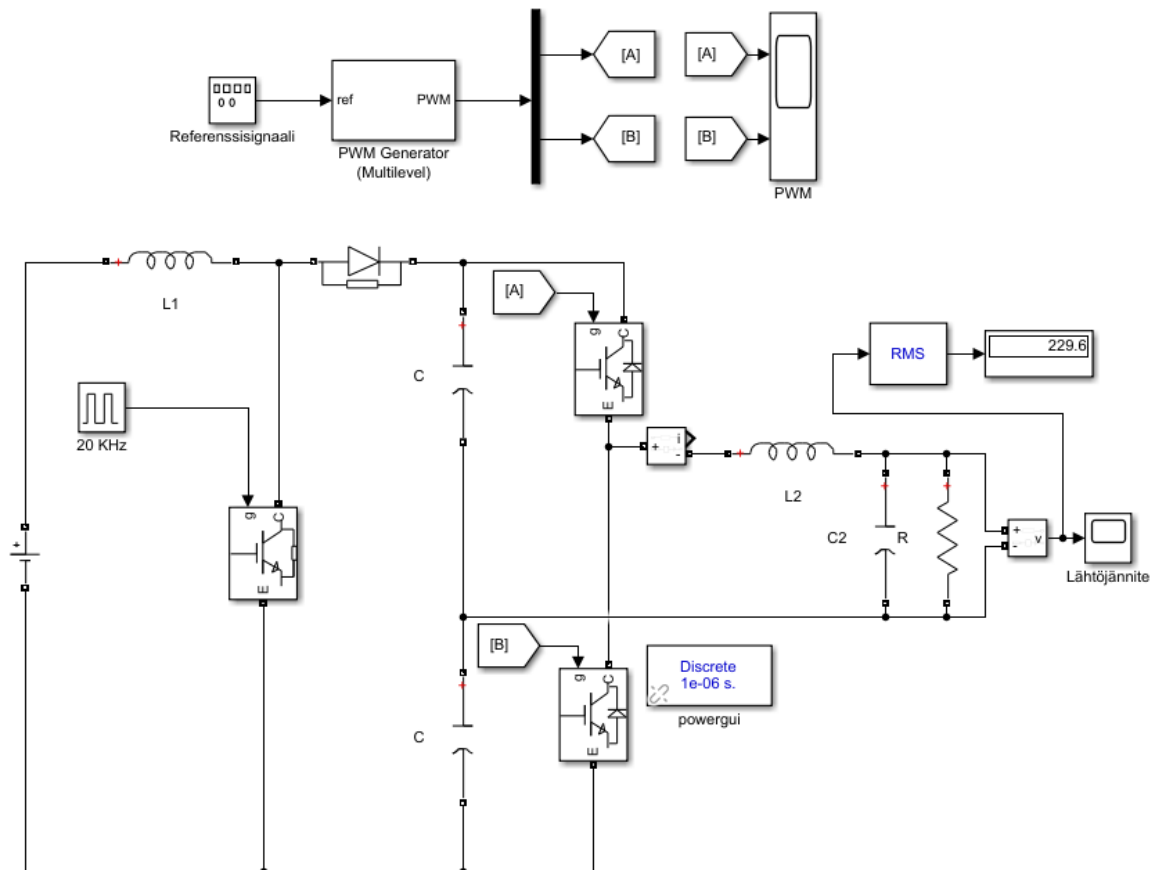
Kuva 38. H-sillan verkkoon syöttämä jännite ja jännitteen THD.

