



Open your mind. LUT.  
Lappeenranta University of Technology

# **AKTIIVISTEN EMI-SUODATTIMIEN TILANNEKATSAUS**

## **The current state of active EMI filters**

Mikko Salonen

## **TIIVISTELMÄ**

Mikko Salonen  
LUT School of Energy Systems  
Sähkötekniikka  
Tarkastaja: professori Pertti Silventoinen

### **Aktiivisten EMI-suodattimien tilannekatsaus**

2017

Kandidaatintyö.  
37 s.

Tämän kandidaatintyön tavoitteena oli selvittää aktiivisten EMI-suodattimien tämän hetkinen tilanne. Missä vaiheessa niiden kehitys tällä hetkellä on ja onko niitä mahdollisesti kaupallistettu. Lisäksi selvitettiin missä, milloin ja kenen toimesta aktiivisia EMI-suodattimia on tutkittu. Työhön ei sisällynyt laboratoriotyöskentelyä, vaan koko työ toteutettiin pelkästään kirjallisuustyönä. Lähteinä käytettiin IEEE:n artikkeleita, Scopus tietokantaa, alan kirjallisuutta, verkkodokumentteja ja aktiivisia EMI-suodattimia valmistavien yritysten kotisivuja.

Tutkimuksessa kävi ilmi, että tällä hetkellä on olemassa sekä analogisia että digitaalisia aktiivisia EMI-suodattimia. Analogiset aktiiviset EMI-suodattimet voidaan jakaa pelkästään aktiivisista osista koostuviin suodattimiin ja aktiivisiin hybridi EMI-suodattimiin, jotka koostuvat aktiivisten osien lisäksi myös passiivisista osista. Analogisten EMI-suodattimien aktiivisten osien topologioita on kehitetty yhteensä neljä. Näistä jokaisella on omat vahvuutensa ja heikkoutensa. Heikkoudet ja vahvuudet tulee ottaa huomioon suodattimien suunnittelussa. Digitaaliset, aktiiviset EMI-suodattimet perustuvat FPGA piireihin ja A/D- sekä D/A –muuntimiin. Tutkimuksessa ilmeni, että aktiivisia EMI-suodattimia on tutkittu aktiivisesti vuodesta 2014. Suurinosa tutkimuksista on tehty Kiinassa. Kymmenistä tutkimuksista ja tunnetuista eduista huolimatta vain kaksi yritystä myyvät aktiivisia EMI-suodattimia.

Tutkimuksen johtopäätöksenä todetaan, että aktiiviset EMI-suodattimet tulevat yleistymään tulevaisuudessa, kun EMI-suodattimien kokoa halutaan pienentää vaimennuskyvystä tinkimättä. Varsinkin digitaaliset EMI-suodattimet tulevat yleistymään niiden pienen koon ja monipuolisuuden takia. Tänä päivänä digitaalisten aktiivisten EMI-suodattimien yleistymistä estää FPGA piirien korkeat hinnat.

## **ABSTRACT**

Lappeenranta University of Technology  
LUT School of Energy Systems  
Electrical Engineering

Mikko Salonen

### **The current state of active EMI-filters**

2017

Bachelor's Thesis.

37 p.

Examiner: professor Pertti Silventoinen

The target of this Bachelor's Thesis was to do research and determine the current state of active EMI filters. In other words, the goal was to find out which state their development is in and are they commercially available. Furthermore, this thesis gives an insight on who has done research on active EMI filters. Additionally, research was done to see where and when has the research been done. This thesis did not include any laboratory work, only literature research. The sources, which were used, consist of IEEE articles, Scopus database, web documents, electrical engineering literature and information found on the active EMI filter developers' internet sites.

During the research, it became apparent that there are both analog and digital versions of the active EMI filters nowadays. The analog active EMI filters can be divided into active EMI filters, which consist of only active parts, and active hybrid EMI filters, which contain both active and passive parts. A total of four different topologies exist for the active parts. Each of them has their own strengths and weaknesses, which should be considered when choosing the topology for the filter. Digitally controlled active EMI filters are based on FPGA circuits and A/D and D/A converters. Finally, it was noticed that active EMI filters have been researched actively since year 2014. Most of the research has been done in China. Although dozens of research papers have been published and the strengths of active EMI filters are well known, only two companies sell them at this time.

The conclusions state that lots of research has been done on active EMI filters and they will be more widely used in the future when making EMI filters smaller without compromising attenuation characteristics becomes more and more important. Digitally controlled active EMI filters will especially become more widely used due to their adaptivity and small size. As of now, the high prices of the FPGA circuits are preventing companies from using digitally controlled active EMI filters.

## SISÄLLYSLUETTELO

KÄYTETYT MERKINNÄT JA LYHENTEET .....	5
1. JOHDANTO .....	7
2. EMI (ELECTROMAGNETIC INTERFERENCE).....	9
2.1 Säteilevät häiriöt .....	9
2.2 Johtuvat häiriöt .....	9
3. EMI-SUODATIN .....	11
3.1 Perinteinen, diskreetti passiivinen EMI suodatin .....	11
3.2 Integroitu passiivinen EMI-suodatin .....	13
4. AKTIIVINEN EMI-SUODATIN .....	15
4.1 Johdanto.....	15
4.2 Topologiat.....	15
4.3 Vahvuudet.....	20
4.4 Aktiivinen hybridi EMI suodatin.....	21
4.5 Digitaalisesti ohjattu aktiivinen EMI-suodatin.....	23
4.6 Tutkimus.....	24
4.6.1 Aikajana.....	25
4.6.2 Tutkivat maat.....	26
4.6.3 Tutkivat yliopistot .....	26
4.6.4 Tutkijat .....	27
5. AKTIIVISTEN EMI-SUODATTIMIEN NYKYINEN TILANNE.....	29
5.1 Kaupallistuminen.....	29
6. TULEVAISUUDEN NÄKYMÄT .....	31
YHTEENVETO .....	32
LÄHTEET .....	34
LIITTEET.....	37
LIITE I: PICOR QuietPower QPI –tuoteperheen mallit taulukoituna. ....	37

## KÄYTETYT MERKINNÄT JA LYHENTEET

$l$	Pituus
$N$	Käämikierrosten määrä
$\mu$	Permeabiliteetti (engl. Permeability)

### Alaindeksit

0	Tyhjiön
cm	Yhteismuotoinen
dm	Eromuotoinen
e	Magneettinen
r	Materiaalin suhteellinen
sat	Saturaatio

### Lyhenteet

AC	Vaihtosähkö tai vaihtovirta (engl. Alternating current)
ADC	Muunnin, joka muuntaa analogisen signaalin digitaalseksi (engl. Analog to digital converter)
AEF	Aktiivinen EMI-suodatin (engl. Active EMI filter)
B	Magneettivuon tiheys (engl. Magnetic flux density)
CM	Yhteismuotoinen (engl. Common mode)
CSCC	Virran mittaus, virran kompensointi (engl. Current sense, current compensation)
CCVC	Virran mittaus, jännitteen kompensointi (engl. Current sense, Voltage compensation)
DAC	Muunnin, joka muuntaa digitaalisen signaalin analogiseksi (engl. Digital to analog converter)
DAEF	Digitaalinen aktiivinen EMI-suodatin (engl. Digital active EMI filter)
DM	Eromuotoinen (engl. Differential mode)
DSP	Digitaalinen signaaliprosessori (engl. Digital signal processor)
EMC	Sähkömagneettinen yhteensopivuus (engl. Electromagnetic compatibility)
EMI	Sähkömagneettinen häiriö (engl. Electromagnetic interference)
FPGA	Digitaalinen mikropiiri (engl. Field Programmable Gate Array)

PWM	Pulssinleveysmodulaatio (engl. Pulse width modulation)
RFI	Radioaaltotaajuiset häiriöt (engl. Radio frequency interference)
VSCC	Jännitteen mittaus, virran kompensointi (engl. Voltage sense, Current compensation)
VSVC	Jännitteen mittaus, jännitteen kompensointi (engl. Voltage sense, Voltage compensation)

## 1. JOHDANTO

Sähkön käyttö yhteiskunnassamme on jatkuvassa kasvussa ja nykyään suurin osa päivittäin käyttämistämme laitteista toimii sähköllä. Sähkölaitteiden käyttö on tänä päivänä niin normaalia, ettemme välttämättä edes tiedosta millaista tekniikkaa kannamme taskuissamme mm. matkapuhelimen muodossa. Erilaisten tarpeiden kasvaminen on ajanut sähkö- ja elektroniikkateollisuuden kehitystä eteenpäin jo pidemmän aikaa. Tänä aikana olemme oppineet muokkaamaan sähköä tarvitsemamme kaltaiseksi esimerkiksi muuttamalla taajuutta, virtaa tai jännitettä. Pystymme myös muuttamaan vaihtosähkön tasasähköksi ja tasasähkön vaihtosähköksi. Pystymme tarpeen vaatiessa myös varastoimaan sähköenergian esimerkiksi akkuun tai kondensaattoriin myöhempää käyttöä varten. Lisääntyvien sähköisten ja elektronisten laitteiden määrä on tuonut tullessaan myös ongelmia erilaisten sähkömagneettisten häiriöiden muodossa.

Huonosti suunnitellut tai –suojatut sähköiset laitteet aiheuttavat ympäristöönsä sähkömagneettisia häiriöitä. Häiriö voi olla muodoltaan säteilevää tai johtuvaa. Laitteiden yleistyessä myös häiriöiden määrä kasvaa, jolloin laitteen todennäköisyys tulla häirityksi tai häiritä muita laitteita, kasvaa. Häiriöt voivat vakavimmissa tapauksissa johtaa laitteen tuhoutumiseen tai laitteen virheelliseen toimintaan, joka voi johtaa vakaviin onnettomuuksiin. Lievemmissä tapauksissa häiritty laite ei välttämättä toimi halutulla tavalla, mikä voi johtaa esimerkiksi mittaustuloksien vääristymiseen. Tästä syystä on kehitetty erilaisia säädöksiä ja standardeja, jotka määrittävät miten hyvin laitteen tulee sietää toisen laitteen aiheuttamaa häiriötä, sekä miten paljon laite saa häiritä muita laitteita.

Sähkömagneettisten häiriöiden torjumiskeino riippuu häiriön tyypistä. Yleisesti ottaen sähkömagneettinen yhteensopivuus (engl. Electromagnetic compatibility, EMC) on otettava huomioon jo laitteen suunnitteluvaiheessa, jotta voidaan välttyä turhilta häiriöiltä. Joskus pelkkä huolellinen suunnittelu ei vain riitä, silloin on käytettävä lisäkeinoja suojaukseen. Laitteita voidaan suojata säteileviltä häiriöiltä koteloimalla. Kotelon tulee olla johtavaa materiaalia. Johtavia häiriöitä suodatetaan EMI (engl. Electromagnetic interference, Sähkömagneettinen häiriö) -suodattimilla. Perinteiset EMI-suodattimet koostuvat passiivisista osista: kuristimista ja kondensaattoreista. Perinteisten passiivisten EMI-suodattimien ongelma on suuri koko sekä huono suorituskyky matalien häiriötaajuuksien suodatuksessa. Mikäli suorituskykyä matalilla taajuuksilla halutaan parantaa, täytyy suurentaa kuristimien ja kondensaattorien kokoa, joka johtaa suodattimen koon kasvuun entisestään, sekä hinnan nousuun. Ratkaistakseen koko ja suorituskyky ongelman, tutkijat ovat tutkineet vaihtoehtoisia suodatin tyyppisiä. Yksi potentiaalinen vaihtoehto on aktiivinen EMI-suodatin. Aktiivinen EMI-suodatin sisältää mittaustulokomponentin, joka mittaa häiriösignaalia reaaliaikaisesti ja lähettää sen aktiiviselle vahvistinkomponentille. Vahvistin vahvistaa ja invertoi signaalin, jonka jälkeen invertoitu signaali syötetään takaisin piiriin kompensoimaan alkuperäistä häiriötä, jolloin häiriösignaalin arvo voidaan teoriassa ajaa nolliin.

Työn tavoitteena on selvittää missä ja milloin aktiivisia EMI-suodattimia on tutkittu. Lisäksi työssä selvitetään aktiivisten EMI-suodattimien tämän hetkinen tilanne. Toisin sanoen: Missä vaiheessa tutkimus on? Ovatko aktiiviset EMI-suodattimet jo kaupallistettu ja jos ovat, niin kenen toimesta? Työ on kirjallisuustyö, joten se ei sisällä laboratoriossa tehtäviä tutkimuksia.

Luvussa 2 esitellään sähkömagneettinen häiriö, sen eri tyypit sekä siltä suojautuminen. Luvussa 3 selitetään lyhyesti, mikä on EMI-suodatin ja millaisia ne ovat perinteisesti olleet rakenteeltaan. Lisäksi esitellään uudempi passiivinen EMI-suodatin, joka on integroitu piirilevyille. Luvussa 4 tarkastellaan syitä aktiivisten EMI-suodattimien tutkimuksille, sekä missä ja milloin niitä on tutkittu. Lisäksi esitellään lyhyesti nykyisin olemassa olevien aktiivisten EMI-suodattimien tyypit ja topologiat. Luvussa 5 esillä on kaupallisesti valmistettavia aktiivisia EMI-suodattimia. Luvussa 6 pohditaan aktiivisten EMI-suodattimien tulevaisuutta ja luvussa 7 on yhteenveto.



