

Sähkön laadun ja jakelun luotettavuuden hallinta

State of art -selvitys

Raili Alanen & Hannu Hätönen



ISBN 951-38-6604-1 (URL: <http://www.vtt.fi/publications/index.jsp>)
ISSN 1459-7683 (URL: <http://www.vtt.fi/publications/index.jsp>)

Copyright © VTT 2006

JULKAISIJA – UTGIVARE – PUBLISHER

VTT, Vuorimiehentie 3, PL 1000, 02044 VTT
puh. vaihde 020 722 111, faksi 020 722 4374

VTT, Bergsmansvägen 3, PB 1000, 02044 VTT
tel. växel 020 722 111, fax 020 722 4374

VTT Technical Research Centre of Finland, Vuorimiehentie 3, P.O. Box 2000, FI-02044 VTT, Finland
phone internat. +358 20 722 111, fax + 358 20 722 4374

VTT, Biologinkuja 7, PL 1000, 02044 VTT
puh. vaihde 020 722 111, faksi 020 722 7026

VTT, Biologgränden 7, PB 1000, 02044 VTT
tel. växel 020 722 111, fax 020 722 7026

VTT Technical Research Centre of Finland, Biologinkuja 7, P.O. Box 1000, FI-02044 VTT, Finland
phone internat. +358 20 722 111, fax +358 20 722 7026

Tekijä(t) Alanen, Raili & Hätönen, Hannu		
Nimeke Sähkön laadun ja jakelun luotettavuuden hallinta State of art -selvitys		
Tiivistelmä Tämä tutkimus on osa projektia ”Keskikoon energiavarastojen hyödyntäminen hajautetussa sähkönjakelussa”. Tässä vuoden 2004 tutkimusosiossa tarkastellaan sähkön laatuun liittyviä kysymyksiä, laiteratkaisuja ja sähkön laadun hallintaan soveltuvia energiavarastoja pohjatyönä projektiin kuuluvan sähkönlaatuaseman konseptin määrittämistä varten. Sähkön laadun hallinta on tulossa maailmanlaajuisestikin katseltuna yhä tärkeämmäksi kysymykseksi sekä sähkön siirron että jakelun alueella. Sähkön laadun hallinta ja jakelun luotettavuus on myös nähty erääksi hajautetun energian jakelun kriittiseksi kohdaksi. Hajautetun tuotannon yhteydessä nähdään myös pienjännitejakelussa energiavarastoinnin ja sähkön laadun hallinnan laitteiden kasvava tarve. Sähkön laadun hallintaan liittyvinä laiteratkaisuina tehoelektronikan komponenttien käyttöön perustuvat ns. Flexible AC Transmission Systems (FACTS) -laitteet ovat viime aikoina tulleet kustannustehokkaaksi ja joustavaksi ratkaisuvaihtoehdoksi perinteisesti käytettyjen menetelmien rinnalle. Hajautetun jakelun myötä myös FACTS-laitteiden käyttöön ja kehitykseen liittyvä tutkimus on suuntautunut pienjännitepuolen sovelluksiin (vrt. Euroopan maiden 3-vuotinen yhteistyöprojekti DGFacts). FACTS-laitteissa hyödynnetään erityyppisiä energiavarastoja, jotka sekä parantavat että monipuolistavat laitteiden toimintaa. Tässä julkaisussa tehdään katsaus lähinnä Suomessa voimassa olevaan sähkön laadun ja jakelun luotettavuuden hallintaan liittyvään ohjeistukseen ja standardointiin. Julkaisussa tarkastellaan myös häiriökeskeytyksiin ja jännitekuoppiin liittyviä asioita (syyt, vaikutus, vaihtelu, kustannukset). Julkaisussa esitetään sähkön laadun hallinnan ja etenkin FACTS-laitteiden state of art -tarkastelu pääkohtina katkeamaton sähkön syöttö (UPS-laitteet), loistehon ja harmonisten yliaaltojen hallinnan laitteet ja ylijännitteiden, jännitekuoppien ja katkosten hallinnan laitteet. Lisäksi tarkastellaan sähkön laadun hallinnan laitteiden kustannuksia ja uusimpia laiteratkaisuja. Julkaisussa esitetään myös viimeisimmät kansainväliset tutkimustulokset energiavarastojen ominaisuuksista ja kustannuksista ja tarkastellaan sähkön laadun hallinnan laitteisiin liitettäviä potentiaalisia energianvarastointiratkaisuja, joista uusinta lupaavaa teknologiaa edustavat superkondensaattorit ja litiumakut.		
Avainsanat electric power, quality control, power distribution, Flexible AC Transmission Systems, reliability, supply voltage, failures, reactive power, energy storage, ripple voltage, voltage tips		
ISBN 951-38-6604-1 (URL: http://www.vtt.fi/publications/index.jsp)		
Avainnimeke ja ISSN VTT Working Papers 1459-7683 (URL: http://www.vtt.fi/publications/index.jsp)		Projektinumero 250-C4SU00459
Julkaisuaika Toukokuu 2006	Kieli Suomi	Sivuja 84 s.
Projektin nimi Keskikoon energiavarastojen hyödyntäminen hajautetussa sähkönjakelussa, ENVADE	Toimeksiantaja(t) Tekes, VTT, ABB Oy, Evox Rifa Group Oyj, Oy Finnish Electric Vehicle Technologies Ltd, Fortum Power and Heat Oy Generation, Merinova Oy Ab, Nokian Capacitors Oy, Powerware Oy, Powest Oy, Winwind Oy, Wärtsilä Finland Oy	
Yhteystiedot VTT PL 1000, 02044 VTT Puh. vaihde 020 722 111 Faksi 020 722 7026	Julkaisija VTT PL 1000, 02044 VTT Puh. 020 722 4404 Faksi 020 722 4374	