Toinen mallinnettava topologia on tasavirtahakurilla varustettu puolisilta-boost -topologia (kuva 39). Puolisillan ohjauspulssit muodostetaan PWM-generaattorilla ja kuljetetaan IGBT:n kannoille. Hakkuria kytketään 20 kHz taajuudella 44% pulssinleveydellä. Muut komponenttiarvot ovat:

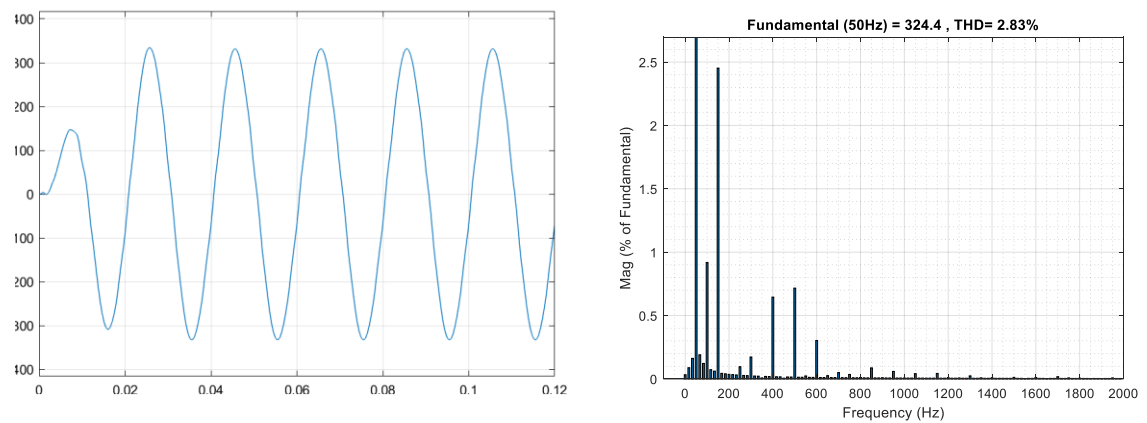
- $V_{in} = 100 \text{ V}$
- $L1 = 1 \mu\text{H}$
- $C = 1 \text{ mF}$
- $L2 = 6 \text{ mH}$

- $C2 = 1.7 \text{ mF}$
- $R = 1 \ \Omega$

Koska etuhakkurin pulssinleveyttä muuttamalla saadaan helposti muutettua tulojännitettä, soveltuu topologia erinomaisesti aurinkosähkökäyttöön, jossa tulojännite muuttuu jatkuvasti auringon valon mukaan.



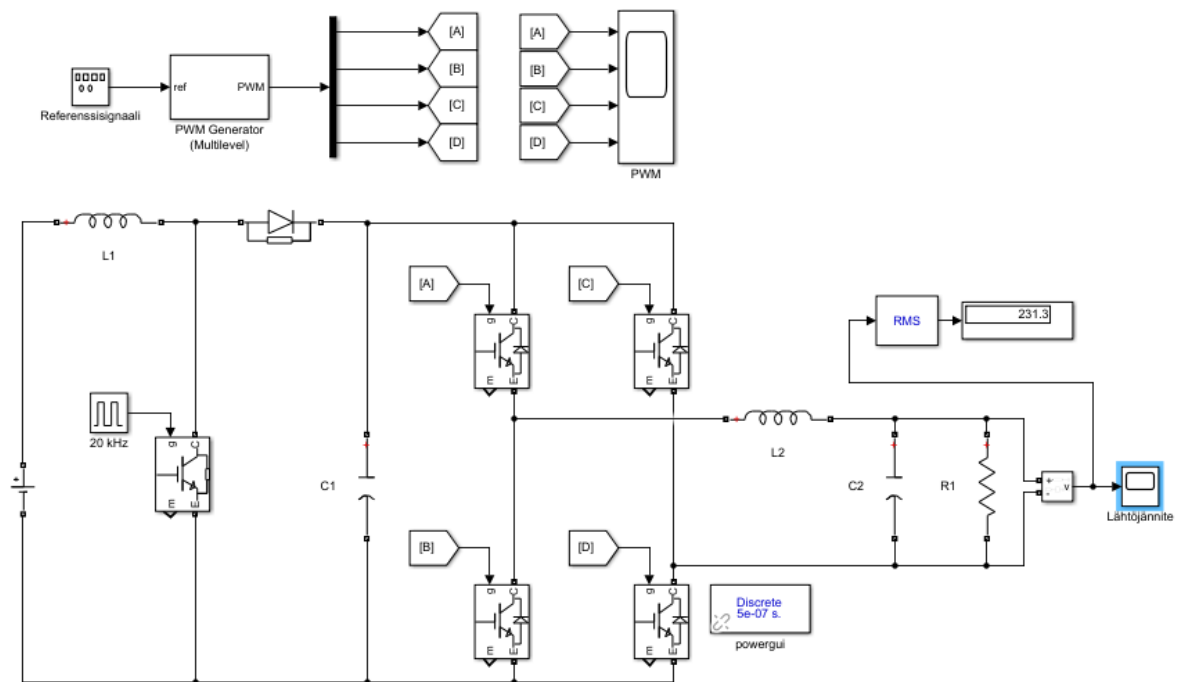
Kuva 39. Puolisilta-boost -topologia.