## **2. EMI (ELECTROMAGNETIC INTERFERENCE)**

Sähkömagneettinen häiriö (engl. Electromagnetic Interference) on häiriötä, joka voi johtua joko luonnon ilmiöstä tai ihmisen tekemän sähköisen tai elektronisen laitteen toiminnasta. Päästessään sähköiseen tai elektroniseen laitteeseen se voi haitata laitteen toimintaa tai pahimmassa tapauksessa tuhota sen kokonaan. Se voi siirtyä ilmateitse, johtumalla, kapasitiivisesti tai induktiivisesti (Williams 2007). Usein puhutaan kuitenkin vain säteilevistä ja johtuvista häiriöistä.

Tyypillisiä sähkömagneettisen häiriön tuottajia ovat pulssinleveysmodulaatio ohjatut (engl. Pulse width modulation, PWM) moottorit, mikroaaltouunit, mikroprosessorit, tietokoneet sekä hakkurit ja invertterit (Digi-Key 2008). Korkeataajuiseen kytkentään perustuvat teholähteet, kuten esim. hakkurit ja invertterit, ovat sekä energiatehokkaampia että pienempiä fyysiseltä kooltaan kuin lineaariset tehonlähteet (Digi-Key 2008). Tästä syystä niitä käytetään hyvin laajalti. Säteileviä sähkömagneettisia häiriöitä (engl. Radio frequency interference, RFI) voi syntyä esimerkiksi johtimesta, joka liiallisen pituutensa vuoksi toimii antennina.

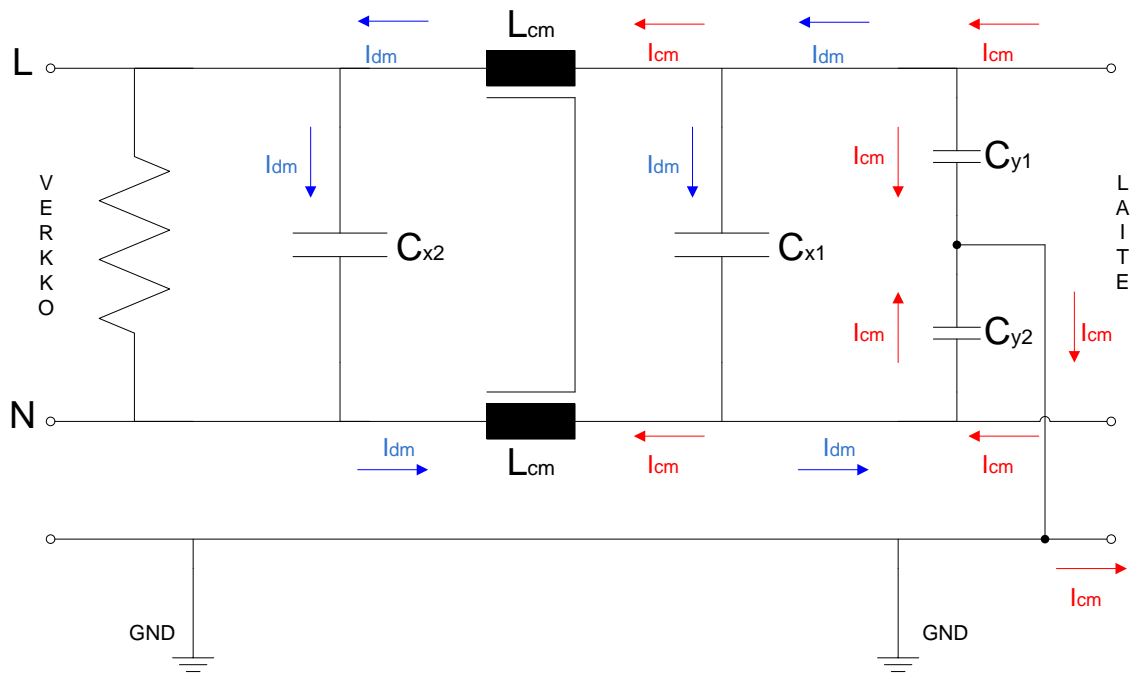
### **2.1 Säteilevät häiriöt**

Säteilevät häiriöt leviävät ilmateitse. Niiden taajuusalue on määritelty välille 30 MHz – 6 GHz CISPR32 standardin mukaan. Niiltä voidaan suojautua koteloimalla johtuvalla materiaalilla, minimoimalla virtojen kulkemien lenkkien pinta-ala, sekä sijoittamalla komponentit hyvin laitteen sisällä.

### **2.2 Johtuvat häiriöt**

Johtuvien häiriöiden taajuusalueeksi on määritelty CISPR 32 standardin mukaan 150 kHz – 30 MHz. Ne kytkeytyvät yhteisten tulo- ja maaimpedanssien kautta (Williams 2007). Suunniteluvaiheessa täytyy kiinnittää huomiota erityisesti maadoituksiin, ettei vahingossa luoda yhteisiä maaimpedansseja. Johtuvat häiriöt on jaettu kahteen eri tyyppiin, jotka ovat eromuotoinen häiriö (engl. Differential mode, DM) ja yhteismuotoinen häiriö (engl. Common mode, CM).

Ero- ja yhteismuotoisten johtuvien häiriöiden eroa voidaan tarkastella kuvassa 2.1 esitetyn yksivaihejärjestelmän avulla. Huomataan, että eromuotoiset häiriöt kulkevat yhtä johdinta pitkin kohti verkkoa ja palaavat takaisin laitteelle toista johdinta pitkin. Yhteismuotoinen häiriö puolestaan kulkee molemmissa johtimissa samassa vaiheessa ja samaan suuntaan. Se palaa takaisin laitteelle suojamaata pitkin.



Kuva 2.1. EMI-suodatin ja differentiaali- sekä yhteismuotoisen häiriövirran kulkeminen. Kuvassa esitetty  $I_{dm}$  on eromuotoinen häiriövirta ja  $I_{cm}$  on yhteismuotoinen häiriövirta.

Kuvassa 2.1 johtuvat sähkömagneettiset häiriöt kulkevat laitteelta kohti verkkoa. Kuvan laite voi olla esimerkiksi hakkuri tai PWM ohjattu invertteri. On erittäin tärkeää suodattaa johtuvat häiriöt mahdollisimman tehokkaasti, jotta ne eivät pääse leviämään sähköverkkoon ja sitä kautta seuraaviin laitteisiin. Useimmissa tapauksissa EMI-suodatin suunnitellaan minimoimaan laitteen aiheuttamien häiriöiden pääsy verkkoon. Samalla se suojaa laitetta verkosta tulevalta häiriöltä.

### 3. EMI-SUODATIN

EMI-suodattimen tarkoitus on toimia suojaavana rajapintana laitteen ja sitä syöttävän teholähteen, kuten esim. sähköverkon tai akuston välissä. Sen tehtävä on suojata laitetta sekä teholähteeltä tulevalta johtuvalta häiriöltä että estää laitteen tuottaman häiriön pääsy verkkoon tai muihin laitteisiin. Laitteen tekemiä häiriöitä ei saa päästää takaisin verkkoon, koska häiriöt voivat levitä verkon kautta muihin laitteisiin tai jopa summutua muiden laitteiden tekemien häiriöiden kanssa. EMI-suodatinta käytetään siis torjumaan johtuvaa sähkömagneettista häiriötä.

EMI-suodattimen rakenne ja topologia riippuu suodatettavasta häiriöstä. Siitä voi löytyä osio sekä yhteis- että eromuotoisen häiriön suodatukselle. Yhteismuotoinen osio koostuu yleensä yhteismuotoisesta kuristimesta (engl. Common mode choke) sekä Y-kondensaattoreista, jotka ovat kytketty vaiheen ja suojamaan välille. Eromuotoisen häiriön suodatuksen osio koostuu yleensä vaiheiden välille kytketyistä X-kondensaattoreista ja eromuotoisen virran kuristimista (engl. Differential mode choke). Häiriöiden suuruuksista riippuen voidaan myös käyttää joko pelkkiä kuristimia tai pelkkiä kondensaattoreita. Lisäksi suodatimiin usein asennetaan myös purkuvastuksia, joiden tarkoitus on purkaa kondensaattoreihin jääneet varaukset.

EMI-suodattimien suunnittelussa tehdään kompromisseja fyysisen koon, tehokkuuden ja hinnan suhteen. Tänä päivänä laitteista halutaan tehdä yhä pienempiä ja pienempiä, jolloin myös EMI-suodattimen tulee olla mahdollisimman pieni. Joissakin tapauksissa fyysistä kokoa ei kuitenkaan voida pienentää, sillä kuristimen tulee kestää suuria virtoja kyllästymättä. Nykyään eri suodatintyypit voidaan jakaa karkeasti neljään osaan. Perinteisesti käytetty diskreetti passiivinen suodatin on kaikista suodatintyypeistä suurikokoisin, koska se koostuu erillisistä diskreeteistä komponenteista. Tilan säästämistä varten keksittiin piirilevylle integroitu passiivinen suodatin, joka perinteisen passiivisen suodattimen tavoin koostuu pelkästään passiivisista osista. Passiivisten suodattimien rinnalle kehitettiin aktiivinen EMI-suodatin ja aktiivinen hybridi EMI-suodatin, jotka mahdollistavat suodattimien kokojen pienentämisen entisestään.

#### 3.1 Perinteinen, diskreetti passiivinen EMI suodatin

Perinteinen passiivinen suodatin oli ensimmäinen EMI-suodatin, jota alettiin käyttää sähkömagneettisten häiriöiden suodattamiseen. Se koostuu pelkästään passiivisista, diskreeteistä kuristimista ja kondensaattoreista (Tarateeraseth 2012). Useimmiten se myös sisältää vastuksia, jotka toimivat kondensaattorien varauksien purkuvastuksina. Yksi esimerkki passiivisesta EMI-suodattimesta on esitetty kuvassa 3.1.

Diskreetin, passiivisen suodattimen etuja ovat sen helppo muokattavuus, asennettavuus ja kyky toimia suuritehoisissa ympäristöissä. Se voidaan helposti asentaa jälkikäteen, jos tulee tarve lisätä suodatusta, sillä se ei vaadi ulkoisia käyttö sähköjä. Riittää, että sen asentaa laitteen ja verkon väliin. Passiivisen diskreetin EMI-suodattimen heikkous on sen

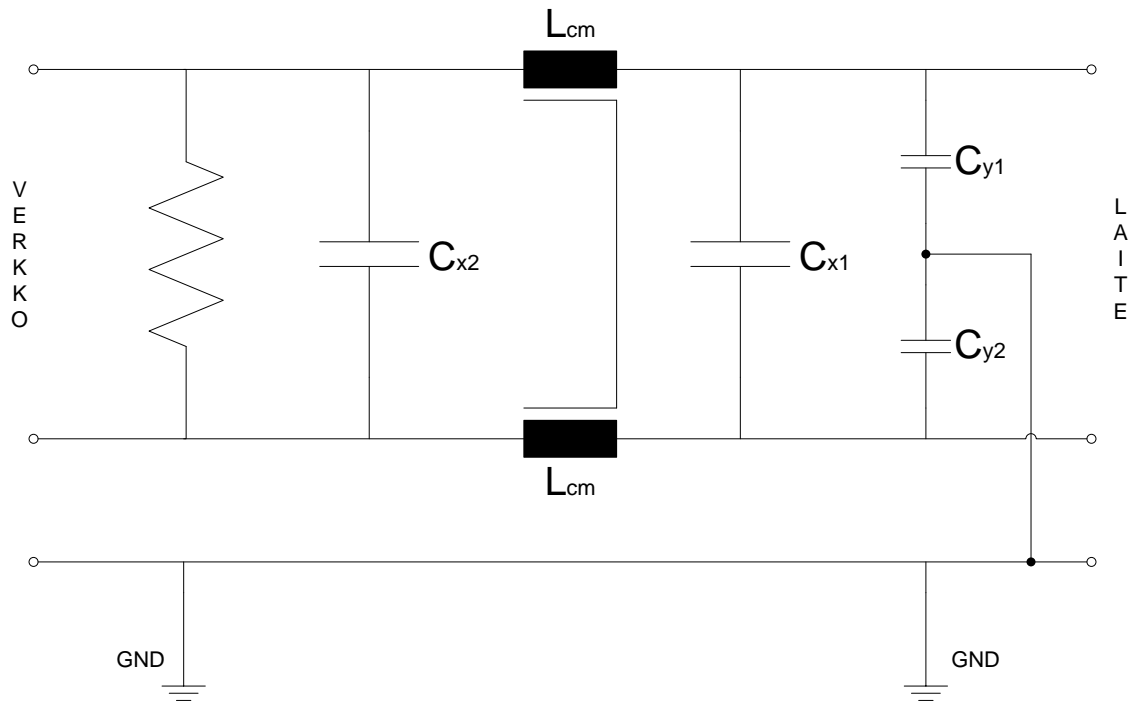
fyysinen koko (Chang et al. 2015). Mitä matalampi suodattimen reunataajuus on, sitä suuremmaksi induktiiviset komponentit kasvavat.