Alkusanat

Tämä työ kuuluu Tekesin DENSY-ohjelmaan projektiin ”Keskikoon energiavarastojen hyödyntäminen hajautetussa sähköjakelussa” (ENVADE). Tutkimusprojekti on pääosin Tekesin rahoittama, ja muita rahoittajia VTT:n lisäksi ovat ABB Oy, Evox Rifa Group Oyj, Oy Finnish Electric Vehicle Technologies Ltd, Fortum Power and Heat Oy Generation, Merinova Oy Ab, Nokian Capacitors Oy, Powerware Oy, Powest Oy, Winwind Oy ja Wärtsilä Finland Oy. Projekti sijoittuu ajanjaksolle 1.6.2004–31.12.2005. Projektin yksi päätavoitteista on ”sähkönlaatuaseman” konseptin kehittäminen. Tässä vuoden 2004 väliraportissa keskitytään sähkön laadun hallintaan lähinnä kirjallisuustutkimuksen puitteissa.

Sisällysluettelo

Alkusanat.....	4
Käytetyt lyhenteet.....	7
1. Johdanto: tausta ja liittymät	9
2. Sähkön laadun ja jakelun luotettavuuden hallintaan liittyviä määräyksiä, standardeja ja ohjeita	13
2.1 Sähkömarkkinalaki	13
2.2 Standardit.....	14
2.2.1 Jakelu- ja siirtoverkon taajuus.....	14
2.2.2 Jakelujännite.....	15
2.2.3 Signaalijännitteet.....	15
2.2.4 Harmoniset ja epäharmoniset jännitteen yliaallot	16
2.2.4.1 Yliaaltojen matemaattinen tarkastelu.....	16
2.2.4.2 Yliaaltojen kompensointi	17
2.2.4.3 Yliaalloille määritellyt standardit.....	17
2.2.4.4 Vaatimukset hajautetun tuotannon yliaalloille.....	18
2.2.5 Välkyntä eli toistuvat äkilliset jännitetasonvaihtelut	18
2.2.6 Jännitteen epäsymmetria	19
2.2.7 Transienttiyläjännitteet	19
2.2.7.1 Transienttijännitteille määritellyt standardit	20
2.2.8 Luotettavuus	20
2.2.8.1 Jännitekuopat	20
2.2.8.2 Keskeytykset	21
2.2.9 Custom Power -käsite	23
3. Sähkön jakelun luotettavuus	24
3.1 Häiriökeskeytykset	24
3.1.1 Häiriökeskeytysten syyt ja vikataajuus keskijänniteverkossa.....	28
3.1.2 Häiriökeskeytysten vuosittainen vaihtelu	30
3.1.3 Häiriökeskeytysten aikajakaumat keskijänniteverkossa maaseudulla ja taajamissa	30
3.1.4 Häiriökeskeytyksistä aiheutuvat kustannukset.....	32
3.2 Jännitekuopat.....	33
3.2.1 Jännitekuoppien synty ja vaikutusalue.....	33
3.2.2 Jännitekuoppien esiintyvyys ja luonne.....	35
3.2.3 Laitteiden herkkyys jännitekuopille.....	37
3.2.4 Jännitekuopista aiheutuvat kustannukset	40