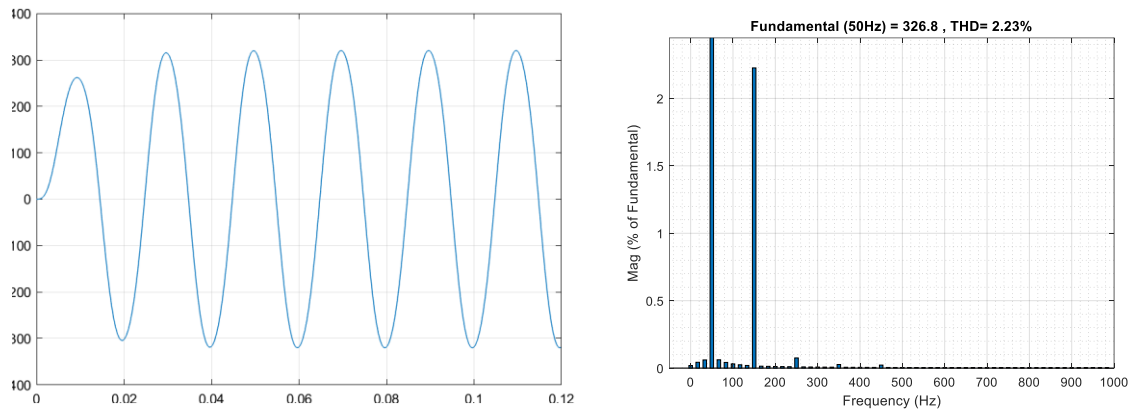
Kuva 40. Puolisilta-boostin lähtöjännite ja THD.

Kolmas mallinnettava topologia on kokosilta-boost (kuva 41). Puolisillalla saadaan hyödynnettyä vain puolet tulojännitteestä, kun taas kokosillalla saadaan käyttöön koko tulojännite. Jos tulojännite on pieni, kokosiltatopologialla saadaan lähtöjännite helpommin verkon vaatimalle tasolle. Tulojännitteen ollessa suuri, puolisilta-topologialla voidaan varmistaa, ettei verkkoon syötettävä jännite ylitä 230 V RMS. Simuloinnissa käytettiin seuraavia lähtöarvoja:

- $V_{in} = 100 \text{ V}$
- $L1 = 1 \mu\text{H}$
- $C1 = 2 \text{ mF}$
- $L2 = 6 \text{ mH}$
- $C2 = 1.7 \text{ mF}$
- $R = 1 \Omega$