Reunataajuuden lisäksi myös suodatettavan häiriövirran suuruus vaikuttaa induktiivisten komponenttien kokoon. Fyysinen koko kasvaa läpäisevien häiriövirtojen kasvaessa. Mikäli kuristin on liian pieni, ei siihen voida käämiä tarvittavaa käämikierrosmäärää, jotta saadaan haluttu induktanssi. Lisäksi kuristin voi kyllästyä. Esimerkiksi yhteismuotoisen virran, joka kyllästyttää yhteismuotoisen kuristimen, voi laskea yhtälöllä

$$I_{cm} = \frac{B_{sat} * l_e}{\mu_0 \mu_r N}, \quad (3.1)$$

jossa  $B_{sat}$  on kuristimen sydämen saturaatiovuontiheys,  $l_e$  on kuristimen sydämen magneettinen pituus,  $\mu_0$  on tyhjiön permeabiliteetti,  $\mu_r$  on sydämen materiaalin permeabiliteetti ja  $N$  on käämikierrosten määrä.

Diskreettien, passiivisten EMI-suodattimien induktiivisten komponenttien kokoja on pyritty pienentämään käyttämällä korkeapermeabiliteettisiä sydänmateriaaleja, kuten esim. nanocrystallinea (Roc'h et al. 2012). Korkeapermeabiliteettisellä sydämellä tarvitaan vähemmän käämikierroksia saman induktanssin saavuttamiseksi mitä tarvittaisiin matalapermeabiliteettistä sydäntä käytettäessä. Tarvittavien käämikierrosten määrän vähentyessä voidaan käyttää pienempää kuristimen sydäntä, jolloin kuristimen ja siten koko suodattimen fyysinen koko pienenee. Yhtälöstä (3.1) kuitenkin nähdään, että lyhyt magneettinen pituus ja korkea permeabiliteetti voivat aiheuttaa kyllästymisen pienillä virroilla. Lisäksi korkeapermeabiliteettiset sydänmateriaalit ovat huomattavasti kalliimpia kuin yhteismuotoisissa kuristimissa yleisesti käytetyt ferriitit.

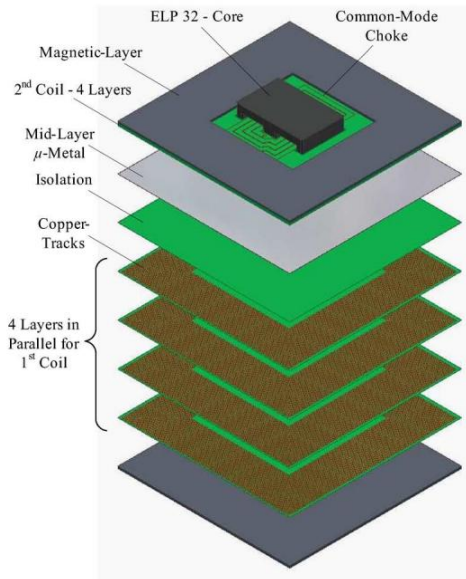


Kuva 3.1. Passiivinen EMI-suodin, jossa eromuotoista häiriötä vaimentaa kaksi X-kondensaattoria sekä yhteismuotoisen kuristimen hajavuon aiheuttama impedanssi. Yhteismuotoista häiriötä vaimennetaan yhteismuotoisella kuristimella sekä Y-kondensaattoreilla. Kuvassa esiintyvä laite voi olla esimerkiksi PWM ohjattu invertteri, joka tuottaa johtuvaa sähkömagneettista häiriötä.

### 3.2 Integroitu passiivinen EMI-suodatin

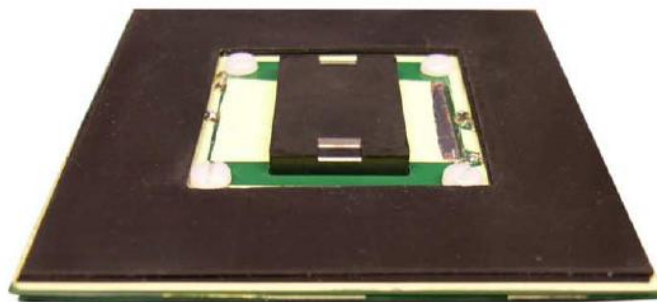
Perinteinen, diskreetti EMI-suodatin vie paljon tilaa. Tilan säästämiseksi on tutkittu passiivista EMI-suodatin vaihtoehtoa, jossa kaikki komponentit integroidaan piirilevyyn kerrostamalla. Kyseisellä ratkaisulla voidaan pienentää suodattimen kokoa jopa 20 % vastaavan suorituskyvyn omaavaan, perinteiseen diskreettiin versioon verrattuna. Tällaista ratkaisua kutsutaan yleisesti integroiduksi passiiviseksi hybridisuodattimeksi. (Biela et al. 2009)

Integroitu passiivinen hybridi EMI-suodatin on hyvä ratkaisu pientä kokoa tavoiteltaessa, mutta se ei sovellu suurien häiriövirtojen suodattamiseen. Esimerkki integroidun passiivisen hybridi EMI-suodattimen rakenteesta on esitetty kuvassa 3.2 ja vastaavasti valmis suodatin kuvassa 3.3.



Kuva 3.2. Esimerkki piirilevyllä integroidun, passiivisen EMI-suodattimen rakenteesta. Suodatin voidaan tehdä kerrostamalla. (Biela et al. 2009)

Kuvasta 3.2 nähdään mistä integroitu passiivinen hybridi EMI-suodatin koostuu. Voidaan havaita, että DM-kuristimet ovat toteutettu neljällä päällekkäisellä rinnan kytketyllä käämikerroksella, joista jokainen on eristetty Epcos:n FPC351 materiaalilla. Piirilevyjen keskelle on jätetty tilaa, johon mahtuu niin sanotulla planar ELP muotoisella sydämellä varustettu CM-kuristin. DM-kuristimien välissä on kaksi kerrosta FPC materiaalia eristeinä sekä  $\mu$ -metalli kerros, joka toimii magneettivuon reittinä. (Biela et al 2009)



Kuva 3.3. Piirilevyllä integroitu, passiivinen hybridi EMI-suodatin koottuna. Kerrokset eivät ole enää helposti erotettavissa toisistaan. (Biela et al. 2009)

Kuvasta 3.3 nähdään, että piirilevyllä integroitu passiivinen hybridi EMI-suodatin on hyvin kompakti rakenteeltaan, vaikka siinä on paljon kerroksia. Edes CM-kuristimen sydän ei kasvata korkeutta merkittävästi. Suodattimen kondensaattorit ja vaimennusvastukset olivat asennettu erilliselle levyllä tutkimuksen testeissä.

## 4. AKTIIVINEN EMI-SUODATIN

### 4.1 Johdanto

Pientääkseen EMI-suodattimien kokoja ja samalla parantaakseen niiden suorituskykyä matalilla taajuuksilla, aloitettiin tutkia aktiivisia menetelmiä sähkömagneettisten häiriöiden suodattamiseen. Tutkimuksen seurauksena syntyi aktiivinen EMI-suodatin (engl. Active EMI filter, AEF), joka nimensä mukaisesti koostuu aktiivisista komponenteista.

Aktiivisen EMI-suodattimen toiminta perustuu reaaliaikaiseen häiriön mittaamiseen ja kompensointiin (Yang 2014). Suodatin voi mitata joko häiriövirtaa tai -jännitettä topologiasta riippuen. Mitattu tulos viedään vahvistimelle, jossa se vahvistetaan ja invertoidaan. Invertoinnin jälkeen vahvistin pyrkii ajamaan häiriön arvon nolnaan syöttämällä invertoidun signaalin takaisin piiriin.

### 4.2 Topologiat

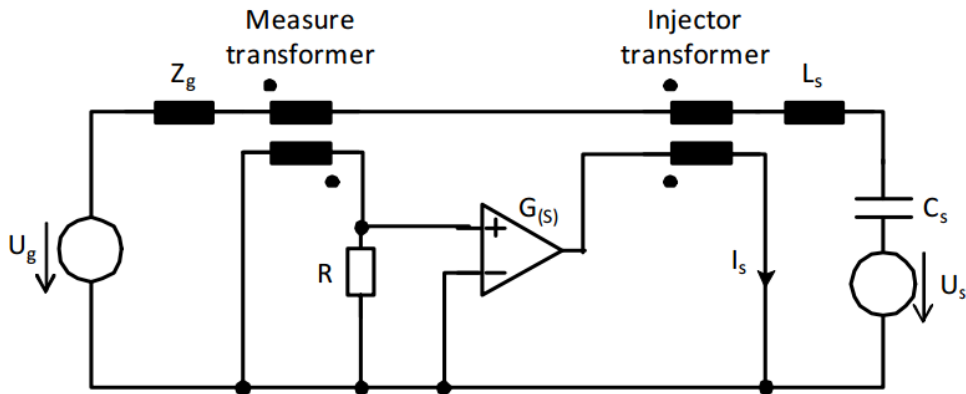
Nykyään on olemassa useita erilaisia tapoja toteuttaa AEF, mutta ne kaikki perustuvat neljän mittaus- ja kompensointimenetelmän yhdistelmään, jotka ovat:

- 1) Virran mittaus, jännitteen kompensointi (engl. Current Sense, Voltage Compensation, CSVC)
- 2) Virran mittaus, virran kompensointi (engl. Current Sense, Current Compensation, CSCC)
- 3) Jännitteen mittaus, virran kompensointi (engl. Voltage Sense, Current Compensation, VSCC)
- 4) Jännitteen mittaus, jännitteen kompensointi (engl. Voltage Sense, Voltage Compensation, VSVC).

Yllä olevasta neljästä topologiasta on tehty vertailuja useissa tutkimuksissa ja on huomattu, että tietyt suodatin topologiat toimivat tietyissä sovelluksissa paremmin kuin toiset. Lopullista topologia valintaa tehdessä tulee ottaa huomioon piirilevyllä olevan tilan, sekä mahdollisten vuotovirtojen suuruuksien rajoitukset. Eri yhdistelmien eromuotoisten häiriöiden vaimentamiseen kehitetyt takaisinkytkennällä varustetut topologiat ovat esitetty kuvissa 4.1 – 4.4. Kaksi esimerkkiä feedforward versioista on puolestaan esitetty kuvassa 4.5.

Käytännössä häiriövirtaa mittaavat yhteismuotoiset versiot ovat samanlaisia, mutta virtamuuntajan sijaan käytetään useimmiten CM-kuristinta, jolle on käämitetty yksi ylimääräinen käämitys mittausta varten. Myös kompensointikuristimena käytetään kompensointimuuntajan sijaan CM-kuristinta, jolle on käämitetty kompensointikäämitys.

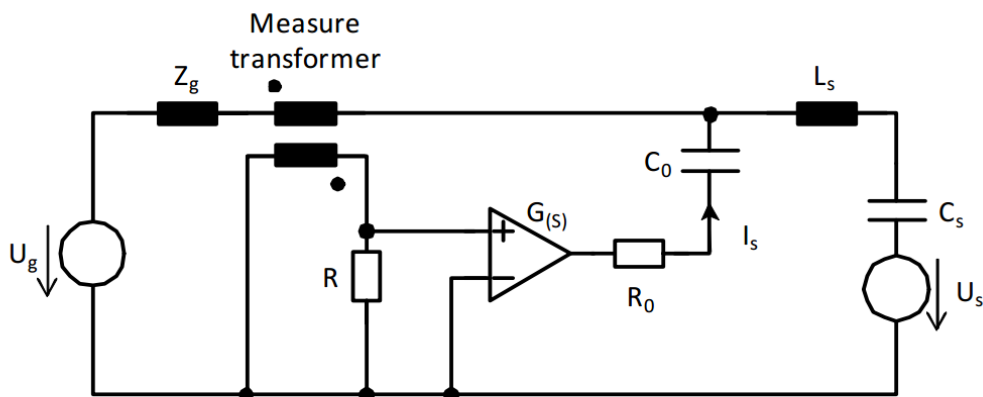
Lisäksi kompensointiin tarvittaisiin yhden sijaan kaksi kondensaattoria, sillä ne tulee olla kytketty vahvistimen lähdöstä molemmille johtimille.