4. Sähkön laadun ja jakelun luotettavuuden hallintalaitteet.....	42
4.1 Yleistä.....	42
4.2 Katkeamaton sähkönsyöttö, UPS	45
4.2.1 Yleistä	45
4.2.2 Suuret UPS-järjestelmät	47
4.2.3 Staattiset vaihtokytkimet.....	49
4.3 Loistehon ja harmonisten yliaaltojen hallinta.....	50
4.3.1 Yleistä	50
4.3.2 Kompensointilaitteita	51
4.3.2.1 Sarjakompensointilaitteet (MSSC, TSC, TCSC, SSSC).....	52
4.3.2.2 Rinnakkaiskompensointilaitteet (SVC, TSC, TCR, STATCOM, DSTATCOM)	52
4.3.3 Aktiivisuotimet.....	55
4.4 Jännitetason, ylijännitteiden, jännitekuoppien ja katkosten hallinta	56
4.5 Sähkön laadun hallinnan uudet laitekoneptit ja tehoelektroniikan komponenttikehitys	61
4.5.1 Laitteiden yhdistelmäkonseptit	61
4.5.2 Monitoimiset muunneltavat laitteet.....	63
4.5.3 SEN-muuntaja	64
4.5.4 Tehoelektroniikan komponenttien kehitys.....	65
4.6 Yhteenveto FACTS-laitteista	69
4.6.1 Ominaisuudet	69
4.6.2 Järjestelmävaikutukset	70
4.6.3 FACTS-laitteiden kustannukset	70
5. Energiavarastot ja FACTS-laitteet.....	72
6. Hajautetun jakelun sähkön laadun hallintaan liittyvä tutkimustyö	76
7. Yhteenveto	77
Lähdeluettelo	79