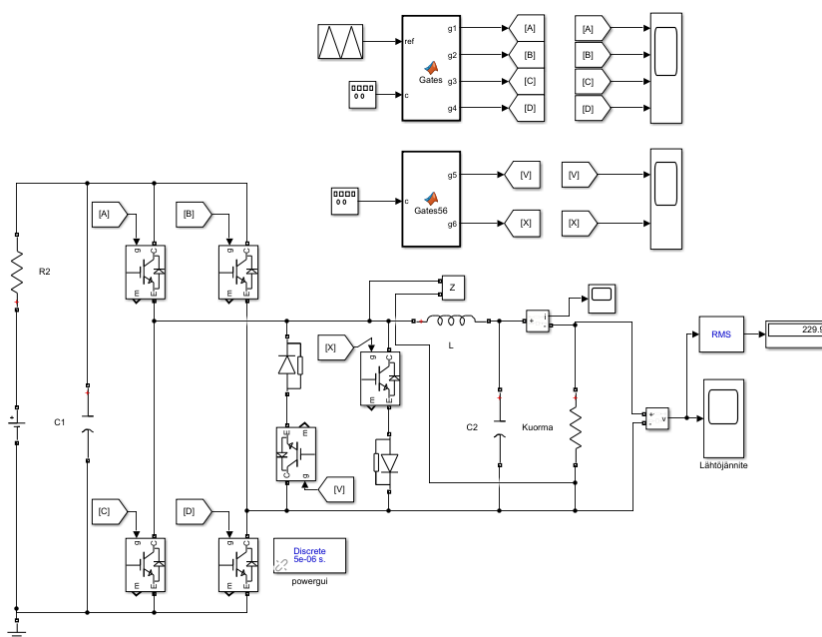
Kuva 41. Kokosilta-boost -topologia



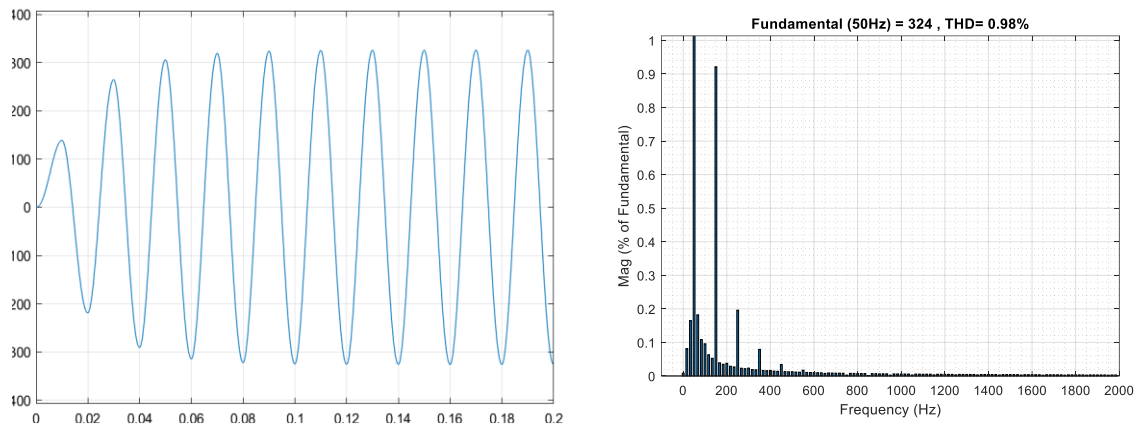
Kuva 42. Kokosilta-boostin lähtöjännite ja THD.

Neljäs mallinnettava topologia on HERIC-kytkentä (Highly Efficient and Reliable Inverter Concept). Nimensä mukaisesti se toimii korkealla hyötysuhteella myös matalilla tehoilla. Modulointi on topologiassa hieman haastavampaa ja kytkennässä on enemmän komponentteja, joten valmistuskustannukset tulevat kalliimmiksi. Simuloinnissa käytettiin seuraavia lähtöarvoja:

- $V_{in} = 100 \text{ V}$
- $L = 1.1 \text{ mH}$
- $C1 = 2 \text{ mF}$
- $C2 = 9.2 \text{ mF}$
- $R = 1 \Omega$



Kuva 43. HERIC/H6-kytkentä



Kuva 44. HERIC-kytkennän lähtöjännite ja THD.