Kuva 4.1. Häiriövirtaa mittaava ja jännitettä kompensoiva topologia (CSVC). (Ali et al. 2013)

Kuvassa 4.1 on esitetty CSVC topologia, joka on fyysisiltä mitoiltaan kaikista suurin topologia. Suhteessa muihin topologioihin sen suuri fyysinen koko johtuu kahdesta muuntajasta. Ensimmäinen muuntaja on virtamuuntaja tai mittauskäämityksellä varustettu CM-kuristin, joiden avulla mitataan häiriövirtaa. Toinen muuntaja toimii syöttöpiirinä, jonka avulla vahvistin voi syöttää kompensointijännitteen häiriölliseen piiriin. CM sovelluksissa kompensointimuuntajan paikalla käytetään kompensointikäämityksellä varustettua CM-kuristinta.

CSVC topologian hyvänä puolena voidaan pitää galvaanista eristystä varsinaisesta pääpiiristä, sekä vuotovirtojen mitättömiä suuruuksia.

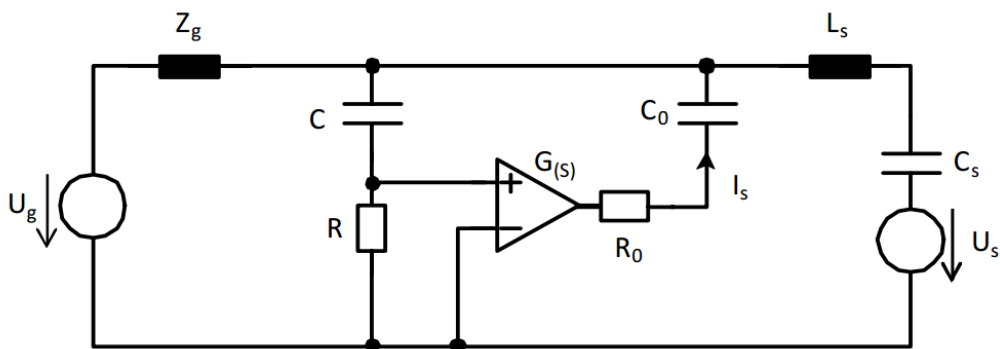


Kuva 4.2. Häiriövirtaa mittaava, virtaa kompensoiva topologia (CSCC). (Ali et al. 2013)



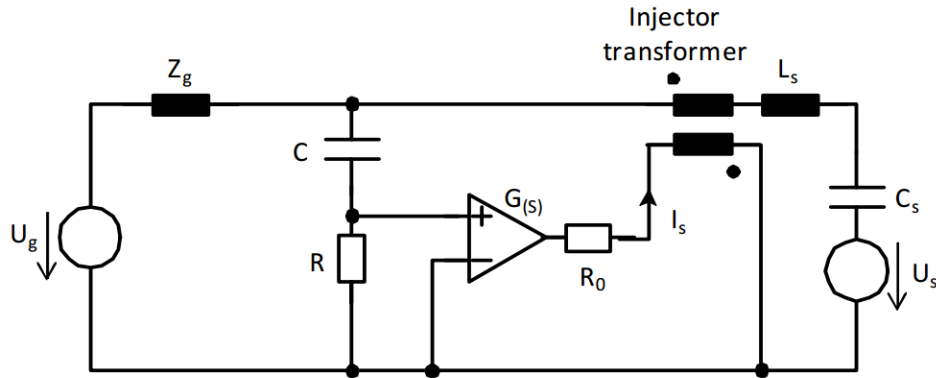
Kuvassa 4.2 on esitetty CSCC topologia, joka mittaa häiriövirtaa virtamuuntajan tai mittauskäämityksellä varustetun CM-kuristimen avulla. Häiriötä kompensoidaan sen invertoidulla virralla. CSCC topologia on fyysiseltä kooltaan pienempi kuin CSVC topologia, mutta sen kompensointi ei ole galvaanisesti eristetty pääpiiristä. CSCC topologian huonoina puolina voidaan pitää virtamuuntajan viemää tilaa, sekä mahdollisia vuotovirran suuruuksia.

Virtaa kompensoivien topologioiden yhteinen ongelma on, että kompensointipiirin kondensaattorien tulee olla riittävän isoja, jotta niiden läpi voidaan syöttää riittävän suuria kompensointivirtoja. Samalla ne eivät kuitenkaan saa ylittää Y-kondensaattorin suurinta sallittua kokoa. Lisäksi vuotovirran arvo voi olla rajoitettu sovelluksesta riippuen (Shin et al. 2015).



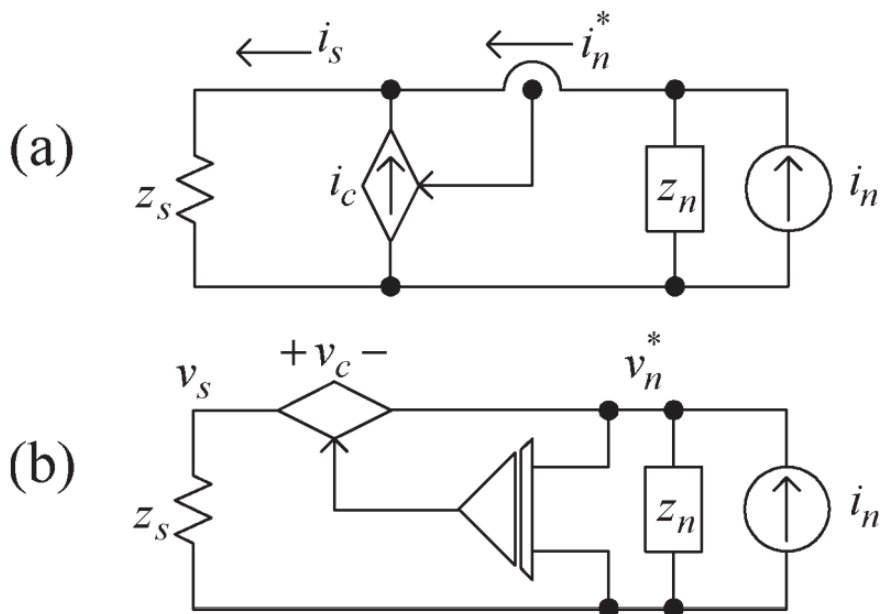
Kuva 4.3. Häiriöjännitettä mittaava, virtaa kompensoiva topologia (VSCC). (Ali et al. 2013)

Kuvassa 4.3 on esitetty VSCC topologia, jossa ei ole yhtään induktiivista komponenttia, jotka olisivat sarjassa pääpiirin kanssa. Induktiivisten komponenttien puuttumisen takia VSCC topologia on neljästä aktiivisten EMI-suodattimien aktiivisten osien perustopologioista pienin. Siinä häiriöjännitettä mitataan RC-ylipäästösuodattimen avulla ja kompensointivirta syötetään takaisin piiriin kondensaattorin läpi.



Kuva 4.4. Häiriöjännitettä mittaava, jännitettä kompensoiva topologia (VSVC). (Ali et al. 2013)

Kuvassa 4.4 esitettyssä VSVC topologiassa häiriöjännitteen mittaus tapahtuu RC-ylipäästösuodattimen avulla. Kompensointijännite syötetään takaisin piiriin muuntajan tai kompensointikäimityksellä varustetun CM-kuristimen avulla, joten vahvistimen lähtö on galvaanisesti erotettu pääpiiristä.



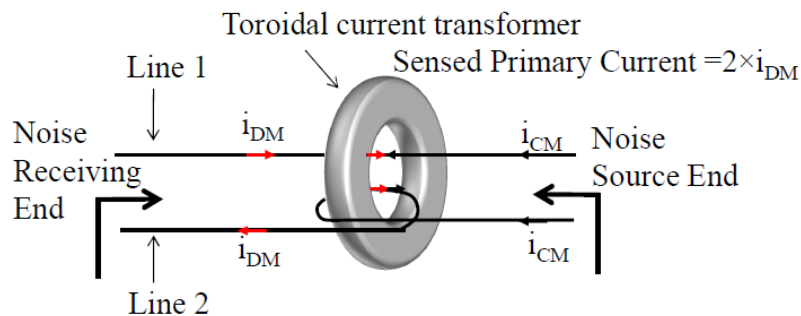
Kuva 4.5. Kaksi esimerkkiä feedforward topologioista: a) Häiriövirtaa mittaava, virtaa kompensoiva topologia (CSCC) b) Häiriöjännitettä mittaava, jännitettä kompensoiva topologia (VSVC). (Son et al. 2006)

Kaikkia neljää topologiaa voidaan toteuttaa sekä takaisinkytkettyinä versiona että feedforward versioina. Niiden rakenteet ja toimintaperiaatteet ovat samoja, mutta mittaus- ja kompensointikomponenttien paikat vaihtavat keskenään paikkaa. Takaisinkytketyt versiot ovat enemmän käytettyjä, sillä magnetisten komponenttien epälineaarisuus ja

aktiivisten komponenttien epävarmuudet tekevät feedforward versioiden optimoinnista hankalaa (Chang et al. 2015).

Vaihtosähkö (engl. Alternating current, AC) sovelluksissa, joissa halutaan suodattaa nimenomaan DM häiriötä täytyy ottaa huomioon useita asioita. Ensinnäkin täytyy muistaa, että AEF piirin ollessa jännitettä kompensoiva kompensointi kuristimen tulee olla niin iso, että sen läpi kulkeva AC virta ei kyllästä sitä. Häiriön mittausspuolella sen sijaan on otettava huomioon, että häiriöjännitettä mitattaessa mitattu jännite sisältää myös hyötysignaalin jännitteen ja muuta informaatiota, eikä pelkästään DM häiriön jännitettä (Shin et al. 2015). Häiriövirtaa mitattaessa täytyy virtamuuntajan ja vahvistimen väliin tehdä RC-ylipäästösuodatin, joka vaimentaa hyötysignaalin taajuutta erittäin tehokkaasti, jotta AEF ei pyri vaimentamaan myös sitä. Ylipäästösuodattimen reunataajuuden tulisi olla niin korkea, että se suodattaa 50 Hz tai 60 Hz signaalit erittäin tehokkaasti, mutta ei kuitenkaan niin korkea, että AEF ei tarjoa kunnon vaimennusta 150 kHz häiriölle.

Yksivaiheisissa järjestelmissä DM häiriövirtaa mittaava virtamuuntaja voidaan toteuttaa toroid sydämistä virtamuuntajaa käyttäen, kuten kuvassa 4.6. CM virtaa mittaava virtamuunnin sen sijaan saadaan laittamalla molemmat johtimet menemään toroid sydämen läpi ilman kierroksia. Kyseisessä tapauksessa DM muotoisten virtojen toroid sydämeen indusoimat magneettivuot etenisivät vastakkaisiin suuntiin, jolloin ne teoriassa kumoaisivat toisensa.



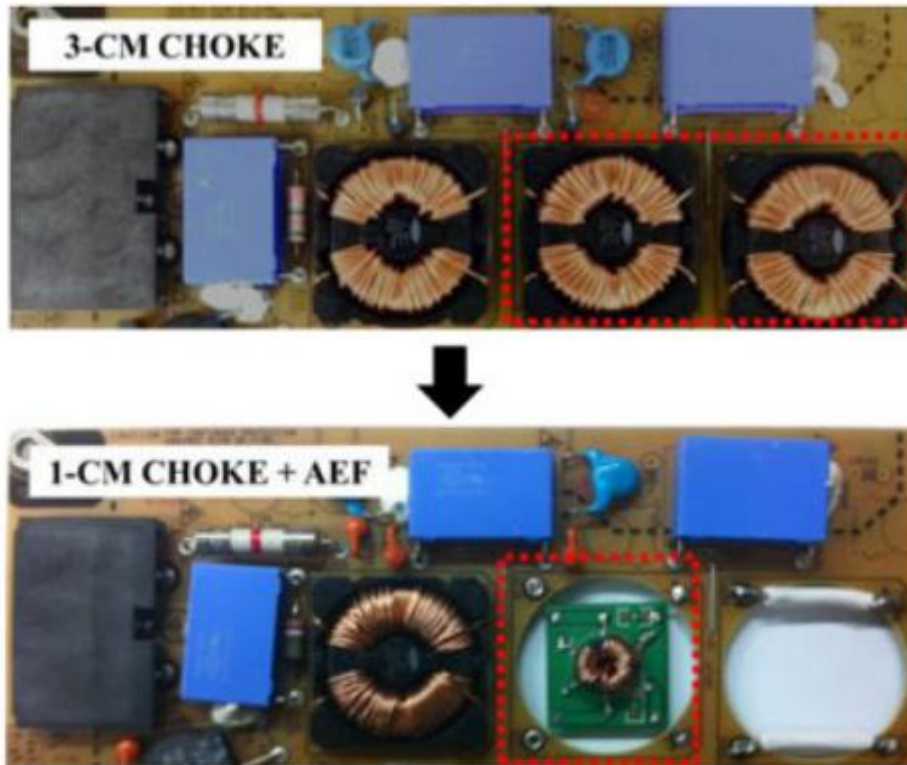
Kuva 4.6. Toroid sydämelle käämitty virtamuuntaja, joka suodattaa pois CM virran. Molemmat vaiheet tulee viedä sydämen läpi siten, että CM virtojen aiheuttamat magneettivuot etenevät vastakkaisiin suuntiin sydämessä, jolloin ne teoriassa kumoavat toisensa ja vain DM virta mitataan. (Goswami et al. 2015)

Kuvassa 4.6 esitetty kytkentä johtaa tilanteeseen, jossa CM virtojen toroid sydämeen indusoimat, vastakkaisiin suuntiin etenevät magneettivuot teoriassa kumoisivat toisensa, jolloin vain DM virta olisi mitattavissa, mutta kaksinkertaisena. Tapauksessa, jossa vain toinen johtimista menisi toroid sydämen läpi, virtamuuntaja mittaisi sekä DM että CM virrat.