Kytkeä ohjaamiseen käytetty PWM on esitetty liitteessä 2. Kuvista nähdään, että puolisisillan ohjaus on helppoa. Tarvitaan vain kaksi signaalia, jotka ovat toistensa vasta-arvoja. Kokosillan ohjauksessa A ja B ovat keskenään samassa vaiheessa, mutta käänteisiä. Kytkimet C ja D ovat myös keskenään samassa vaiheessa, mutta arvoiltaan käänteisiä. HERIC:n ohjaaminen on haastavinta. Kytkin X pitää olla yhtä aikaa päällä kytkinten A ja D kanssa ja kytkin Y kytkinten B ja C kanssa.

Kaikki edellä mainitut kytkennät ovat kuitenkin varsin helposti moduloitavissa monitasoisin invertteritopologioihin nähden. On syytä myös mainita, että käytetyt modulointimenetelmät eivät myöskään ole paras tapa moduloida, vaan helpoin. Lisäämällä modulointitasoja ja kytkemällä nollavirralla tai -jännitteellä kovakytkemisen sijasta voidaan päästä parempiin lopputuloksiin.

Taulukossa 1 on vertailtu simuloitujen laajassa käytössä olevien topologioiden ominaisuuksia.

Taulukko 1. Topologioiden välistä vertailua.

	H-silta	Puolisilta-boost	Kokosilta-boost	HERIC
THD [%]	0.48	2.83	2.23	0.98
Ohjattavien puolijohdekomponenttien määrä	4	3	5	6
Suosittelu teholuokka	10-30 kW	1-10 kW	10-30 kW	10-30 kW
Galvaaninen erotus	ei	ei	ei	ei
Moduloinnin haastavuus	kohtalainen	vähäinen	kohtalainen	merkittävä
Jännitealue	kapea	laaja	laaja	laaja

Taulukon perusteella perus H-silta antaisi vähäsäröisintä sähköä verkkoon, jos tulojännite saadaan rajattua tietyllä kapealla alueella. Puolisilta-boost on taas helpoin moduloida ja helppo toteuttaa pienellä komponenttimäärällä. Kokosilta-boost on melko keskiverto kytkentä. Ei erityisen hyvä missään, muttei huonokaan. HERIC taas tuottaa siistiä sähköä hyvin laajalla jännitealueella pienellä THD:lla. Sen heikkoutena on suuri komponenttimäärä.

5 Johtopäätökset

Diplomityössä vertailtiin aurinkopaneelien invertteritopologioita. Käytiin pintapuolisesti läpi 29 eri topologiaa, jotka perustuvat R. Doggan ja M. K. Pathakin (2019) tekemään yleiskatsaukseen. Tarkempaa vertailua tehtiin neljälle yleisesti käytössä olevalle topologialle. Niistä piirrettiin mallit ja niitä simuloitiin Simulinkillä. Vertailtaviksi parametreiksi valittiin THD, ohjattavien puolijohdekomponenttien määrä, suositeltu teholuokka, galvaaninen erotus, moduloinnin haastavuus ja tulojännitelue. Vertailun perusteella perus H-silta- ja HERIC-topologioilla on alhaisin THD, kun taas boost-topologioilla vahvuuksina on suuri jännitealue ja pieni komponenttimäärä. Eniten ohjausvaihtoehtoja on HERIC-topologialla, ja vähiten puolisolita-boost -topologialla.

Aiheesta ei tullut juurikaan esille aiemmasta poikkeavia tuloksia. Ainoa ero oman tulkinnan ja R. Doggan välillä oli puolisolita-boost -topologian suositellussa teholuokassa. Heidän mukaansa topologia soveltuu paremmin pienempiin (1-10 kW) sovelluksiin, kun oman arvion mukaan puolisolita-boost -topologia soveltuu paremmin suuremman kokoluokan sovelluksiin kuin esimerkiksi kokosilta-boost, mikä on luokiteltu 10-30 kW alueelle. Tosin, puolisolitapologia kuormittaa enemmän verkkoa, mikä on luultavasti syynä eroon.

Suomeksi aiheesta ei juuri olla aiemmin tehty tutkimusta, joten suurin hyöty on antaa perustietoa aiheesta myös suomen kielellä. Työ on suunnattu tahoille, jotka pohtivat aurinkopaneelien ja invertterien suunnittelua tai valitsemista.

Jatkotutkimukselle jäi mittavasti tilaa. Esimerkiksi topologioiden hyötysuhteen ja sähkön laadun optimoinnista moduloinnin avulla voisi varmasti tehdä kokonaisen diplomityön pienemmälläkin otoskoollla. Lisäksi voisi tutkia erottamattomien ja erotettujen topologioiden vaikutuksia kuormaan, verkkoon ja paneeleihin. Tutkimuksessa liikutaan teoreettisella ja melko ideaalisella tasolla. Voisi myös selvittää eroja ideaalisen ja reaalimaailman invertteerien välillä, ja millä mittauksilla tai testeillä voitaisiin todentaa niiden toimivuus reaalimaailmassa.

Lähteet

Blaabjerg, F., Chen, Z., Kjaer, S.B., 2004. "Power electronics as efficient interface in dispersed power generation systems". IEEE Trans. Power Electron. 19 (5), 1184–1194.

Bose, B.K., Szczesny, P.M., Steigerwald, R.L., 1985. "Microcomputer control of a residential photovoltaic power conditioning system". IEEE Trans. Indust. Appl. 5,1182–1191.

Boutot, T., Chang, L., 1998. "Development of a single-phase inverter for small wind turbines". In: IEEE Canadian Conference on Electrical and Computer Engineering, 1998,vol. 1, pp. 305–308

B.P. McGrath, "Topologically independent modulation of multilevel inverters," Ph.D. Thesis, Monash University, Australia, 2002.

Caceres, R.O., Barbi, I., 1999. "A boost DC-AC converter: analysis, design, and experimentation". IEEE Trans. Power Electron. 14 (1), 134–141.

D. G. Holmes, T. A. Lipo. 2003. "Pulse Width Modulation for Power Converters Principles and Practice".

González, R., López, J., Sanchis, P., Marroyo, L., 2007. "Transformerless inverter for single-phase photovoltaic systems". IEEE Trans. Power Electron. 22 (2), 693–697.

J. Beristain et al. 2003. "Synthesis and modulation of a singlephase DC/AC converter with high-frequency isolation in photovoltaic energy applications". In: Power Electronics Specialist Conference, 2003. PESC'03. 2003 IEEE 34thAnnual, 2003, vol. 3, pp. 1191–1196.

Jalbrzykowski, S., Citko, T., 2008. "Current-fed resonant full-bridge boost DC/AC/DC converter". IEEE Trans. Indust. Electron. 55 (3), 1198–1205.

inverter.com a), 2020. "What is the String Solar Inverter?" [verkkomateriaali]. Viitattu 14.6.2022 Saatavilla: [What is the String Solar Inverter? | inverter.com](https://www.inverter.com/what-is-the-string-solar-inverter/)

inverter.com b), 2020. "3 Different Types of Solar Inverters" [verkkomateriaali]. Viitattu 14.6.2022 Saatavilla: [3 Different Types Of Solar Inverters | inverter.com](https://www.inverter.com/3-different-types-of-solar-inverters/)