### 4.3 Vahvuudet

Aktiivisten EMI-suodattimien vahvuudet ovat pieni koko suhteessa vastaavan suorituskyvyn omaaviin passiivisiin suodattimiin ja parempi suorituskyky tilavuutta kohti. Pienen kokonsa ansiosta ne ovat myös helpommin integroitavissa erilaisiin järjestelmiin. Lisäksi aktiiviset EMI-suodattimet omaavat erinomaisen vaimennuskyvyn alle 6 MHz:n taajuuksilla (Biela et al. 2009).

Suurivirtaisissa järjestelmissä joudutaan käyttämään kookkaita kuristimen sydämiä, jotta samaan aikaan vältetään kuristimen kyllästymiseltä ja saadaan aikaan riittävän hyvä vaimennus matalilla taajuuksilla. Kuristimien kokojen kasvaessa myös hinnat nousevat, joten lopullisen suodattimen hinta voi olla korkea. AEF:n aktiivinen osa vaimentaa tehokkaasti matalataajuisia häiriöitä, joten suodattimen induktiivisten komponenttien kokoa voidaan pienentää huomattavasti (Wang et al. 2010). Kuristimien pienentäminen luo säästömahdollisuuksia suodattimen kokonaishinnassa. Esimerkki AEF:n tuomasta tilansäästöstä on esitetty kuvassa 4.7.

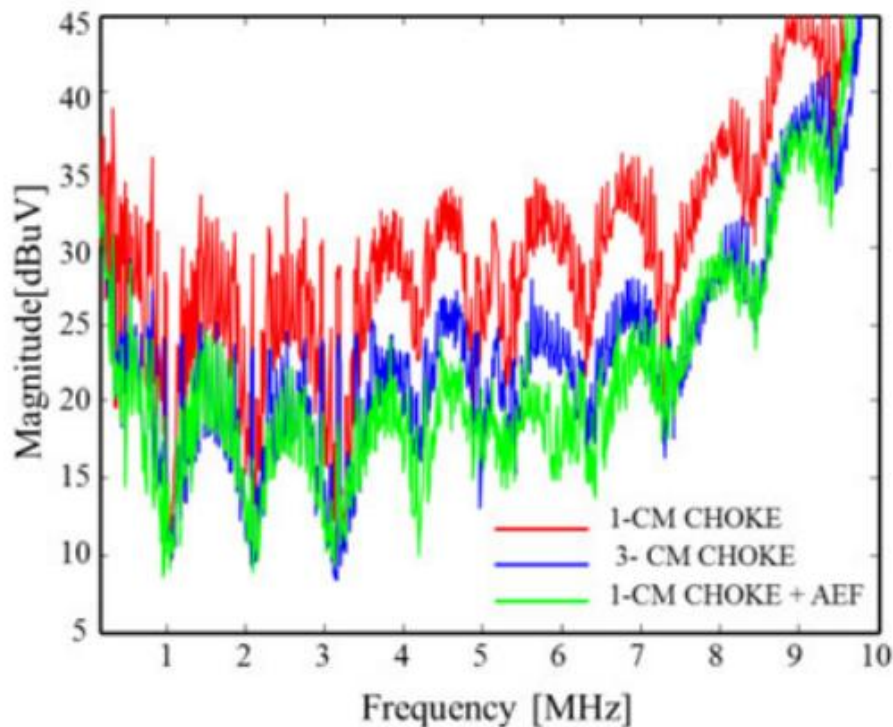


Kuva 4.7. Aktiivinen EMI-suodatin tehostaa yhteismuotoisen (CM) häiriön suodatusta niin tehokkaasti, että sillä voidaan korvata kaksi CM-kuristinta. Tällainen ratkaisu on paitsi tehokas, myös tilavuudeltaan pieni verrattuna kolmen sarjaan kytketyn CM-kuristimen toteutukseen. (Shin et al. 2015)

Kuvassa 4.7 on esitetty kaksi erilaista EMI-suodatinta, joiden vaimennuskyvyt ovat lähellä toisiaan. Ylemmässä kuvassa on perinteinen passiivinen EMI-suodatin, jossa on kolme sarjaan kytkettyä CM-kuristinta. Alemmassa kuvassa on AEF, jossa on aktiivisen osan

lisäksi myös yksi CM-kuristin. Molempien suodattimien vaikutus häiriön vaimennukseen on esitetty kuvassa 4.8.

Kuvasta 4.7 tulee selvästi ilmi, että korvaamalla kaksi kolmesta sarjaan kytketystä CM-kuristimesta aktiivisella EMI-suodattimella, saadaan koko suodattimen kokoa pienennettyä 50 %. Suodattimen koon pienentäminen mahdollistaa koko laitteen pienentämisen, joka on suuri kilpailuetu tänä päivänä.



Kuva 4.8. Aktiivinen EMI-suodatin on tehokas suodattamaan yhteismuotoista häiriötä. Aktiivinen EMI-suodatin yhdistettynä yksittäiseen CM-kuristimeen on tehokkaampi kuin kolme sarjaan kytkettyä CM-kuristinta. (Shin et al. 2015)

Kuvasta 4.8 voidaan nähdä, että kuvan 4.7 suodattimet omaavat lähes toisiaan vastaavat vaimennuskyvyt kokoeroista huolimatta. Tietyillä taajuuksilla AEF:n ja CM-kuristimen kombinaatio tarjoaa jopa paremman vaimennuksen kuin kolme sarjaan kytkettyä CM-kuristinta.

Kuvassa 4.8 esiintyvä punainen kuvaaja esittää suodatinta, jossa on vain yksi CM-kuristin. On selvää, että kyseisen suodattimen kyky vaimentaa häiriötä on kolmesta esitetystä suodatin vaihtoehdoista heikoin. Lisäksi aktiivisen osan suuri vaikutus vaimennukseen on helposti nähtävissä, kun vertaa punaista ja vihreää kuvaajaa toisiinsa.

#### 4.4 Aktiivinen hybridi EMI suodatin

Aktiiviset EMI-suodattimet eivät ole ratkaisu kaikkiin ongelmiin, sillä myös niillä on heikkoutensa. Ensinnäkin vahvistimien taajuuskaista on rajallinen (Chang et al. 2015).

Korkeilla taajuuksilla vahvistuserrointa täytyy pienentää, jotta voidaan varmistaa suodattimen stabiilius (Biela et al. 2009). Tämä johtaa vaimennuksen heikentymiseen tietyn pisteen jälkeen. Biela et al (2009) ovat maininneet tyypilliseksi maksimitaajuudeksi 6 MHz. Lisäksi aktiivisten EMI-suodattimien di/dt vaimennus, sekä korkea amplitudisen häiriövirran vaimentaminen on heikkoa (Wang et al. 2010).

Edellä mainittujen heikkouksien takia aktiivisten EMI-suodattimien rinnalle kehitettiin aktiivinen hybridi EMI-suodatin, joka on aktiivisen ja passiivisen EMI-suodattimen yhdistelmä. Aktiivinen hybridi EMI-suodatin sisältää sekä passiiviset komponentit että aktiivisen osan. Aktiivisen osan tehtävä on vaimentaa matalataajuisia häiriötä samalla, kun passiivinen osa vaimentaa korkeampitaajuisia häiriötä. Suodattimen koko pienenee, sillä aktiivisen osan vaimentaessa matalataajuisia häiriötä, passiivisten osien – varsinkin kuristimien – reunataajuuksia voidaan nostaa merkittävästi, jolloin komponenttien kokoa voidaan myös pienentää huomattavasti (Wang et al. 2010).

Biela et al (2009) vertailivat tutkimuksessaan diskreettia passiivista EMI-suodatinta, integroitua passiivista hybridi EMI-suodatinta ja aktiivista integroitua hybridi EMI-suodatinta, joilla oli suurinpiirtein samanlaiset suorituskyvyt. He huomasivat, että aktiivinen, piirilevylle integroitu EMI-suodatin oli tilavuudeltaan jopa 40 % pienempi kuin passiivi diskreetti EMI-suodatin. Heidän tutkimat suodattimet parametreineen ovat esitetty taulukossa 4.1. (Biela et al. 2009)

Taulukko 4.1. Saman vaimennuskyvyn omaavan diskreetin PEF:n, piirilevylle integroidun passiivisen hybridi EMI suodattimen, sekä piirilevylle integroidun AHEF:n vertailua. Suodattimet olivat asennettu PFC (Power Factor Correction) hakkurin ja sähköverkon väliin. PFC hakkurin lähtöjännite oli 410 V ja lähtöteho 600 W. (Biela et al. 2009)

CALCULATED AND MEASURED PARAMETERS OF THE THREE COMPARED EMI FILTERS

Parameter	Discrete Filter	Passive Filter			Active Filter		
		calculated	measured	modified	calculated	measured	modified
DM Inductance	60 $\mu$ H	194 $\mu$ H	182 $\mu$ H	206 $\mu$ H	132 $\mu$ H	108 $\mu$ H	150 $\mu$ H
CM Inductance	1.2 mH	1.45 mH	1.5 mH	1.45 mH	65 $\mu$ H	53 $\mu$ H	73 $\mu$ H
Losses @7.7A <sub>p</sub> /110V	3.56 W	2x(7.6+3.7)W	2x(8.9+4.2)W	2x(2.2+3.7)W	4x5.7W+6W	4x7.1W+6.1W	4x1.6W+6W
Efficiency @110V	99.4 %	96.2 %	95.6 %	98 %	95.2 %	94.3 %	98 %
Efficiency @230V	99.8 %	99.1 %	99.0 %	99.5 %	98.1 %	97.9 %	98.8 %
Total Volume	47.4 cm <sup>3</sup>	-	36.1 cm <sup>3</sup>	27.4 cm <sup>3</sup>	-	27.3 cm <sup>3</sup>	21.3 cm <sup>3</sup>

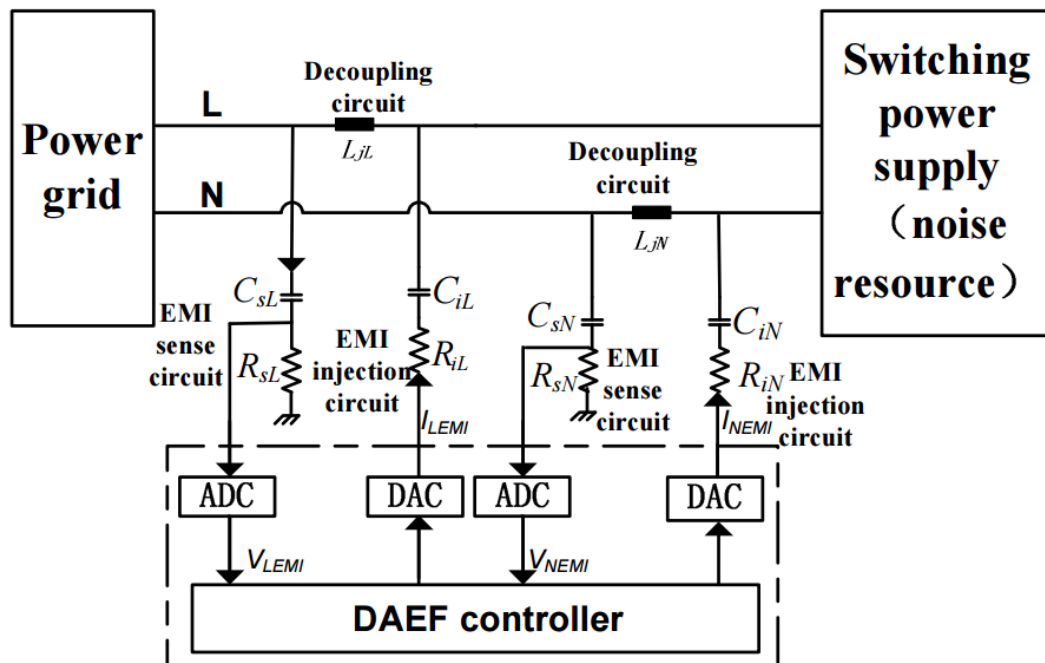
Taulukosta 4.1 nähdään, että piirilevylle integroidut passiiviset hybridi EMI-suodattimet ja aktiiviset hybridi EMI-suodattimet on mahdollista saada huomattavasti pienempään kokoon kuin perinteinen passiivinen, diskreetti suodatin. Pienentämällä esimerkiksi

tapauksen PFC hakkurin EMI-suodattimen kokoa, voitaisiin koko PFC hakkuri mahduttaa pienempään koteloon.