- K. Zeb et. al. 2018. "A Comprehensive Review on Inverter Topologies and Control Strategies for Grid Connected Photovoltaic System".
- Lee, J., Min, B., Kim, T., Cha, H., Yoo, D., Yoo, J., 2011. "High efficiency grid-connected-multi string PV PCS using H-bridge multi-level topology". In: IEEE 8th International Conference on Power Electronics and ECCE Asia (ICPE & ECCE), 2011, pp.2557–2560.
- Ling S. S. et. al., 2018. "Hybrid Cascaded Multilevel Inverter (HCMLI) With Improved Symmetrical 4-Level Submodule". IEEE Transactions on Power Electronics (Volume: 33, Issue: 2, Feb. 2018). pp. 932 – 935.
- M. Calais and V. G. Agelidis, "Multilevel converters for single-phase grid connected photovoltaic systems - An overview," in Proc. ISIE'98 Conf., vol. 1, 1998, pp. 328-329
- M. Hayat et. al. 2018. "Solar Energy – A Look into Power Generation, Challenges, and a Solar-Powered Future". International Journal of Energy Research. DOI: 10.1002/er.4252.
- N. Bizon et. al. "Multi-stage Inverter Topologies for Energy Generation Systems" 13th International Symposium on Modeling, Simulation and System's Identification SIMSIS, September 21-22, 2007, Galati, Romania.
- N. Kasa, T. Iida, and H. Iwamoto, 1999. "An inverter using buck-boost type chopper circuits for popular small-scale photovoltaic power system," in Proc. IEEE IECON'99, San Jose, CA, Nov./Dec. pp. 185–190.
- Patel, H., Agarwal, V., 2009. "A single-stage single-phase transformer-less doubly grounded grid-connected PV interface". IEEE Trans. Energy Convers. 24 (1), 93–101.
- R. Dogga, M. K. Pathak, 2019. "Recent trends in solar PV inverter topologies". Electrical Drives and Power Electronics Group, Electrical Engineering Department, IIT Roorkee, India
- Saha, S., Sundarsingh, V., 1996 a. "Novel grid-connected photovoltaic inverter". Generat., Transm. Distrib., IEE Proc. 143 (2), 219–224.
- S. Saha, V. Sundarsingh, 1996 b. "Grid connected photovoltaic inverter as an industrial-product". pp. 46–51.
- Shimizu, T., Wada, K., Nakamura, N., 2006. "Flyback-type single-phase utility interactive inverter with power pulsation decoupling on the dc input for an ac photovoltaic module system". IEEE Trans. Power Electron. 21 (5), 1264–1272.

Tilastokeskus, 2022. ” Venäjältä tuodun energian osuus 34 % energian kokonaiskulutuksesta vuonna 2021”. [verkkomateriaali]. Viitattu 13.6.2022. Saatavilla: [Venäjältä tuodun energian osuus 34 % energian kokonaiskulutuksesta vuonna 2021 - Tilastokeskus \(stat.fi\)](https://www.stat.fi/tuotantokulutus/venajalta_tuodun_energian_osuus_34_percent_energian_kokonaiskulutuksesta_vuonna_2021)

Toshiba Electronic Devices & Storage Corporation. [verkkomateriaali]. Viitattu 6.6.2022. Saatavilla: [Please explain hard switching and soft switching using IGBTs. | Toshiba Electronic Devices & Storage Corporation | Asia-English \(semicon-storage.com\)](https://www.semicon-storage.com/Products/IGBTs/Please-explain-hard-switching-and-soft-switching-using-IGBTs)

Wang, C.-M., Chen, T.-J., 2004. ”Novel single-stage half-bridge series-resonant buck-booster inverter”. IEEE Trans. Aerospace Electron. Syst. 40 (4), 1262–1270.

Wang, J., Ji, B., Zhao, J., Yu, J., 2012. ”From H4, H5 to H6—standardization of full-bridge single phase photovoltaic inverter topologies without ground leakage current issue”. In: Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE), 2012. IEEE, pp. 2419–2425.

Wolfs, P.J., 1993. ”A current-sourced DC-DC converter derived via the duality principle from the half-bridge converter”. IEEE Trans. Indust. Electron. 40 (1), 139–144.

Y. Xue et. al. 2004. ”Topologies of single-phase inverters for small distributed power generators: an overview” IEEE Transactions on Power Electronics, VOL. 19, NO. 5

Zhang, L., Sun, K., Xing, Y., Xing, M., 2014. ”H6 transformerless full-bridge PV grid-tie inverters”. IEEE Trans. Power Electron. 29 (3), 1229–1238.

Zhang, Shu-huai, Wang, Y.f., Chen, Bo, Xing, Wen-chao, Qiu, Han, 2016. ”An implementation of flexible topology strategy for an interleaved full-bridge LLC resonant converter in residential photovoltaic power systems”. In: 2016 IEEE 8th International Power Electronics and Motion Control Conference (IPEMC-ECCE Asia), Hefei, 2016, pp. 3579–3585.

Liite 1: Yhtälöiden johtaminen

Kapazitanssin laskeminen tietyllä resonanssitaajuudella ja induktanssilla.

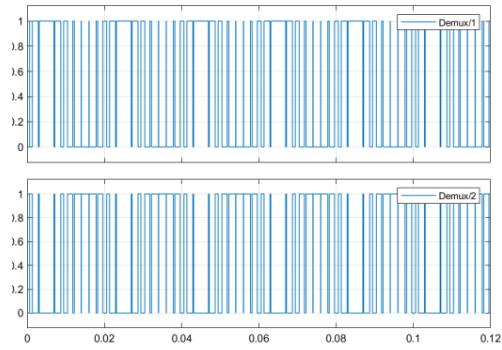
$$f = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_f C_f}} \quad (1)$$

$$\sqrt{L_f C_f} = \frac{1}{2\pi f} \quad (2)$$

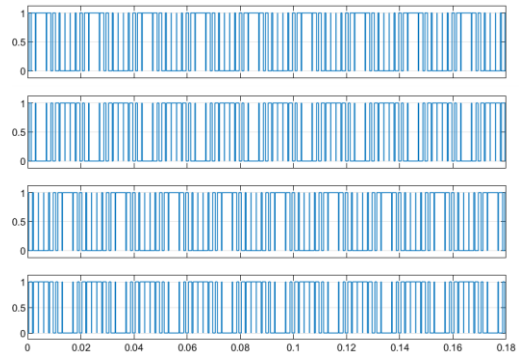
$$L_f C_f = \left(\frac{1}{2\pi f}\right)^2 \quad (3)$$

$$C_f = \frac{\left(\frac{1}{2\pi f}\right)^2}{L_f} \quad (4)$$

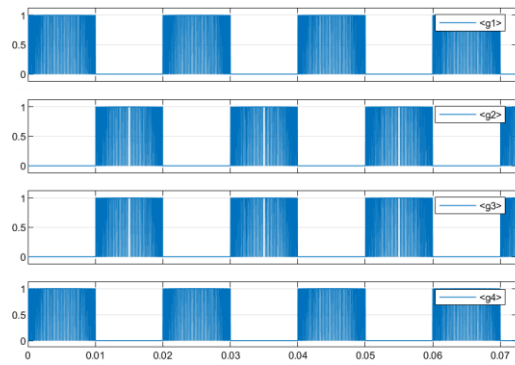
Liite 2: Vertailtavien kytkentöjen PWM-signaalit.



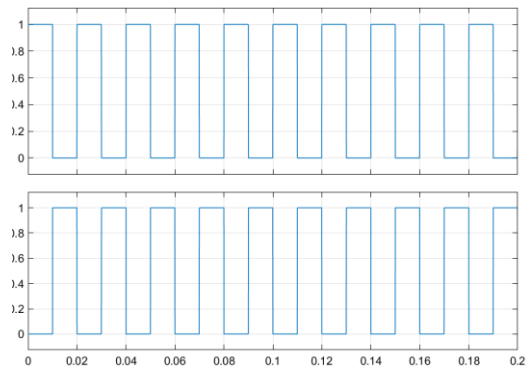
Kuva 45. Puolisilta-boost



Kuva 46. H-silta ja kokosilta-boost.



Kuva 47. HERIC-kokosilta



Kuva 48. HERIC X & Y.