#### 4.5 Digitaalisesti ohjattu aktiivinen EMI-suodatin

Eräänlainen läpimurto aktiivisten EMI-suodattimien tutkimuksessa tapahtui vuonna 2012. Hamza et al (2012) julkaisi tutkimuksen, jossa tutkittiin digitaalisen aktiivisen EMI-suodattimen (engl. Digitally controlled active EMI filter, DAEF) soveltuvuutta aurinkopaneelin invertterin EMI-suodattimeksi. He todistivat, että digitaalinen, FPGA piiriin perustuva, aktiivinen EMI-suodatin on täysin käyttökelpoinen ja se omaa paljon etuja analogisiin aktiivi EMI-suodattimiin ja passiivisiin EMI-suodattimiin verrattuna. Suurin etu on integroitavuus ja pieni koko verrattuna passiivisiin EMI-suodattimiin. DAEF:n komponenttien koko ei kasva syöttövirran kasvaessa niin kuin passiivisissa suodattimissa, sillä niissä ei ole komponentteja, jotka ovat sarjassa syöttöverkon kanssa (Hamza et al. 2013) ja (Ji et al. 2016). Lisäksi DAEF:n ohjauspiiri voidaan integroida esimerkiksi invertterin ohjauspiiriin, jolloin varsinainen suodatin vie entistä vähemmän tilaa (Hsieh et al. 2015).

FPGA pohjainen, digitaalinen aktiivinen EMI-suodatin pystyy laskea yhteis- ja eromuotoiset sähkömagneettiset häiriöt erikseen, jolloin se voi myös vaimentaa niitä erikseen (Ji et al. 2016). Samaa topologiaa voidaan näin ollen käyttää kaikissa sovelluksissa. DAEF ja sen kuusi osiota ovat esitetty kuvassa 4.9



Kuva 4.9. Digitaalisesti ohjattu aktiivinen EMI-suodatin, joka perustuu FPGA piiriin. Suodatin koostuu kuudesta eri osasta: EMI:n mittaus- ja kompensointipiireistä, ADC:sta, DAC:sta, ohjausyksiköstä sekä mittaus- ja syöttöpiiriin erottimesta. (Ji et al. 2016)



Kuvasta 4.9 voidaan nähdä DAEF:n kuusi eri osiota: Sähkömagneettisen häiriön mittaus- ja kompensoitipiirit, ADC, DAC, ohjauksyksikkö, sekä mittaus- ja syöttöpiirin erotin.

Sähkömagneettisen häiriön mittauspiiri (engl. EMI sense circuit) on vastuksesta ja kondensaattorista koostuva ylipäästösuodatin. Se tulee mitoittaa siten, että hyötysignaali ei pääse EMI-suodattimen ADC:hen. ADC muuntaa analogisen mitatun signaalin digitaalseksi, jonka jälkeen digitaalinen signaaliprosessori (engl. Digital signal processor, DSP) käsittelee signaalin ja invertoi sen. Invertoinnin jälkeen signaali syötetään DAC:iin, joka muuntaa digitaalisen signaalin analogiseksi. Lopuksi analoginen invertoitu signaali syötetään sähkömagneettisen häiriön syöttöpiiriin (engl. EMI injection circuit) läpi takaisin piiriin. EMI syöttöpiiri on kondensaattorista ja vastuksesta koostuva alipäästösuodatin.

Digitaaliset aktiiviset EMI-suodattimet ovat erittäin potentiaalisia vaihtoehtoja korvaamaan passiiviset EMI-suodattimet tulevaisuudessa, jos FPGA piirien hinnat laskevat. Toistaiseksi niiden hinnat ovat vielä niin korkealla, että yritykset eivät ole kiinnostuneita korvaamaan passiivisia EMI-suodattimiaan.

#### **4.6 Tutkimus**

Vuoden 2014 jälkeen on tutkittu aktiivisten EMI-suodattimien käyttöä erilaisissa sovelluksissa. Sovellukset eivät ole rajoittuneet tietyille aloille, eikä tiettyihin teholuokkiin. Tutkimuksissa on testattu AEF:n, aktiivisten hybridi EMI-suodattimen ja DAEF:n soveltuvuutta niin 1- kuin 3-vaihe sovelluksiinkin.

Tutkija Wang et al (2010) testasi aktiivisen hybridi EMI-suodattimen käyttöä sähkömoottorikäytössä. He todistivat, että aktiivisia hybridi EMI-suodattimia voidaan käyttää myös sähkömoottorikäytöissä, jolloin suodattimen fyysinen koko on huomattavasti pienempi kuin vastaavan vaimennuksen tarjoava passiivinen EMI-suodatin.

Tutkijat Shin et al (2015), Yang et al (2014), sekä Yang et al (2014) ovat tutkineet aktiivisia EMI-suodattimia DC/DC muuntajien yhteydessä. He ovat kaikki tulleet siihen tulokseen, että käyttämällä aktiivisia EMI-suodattimia, voidaan suodattimien kokonaispinta-aloja pienentää huomattavasti passiivisiin toteutuksiin verrattuna. Suodattimen fyysinen koko on tärkeä varsinkin sellaisissa sovelluksissa, joissa tila on erittäin rajoitettu. Tästä syystä sähköisistä ajoneuvoista on muodostunut yksi kiinnostavimmista aktiivisten EMI-suodattimien käyttökohteista. Tutkija Hamza et al (2012) totesi tutkimuksessaan, että digitaalinen aktiivinen EMI-suodatin on erittäin hyvä ratkaisu sähköisiin ajoneuvoihin niin DC/DC muuntajien kuin AC/DC muuntajienkin häiriöiden suodatuksessa.

Digitaalisten aktiivisten EMI-suodattimien soveltuvuutta aurinkosähkökäyttöihin on tutkittu muun muassa tutkijan Hamza et al (2012) toimesta. Hamza et al (2012) tuli siihen tulokseen, että DAEF voisi korvata perinteisen, passiivisen EMI-suodattimen



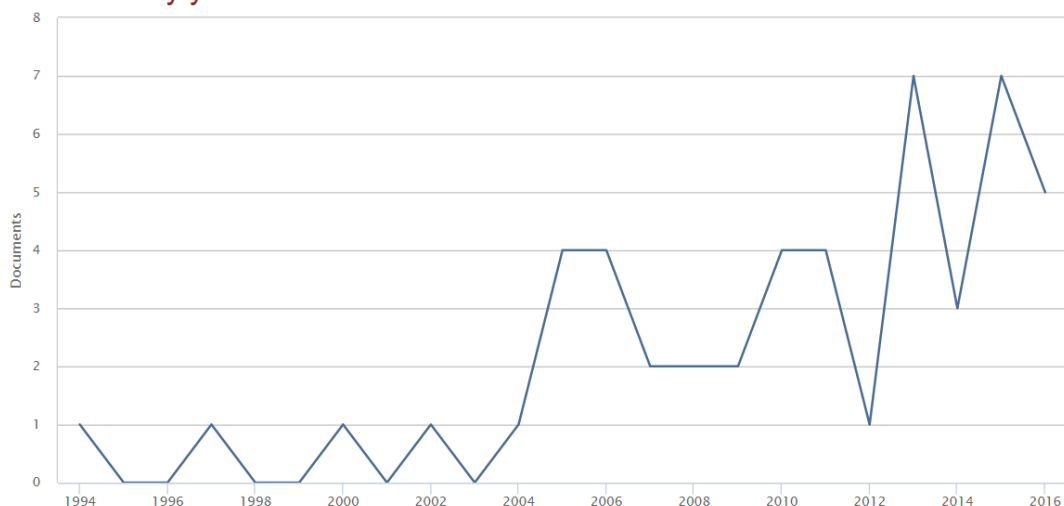
pienitehoisessa invertterissä. Se tarjoaa vastaavan vaimennuksen kuin fyysiseltä kooltaan suurempi perinteinen passiivinen EMI-suodatin. Lisäksi se pienentää koko järjestelmän tehohäviöitä ja siten parantaa hyötysuhdetta. (Hamza et al. 2012)

Aktiivisten EMI-suodattimien soveltamista AC/DC järjestelmiin on myös tutkittu, mutta huomattavasti vähemmän kuin DC/DC sovelluksiin. Varsinkin AC/DC muuntajien aiheuttamien DM häiriöiden suodattamista AEF:llä on tutkittu vain muutamien tutkijoiden toimesta. Goswami et al (2015) uskoi sen johtuvan kyseisten AEF:n suunnittelun haasteellisuudesta.

#### 4.6.1 Aikajana

Aktiivisia EMI-suodattimia ja niiden käyttömahdollisuuksia on tutkittu jo 90-luvulla, mutta vasta vuoden 2004 jälkeen alettiin julkaista enemmän kuin yksi tutkimusartikkeli per vuosi. Toistaiseksi eniten aktiivisia EMI-suodattimia käsitteleviä tutkimuksia on julkaistu vuosina 2013 ja 2015. Tutkimusten vuosittaisten määrien muutokset ovat esitetty kuvassa 4.10.

##### Documents by year



Kuva 4.10. Aktiivisten EMI-suodattimien tutkiminen on lähti nousuun vuoden 2004 jälkeen. Vuonna 2012 alkoi tutkimuksissa esiintyä myös digitaalisia aktiivisia EMI-suodattimia. (Scopus 2016)

Kuvasta 4.10 nähdään, että vuonna 2012 julkaistiin vain yksi aktiivisiin EMI-suodattimiin liittyvä tutkimusartikkeli. Kyseisessä tutkimuksessa Hamza et al (2012) tutki digitaalisen aktiivisen EMI-suodattimen käyttöä aurinkopaneelin invertterin lähdössä. Tutkimusartikkeli oli merkittävä, sillä se oli ensimmäinen tutkimus, jossa tutkittiin digitaalisesti ohjatun aktiivisen EMI-suodattimen käyttöä ja todettiin sen olevan potentiaalinen vaihtoehto korvaamaan perinteinen passiivinen EMI-suodatin.

Vuoden 2012 jälkeen digitaalisia aktiivisia EMI-suodattimia on tutkittu myös muiden tutkijoiden toimesta. Vuotta 2014 lukuunottamatta, digitaalisista aktiivisista EMI-

suodattimista on julkaistu vähintään yksi tutkimusartikkeli per vuosi. Vuonna 2013 kaksi seitsemästä julkaistusta aktiivisia EMI-suodattimia koskevasta tutkimusartikkeleista koski nimenomaan digitaalisia aktiivisia EMI-suodattimia. Vuonna 2015 yhteensä neljä seitsemästä tutkimusartikkelista käsitteli digitaalisia aktiivisia EMI-suodattimia. (Scopus 2016)

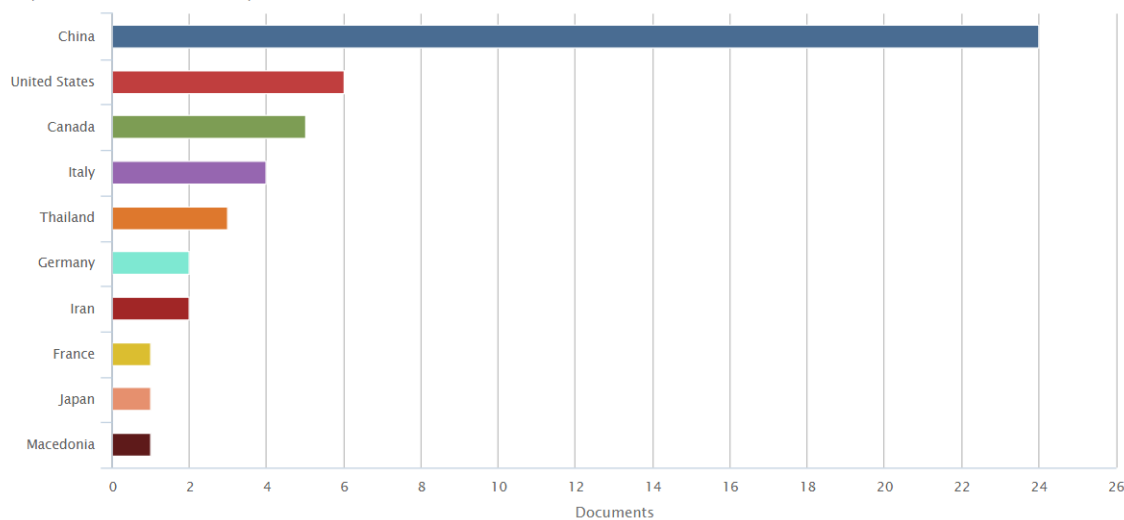
Vuonna 2016 julkaistiin vain 5 tutkimusartikkelia, jotka käsittelivät aktiivisia EMI-suodattimia (Scopus 2016). Kaksi niistä käsitteli digitaalisia toteutuksia, joten voidaan sanoa, että digitaalisten aktiivisten EMI-suodattimien tutkimus on kasvussa.

#### 4.6.2 Tutkivat maat

Aktiivisia EMI-suodattimia on tutkittu useissa eri maissa. Ainoastaan 13 eri maan yliopistojen tutkijoiden julkaisemia tutkimuksia löytyy Scopus -portaalin kautta. Maat, joiden yliopistojen tutkijat ovat julkaisseet aktiivisiin EMI-suodattimiin liittyviä tutkimuksia, ovat esitetty kuvassa 4.11. Kuvasta puuttuu Puola, Etelä-Korea ja Taiwan, joiden yliopistoista on julkaistu yhdet tutkimukset.

#### Documents by country/territory

Compare the document counts for up to 15 countries/territories



Kuva 4.11. Aktiivisten EMI-suodattimien tutkimukset maittain. Suurinosa tutkimuksesta on tehty Kiinassa. (Scopus 2016)

Kuvasta 4.11 nähdään, että ylivoimaisesti suurinosa aktiivisten EMI-suodattimien tutkimuksista on julkaistu Kiinan yliopistojen tutkijoiden toimesta. Varsinkin Xi'an Jiaotong Yliopiston tutkijat ovat olleet aktiivisia, sillä he ovat julkaisseet yhteensä 16 tutkimusartikkelia.

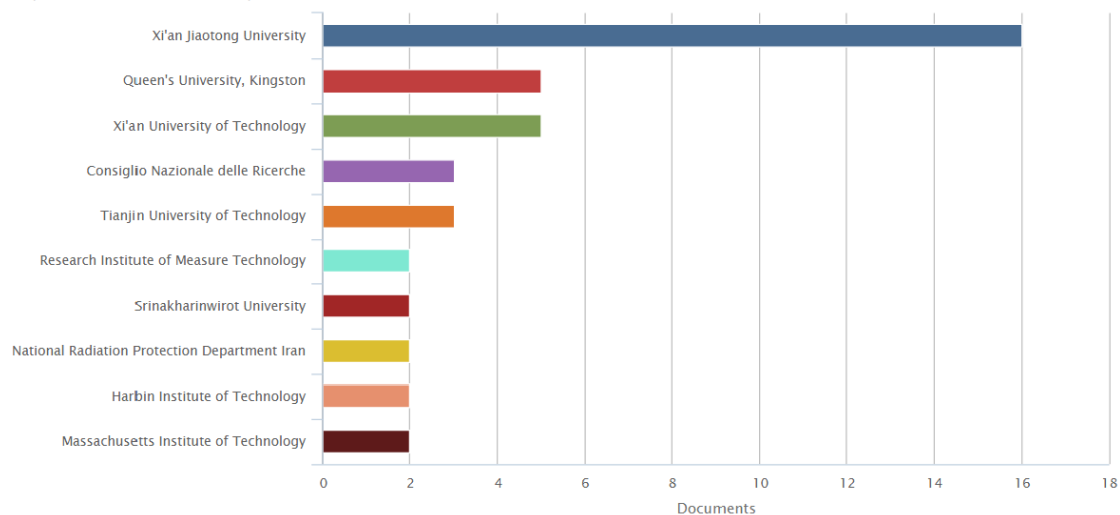
#### 4.6.3 Tutkivat yliopistot

On olemassa lukuisia yliopistoja, joiden tutkijat ovat julkaisseet vähintään yhden aktiivisiin EMI-suodattimiin liittyvän tutkimuksen. Kaksi tai useamman tutkimuksen

julkaisseita yliopistoja löytyy vain 11. Ne ovat esitetty kuvassa 4.12. Kuvasta puuttuu Virginia Polytechnic Institute and State University, joka on ollut mukana kahdessa julkaisussa.

### Documents by affiliation

Compare the document counts for up to 15 affiliations



Kuva 4.12. Aktiivisten EMI-suodattimien tutkimukset yliopistoittain. Kiinassa sijaitsevassa Xi'an Jiaotong yliopistossa tehdään kaikista eniten tutkimusta aktiivisista EMI-suodattimista. (Scopus 2016)

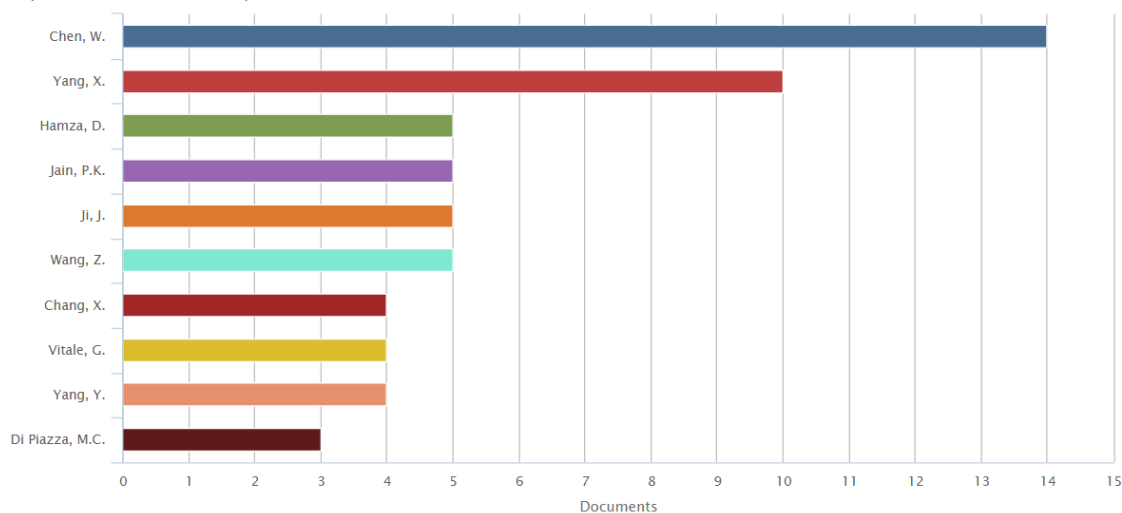
Kuvasta 4.12 nähdään, että Kiinan Xi'an Jiaotong Yliopiston tutkijat ovat julkaisseet ylivoimaisesti eniten tutkimuksia vuosien varrella. Lisäksi voidaan todeta, että kymmenen eniten tutkimuksia julkaisseiden yliopiston joukossa on yhteensä neljä Kiinalaista yliopistoa: Xi'an Jiaotong Yliopisto, Xi'an Teknillinen Yliopisto, Tianjinin Teknillinen Yliopisto ja Harbinin Teknillinen Yliopisto.

#### 4.6.4 Tutkijat

Kuvasta 4.11 ja 4.12 nähtiin, että suurin osa aktiivisten EMI-suodattimien tutkimuksesta on tehty Kiinassa. Kuvassa 4.13 on esitetty kymmenen tutkijaa, jotka ovat tehneet eniten tutkimusta aktiivisten EMI-suodattimien parissa.

## Documents by author

Compare the document counts for up to 15 authors



Kuva 4.13. Aktiivisten EMI-suodattimien tutkimukset henkilöittäin. Kiinalaiset tutkijat Chen ja Yang ovat julkaisseet eniten tutkimusartikkeleita, jotka liittyvät aktiivisiin EMI-suodattimiin. (Scopus 2016)

Kuvasta 4.13 käy selkeästi ilmi, että Kiinalaiset tutkijat Chen ja Yang ovat olleet mukana julkaisemassa eniten tutkimusartikkeleita, jotka käsittelevät aktiivisia EMI-suodattimia. Heidän tutkimuksensa keskittyvät analogisiin aktiivisiin EMI-suodattimiin toisin, kuin listalta löytyvät tutkijat Hamza ja Ji, jotka ovat tutkineet digitaalisia aktiivisia EMI-suodattimia.

## 5. AKTIIVISTEN EMI-SUODATTIMIEN NYKYINEN TILANNE

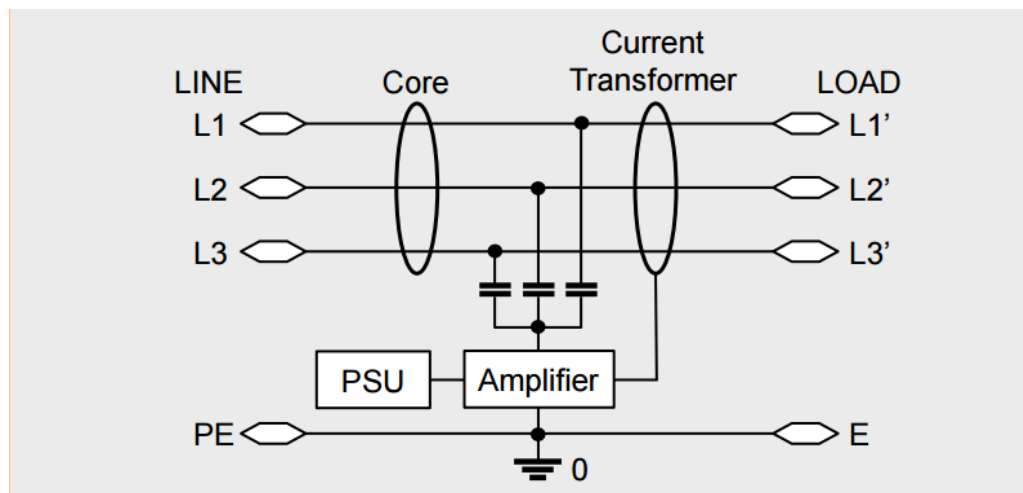
### 5.1 Kaupallistuminen

Olkoonkin, että aktiivisten EMI-suodattimien ympärillä on tehty paljon tutkimuksia, ei niitä ole kunnolla kaupallistettu. Eri hakukoneita käyttämällä voi löytää vain kaksi valmistajaa, jotka myyvät valmiita suodattimia. Lisäksi löytyy useita patenteja.

Vicor valmistaa Picor QuietPower QPI -nimistä tuoteperhettä, joka koostuu valmiista piirilevyille asennettavista DC-DC hakkurien kanssa käytettävistä aktiivisista EMI-suodattimista. Kaikki kyseisen tuoteperheen jäsenet ovat pintaliitoskomponentteja, jotka tulevat LGA pakettina. Kaikki tuoteperheen mallit ovat listattu liitteestä I löytyvään taulukkoon. (Vicor 2017)

Vicor ilmoittaa kotisivuillaan, että kaikki Picor QuietPower QPI -sarjan mallit ovat suunniteltu vaimentamaan sekä ero- että yhteismuotoisia häiriöitä. Täydellä kuormalla niiden hyötysuhteen luvataan olevan yli 99 %. Lisäksi he ilmoittavat, että heidän suodattimensa pinta-ala vie piirilevyltä vain 50 % siitä mitä passiivinen toteutus veisi. (Vicor 2017)

Vicor:n lisäksi TDK myy aktiivista EMI-suodatinta, jolle he ovat antaneet nimeksi LeaXield. He eivät mainosta tuotettaan varsinaisena aktiivisena EMI-suodattimena, vaan passiivisen EMI-suodattimen ja verkon väliin laitettavana aktiivisena suodattimena, joka pienentää vuotovirtoja eli yhteismuotoista virtaa. Käytännössä LeaXield on puhdas aktiivinen EMI-suodatin, jonka toiminta perustuu yhteismuotoisen virran mittaamiseen ja kompensointiin. Kuvassa 5.1 on esitetty yksinkertaistettu kytkentä, josta nähdään selvästi kyseessä olevan aktiivisilla osilla varustettu suodatin eli aktiivinen EMI-suodatin. (TDK 2014)



Kuva 5.1. LeaXield:n kytkentäkaavio. Kuvasta nähdään, että kyseessä on aktiivinen EMI-suodatin, joka mittaa yhteismuotoista virtaa virtamuuntimella. Vahvistin invertoi ja vahvistaa mitatun virran, jonka jälkeen se syötetään kolmen kondensaattorin läpi takaisin piiriin. (TDK 2014)

Kuvasta 5 voidaan havaita, että TDK:n Leaxield on virtaa mittaava ja virtakompensoiva aktiivinen EMI-suodatin. Nähdään, että siihen sisältyy yksi yhteismuotoinen kuristin, virtamuuntaja, aktiivinen vahvistin teholähteineen sekä kolme kondensaattoria, joiden läpi invertoitu ja vahvistettu kompensointivirta syötetään takaisin piiriin.

## 6. TULEVAISUUDEN NÄKYMÄT

Aktiiviset EMI-suodattimet ja aktiiviset hybridi EMI-suodattimet tulevat yleistymään tulevaisuudessa, kun laitteiston kokoa halutaan pienentää, koska passiivisten EMI-suodattimien induktiivisten osien koko kasvaa suodattimen rajataajuutta pienennettäessä. Toisin sanoen, jos laite tai järjestelmä aiheuttaa paljon 10 kHz – 5 MHz taajuuksista johtuvaa sähkömagneettista häiriötä, täytyy yhteismuotoisten kuristimien tai eromuotoisten kuristimien kokoa kasvattaa, jotta voidaan käämiä riittävästi käämikierroksia ja saada tarvittava induktanssi. Samalla on varmistettava, ettei kuristin kyllästy. Kuristimen koon kasvaminen johtaa koko suodattimen ja siten koko laitteen tai järjestelmän koon kasvamiseen, joka ei useimmiten ole toivottua. Samalla kuristimien hinnat kasvavat koon kasvaessa.

Tutkimuksien mukaan aktiivinen EMI-suodatin on paras valinta alle 5 MHz taajuuksisten EMI signaalien suodattamiseen. Se ei myöskään vaadi suuria passiivisia komponentteja, jotka kasvattaisivat koko suodattimen kokoa, joten se on mahdollista tehdä pieneen kokoon. Aktiivinen hybridi suodatin puolestaan yhdistää aktiivisen EMI-suodattimen suorituskyvyn matalilla taajuuksilla ja passiivisen suotimen suorituskyvyn korkeilla taajuuksilla, mutta on silti pienempi kuin perinteinen passiivinen suodatin. Sen käyttö sovelluksissa, joissa tila on rajattu ja joissa kulkee suuria häiriöitä matalilla taajuuksilla, tulee yleistymään. Yksi hyvä esimerkki on sähköajoneuvokäytöt.

Chang et al (2015) mukaan yksi mahdollinen syy aktiivisten EMI-suodattimien ja aktiivisten hybridi EMI-suodattimien vähälle käytölle on vahvistimien tarvitsema käyttöenergia. Syy on järkeenkäypä, sillä ns. plug and play suodattimien teko on hankalaa. Toisaalta on hyvinkin mahdollista, että tälläkin useat markkinoilla olevat hakkuriteholähteet tai suuremmat järjestelmät sisältävät aktiivisia EMI-suodattimia, mutta piirikaavioita ei julkaista ulkopuolisille. Tästä syystä aktiivisten EMI-suodattimien mahdollinen käyttö erilaisissa sovelluksissa ei ole yleisessä tiedossa.

Digitaalisesti ohjattuja aktiivisia EMI-suodattimia on tutkittu vuodesta 2012 lähtien. Tutkimuksissa niitä on testattu erilaisissa järjestelmissä ja ne ovat todettu hyviksi ratkaisuksiksi, joilla voitaisiin korvata perinteiset passiiviset suodattimet. Tällä hetkellä FPGA piirit ovat kuitenkin kalliita, joten DAEF:n käyttö teollisuudessa ei tule yleistymään ennen kuin FPGA piirien hinnat laskevat. Hintojen laskemisen jälkeen ei ole mitään syytä, miksi DAEF:t eivät yleistyisi. Varsinkin sellaisiin sovelluksiin, joissa käytetään jo nyt FPGA piirejä, voisi helposti integroida myös DAEF:n.

## YHTEENVETO

Analogisia ja digitaalisesti ohjattuja aktiivisia EMI-suodattimia on tutkittu aktiivisesti vuodesta 2004 alkaen. Vuosien aikana on tutkittu sekä virtakompensointiin että jännitekompensointiin perustuvia topologioita, joiden heikkouksia ja vahvuuksia on selvitetty erilaisissa sovelluksissa. Kaikkien aktiivisten EMI-suodatin topologioiden yhteinen vahvuus on pieni koko ja erinomainen vaimennuskyky matalilla, alle 6 MHz:n taajuuksilla. Analogisten aktiivisten EMI-suodattimien heikkous on vahvistimien taajuuskaistan riittämättömyys, sekä huono kyky vaimentaa suuriamplitudisia häiriöitä ja suuria di/dt piikkejä. Korkeataajuisten häiriöiden kompensointiin tarvittavia invertoituja virtoja ja jännitteitä ei saada, koska vahvistimet eivät voi vahvistaa invertoitua signaalia riittävästi pysyen samalla stabiilina. Analogisten aktiivisten EMI-suodattimien rinnalle syntyi aktiiviset hybridi suodattimet, jotka ovat käytännössä aktiivisten ja passiivisten EMI-suodattimien yhdistelmiä. Aktiivinen osa vaimentaa matalia taajuuksia tehokkaasti passiivisen osan huolehtiessa korkeampien taajuuksien vaimentamisesta. Tällä tavoin passiivisten suodattimien reunataajuuksia ollaan voitu nostaa reilusti ylöspäin, joka on johtanut varsinkin induktiivisten komponenttien kokojen merkittävään pienentymiseen.

Vuonna 2012 Hamza et al. julkaisi ensimmäisen raportin digitaalisesti ohjatusta aktiivisesta EMI-suodattimesta, joka perustui FPGA piiriin. Hän todisti tutkimusryhmineen, että digitaalisesti ohjattu EMI-suodatin on potentiaalinen vaihtoehto perinteiselle passiiviselle EMI-suodattimelle. Digitaalisesti ohjattu aktiivinen EMI-suodatin tarjoaa merkittäviä tilan säästöjä, sillä siihen ei tarvita yhtään kuristinta, joita pitäisi kytkeä sarjaan verkon tai teholähteen kanssa. Sen koko ei siis kasva sovelluksen tehon kasvaessa. Myöhemmin on todistettu, että digitaalisesti ohjattu EMI-suodatin pystyy laskemaan sekä yhteis- että eromuotoisen häiriön suuruuden erikseen, joten sen avulla voidaan vaimentaa molempia samaan aikaan tai jompaa kumpaa erikseen.

Aktiivisia EMI-suodattimia on tutkittu useassa eri yliopistossa vuoden 2004 jälkeen. Suurin osa aktiivisten EMI-suodattimien tutkimuksista on tehty Kiinassa. Myös USA:ssa, Kanadassa ja Italiassa on tehty tutkimuksia aktiivisten EMI-suodattimien parissa. Kiinan yliopistoista Xi'an Jiaotong yliopisto erottuu muiden joukosta julkaistujen tutkimuksien määrässä.

Olkoonkin, että aktiivisista EMI-suodattimista löytyy jonkin verran tutkimustietoa, niitä ei ole kaupallistettu kahta poikkeusta lukuunottamatta. Internetistä etsimällä löytyy vain Vicor:in valmistamaa Picor QuietPower QPI –tuoteperhettä, sekä TKD:n LeaXield suodattimia. On mahdollista, että aktiivisia EMI-suodattimia on käytössä laajemminkin, mutta ne ovat rakennettu laitteiden sisälle valmiiksi, eikä niistä löydy tietoa datalehdissä.

Tulevaisuudessa aktiiviset EMI-suodattimet, digitaalisesti ohjatut aktiiviset EMI-suodattimet sekä aktiiviset hybridi EMI-suodattimet tulevat yleistymään, kun suodattimia halutaan saada entistä pienempään tilaan. Sovellukset, joissa tila on rajoitettu, on ehdottoman tärkeää saada mahdollisimman hyvän vaimennuskyvyn omaava suodatin, joka



meni mahdollisimman pieneen tilaan. Tällaisissa tapauksissa edellä mainitut suodattimet ovat aivan omassa luokassaan.

## LÄHTEET

- (Ali et al. 2013) M. Ali, E. Labouré & F. Costa 2013, "Integrated hybrid EMI filter: Study and realization of the active part", *2013 15th European Conference on Power Electronics and Applications (EPE)*, pp. 1.
- (Biela et al. 2009) J. Biela, A. Wirthmueller, R. Waespe, M. L. Heldwein, K. Raggl & J. W. Kolar 2009, "Passive and Active Hybrid Integrated EMI Filters", *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 24, no. 5, pp. 1340-1349.
- (Chang et al. 2015) X. Chang, W. Chen, Y. Yang, K. Wang & X. Yang 2015, "Research and realization of a novel active common-mode EMI filter", *2015 IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC)*, pp. 1941.
- (Digi-Key 2008) Digi-Key 2008. All about EMI filters [verkkodokumentti]. [viitattu 13.2.2016]. Saatavana:  
[https://www.digikey.com/Web%20Export/Supplier%20Content/Lambda\\_285/PDF/TDKLambda\\_all\\_about\\_emi\\_epmag.pdf?redirected=1](https://www.digikey.com/Web%20Export/Supplier%20Content/Lambda_285/PDF/TDKLambda_all_about_emi_epmag.pdf?redirected=1)
- (Goswami et al. 2015) R. Goswami, S. Wang & Y. Chu 2015, "Design of an active differential mode current filter for a boost power factor correction AC-DC converter", *2015 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE)*, pp. 4375.
- (Hamza et al. 2013) D. Hamza & M. Qiu 2013, "Digital Active EMI Control Technique for Switch Mode Power Converters", *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, vol. 55, no. 1, pp. 81-88.
- (Hsieh et al. 2015) H. I. Hsieh, P. C. Lin & G. C. Hsieh 2015, "Design and implementation of the digitally-controlled active EMI filter (DSP-AEF) for noise reduction applications", *2015 IEEE 2nd International Future Energy Electronics Conference (IFEEC)*, pp. 1.
- (Ji et al. 2016) J. Ji, W. Chen & X. Yang 2016, "Design and precise modeling of a novel Digital Active EMI Filter", *2016 IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC)*, pp. 3115.
- (Roc'h et al. 2012) A. Roc'h & F. Leferink 2012, "Nanocrystalline Core Material for High-Performance Common Mode Inductors", *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, vol. 54, no. 4, pp. 785-791.

- (Scopus 2016) Scopus portaali 2016. Analyze search results: Active EMI filter [verkkotietokanta]. [viitattu 10.09.2016] Saatavissa: <https://www-scopus-com.ezproxy.cc.lut.fi/term/analyzer.uri?sid=CE5DA0A3733231C548026C1847716A57.wsnAw8kcdt7IPYLO0V48gA%3a30&origin=resultslist&src=s&s=TITLE-ABS-KEY%28%22Active+EMI+filter%22%29&sort=plf-f&sdt=b&sot=b&sl=34&count=52&analyzeResults=Analyze+results&txGid=CE5DA0A3733231C548026C1847716A57.wsnAw8kcdt7IPYLO0V48gA%3a8>
- (Shin et al. 2015) D. Shin, S. Kim, G. Jeong, J. Park, J. Park, K. J. Han & J. Kim 2015, "Analysis and Design Guide of Active EMI Filter in a Compact Package for Reduction of Common-Mode Conducted Emissions", *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, vol. 57, no. 4, pp. 660-671.
- (Son et al. 2006) Y. C. Son & Seung-Ki Sul 2006, "Generalization of active filters for EMI reduction and harmonics compensation", *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 42, no. 2, pp. 545-551.
- (Tarateeraseth 2012) V. Tarateeraseth 2012, "EMI filter design: Part III: Selection of filter topology for optimal performance", *IEEE Electromagnetic Compatibility Magazine*, vol. 1, no. 2, pp. 60-73.
- (TDK 2014) TKD 2014. LeaXield Active filter for leakage current minimization [verkkodokumentti]. [viitattu: 14.03.2017]. Saatavissa: <https://en.tdk.eu/download/1201166/453be09bb72a6806802999763db26bc2/presentation.pdf>
- (Yang et al. 2014) Y. Yang, X. Chang, W. Chen & X. Yang 2014, "Design of a differential mode active EMI filter based on conducted emission analysis used in DC/DC converter", *2014 XXXIth URSI General Assembly and Scientific Symposium (URSI GASS)*, pp. 1.
- (Yang et al. 2014) Y. Yang, X. Chang, W. Chen & X. Yang 2014, "Implementation of a MOSFET-based active differential mode EMI filter in DC/DC converter", *2014 International Power Electronics and Application Conference and Exposition*, pp. 1345.
- (Vicor 2017) Vicor Corporation 2017. Picor Quiet Power EMI Input Filter Modules. [verkkodokumentti]. [viitattu: 14.03.2017] Saatavissa: <http://www.vicorpower.com/dc-dc-filters/qpi>

- (Wang et al. 2010) S. Wang, Y. Y. Maillet, F. Wang, D. Boroyevich & R. Burgos 2010, "Investigation of Hybrid EMI Filters for Common-Mode EMI Suppression in a Motor Drive System", *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 25, no. 4, pp. 1034-1045.
- (Williams 2007) Williams, T. 2007. EMC for Product Designers, 4<sup>th</sup> Edition. Burlington: Elsevier Ltd..

## LIITTEET

### LIITE I: PICOR QuietPower QPI –tuoteperheen mallit taulukoituna.

Taulukon kolumnien symbolit:  $U$  jännite, ja  $I$  virta.

Malli	$U_{in}$ [V]	$I_n$ [A]
QPI-3LZ	10 - 40	7
QPI-3LZ-01	10 - 40	7
QPI-5LZ	10 - 40	14
QPI-5LZ-01	10 - 40	14
QPI-6LZ	30 - 80	14
QPI-6LZ-01	30 - 80	14
QPI-8LZ	36 - 76	6
QPI-8LZ-01	36 - 76	6
QPI-21LZ	30 - 80	14
QPI-21LZ-01	30 - 80	14
QPI-10LZ	32 - 76	6
QPI-10LZ-01	32 - 76	6
QPI-11LZ	5 - 50	7
QPI-11LZ-01	5 - 50	7
QPI-12LZ	5 - 80	7
QPI-12LZ-01	5 - 80	7
MQPI-18LP	5 - 50	7
MQPI-18LP-01	5 - 50	7