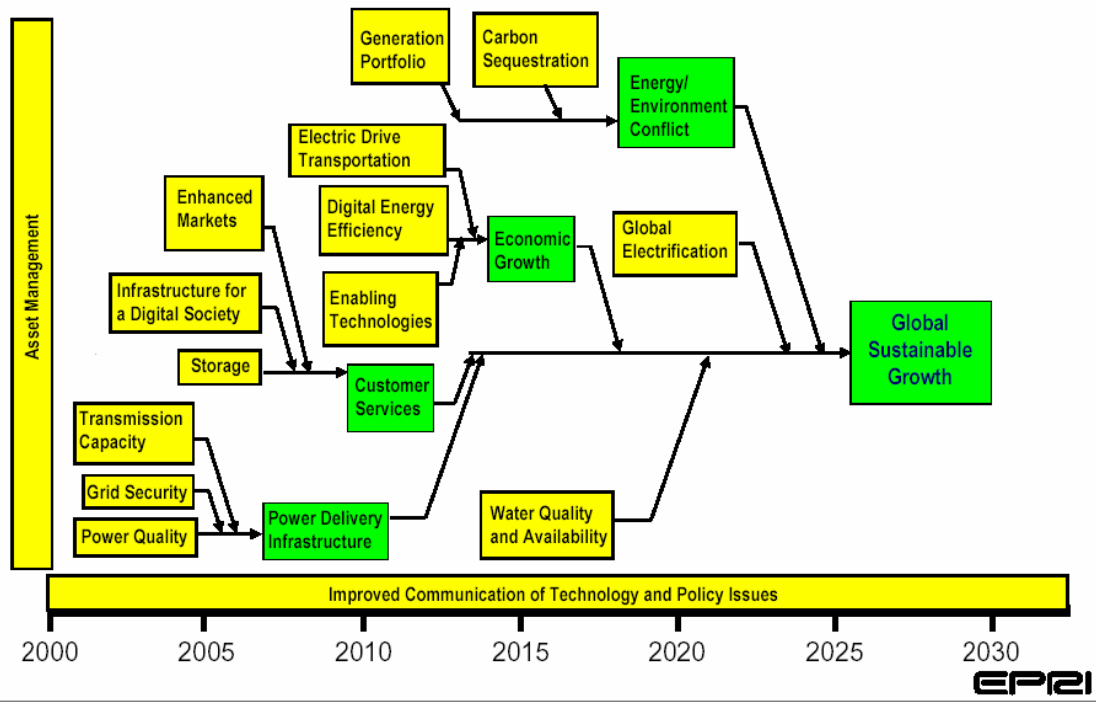
Käytetyt lyhenteet

AJK	Aikajälleenkytkentä
APF(TF)	Active power filter or tuned filter, aktiivisuodin
ASIPM	Application Epecific Intelligent Power Module, sovellusspesifinen älykäs tehomoduli
BESS	Battery, akusto
CAIDI	Customer Average Interruption Duration Index
CAS	Compressed Air Storage, paineilmavarasto
CENELEC	European Committee for Electrotechnical Standardization
CSC	Convertible Static Compensator, muuteltava staattinen kompensoattori
DGFACTS	Distribution Generation Flexible AC Transmission Systems, hajautetun jakelun joustavat AC-siirtojärjestelmät
DOE	Department of Energy (U.S.)
DSC	Dynamic Synchronous Condenser, dynaaminen tahtikompensoattori
DSC	Distribution Series Capacitor, sarjakondensaattori
DVR	Dynamic Voltage Restorer, dynaaminen jännitteen säätäjä
EPRI	Electric Power Research Institute
ETO	Emitter-turn-off
FACTS	Flexible AC Transmission Systems, joustavat AC-siirtojärjestelmät
FSC	Fixed Series Capacitor, kiinteä sarjakondensaattori
GaN	Galium Nitridi
GTO	Gate-Turn-Off-tyristori
IEC	International Electrotechnical Commission
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc
IGBT	Insulated Gate Bipolar Transistor
IGCT	Insulated Gate Commutated Thyristor
IPFC	Interline Power Flow Controller, kahden siirtolinjan välinen tehon hallintajärjestelmä
IPM	Intelligent Power Module, älykäs tehomoduli
Li	Litium
MDG	Multifunctional Dispersed Generation, monitoiminen hajautettu tuotanto
MOSFET	Metal-Oxide-Silicon-Field-Effect-Transistor
NaS	Natriumsulfidi
NiCd	Nikkeli-kadmium
NiMH	Nikkeli-metallihydridi
PCS	Power conditioning system, verkkoonliitäntäyksikkö
PFCC	Power factor correction capacitor, tehokerrointa korjaava kondensaattori
PJK	Pikajälleenkytkentä

PLC	Programmable Logic Controller
RBIGBT	Reverse blocking IGBT, taaksepäin estävä IGBT
RCIGBT	Reverse conducting IGBT, taaksepäin johtava IGBT
rms	Root mean square, virran tai jännitteen tehollisarvo
SA	Surge arrester, ylijännitesuoja
SAIDI	System Average Interruption Duration Index
SAIFI	System Average Interruption Frequency Index
SETC	Static electronic tap changer, staattinen sähköinen käämikytin
Si	Pii
SiC	Piikarbidi
SMES	Superconducting magnetic energy storage, suprajohtava magneettisen energian varasto
SSCB	Solid-state circuit-breaker, elektroninen katkaisija
SSTS	Solid-state transfer switch, elektroninen vaihtokytkin
STATCOM	Static synchronous compensator, staattinen tahtikompensaattori
SVC	Static var compensator, staattinen loistehon kompensaattori
THD	Total Harmonic Distortion
TSC	Thyristor switched capacitor, tyristorikytketty kondensaattori
UPFC	Unified Power Flow Controller, yleinen tehon hallintalaite
UPLC	Universal Power Line Conditioner, yleinen sähkön laadun ja tehon hallintalaite
UPQC	Unified Power Quality Conditioner, yhdistetty sähkön laadun hallintalaite
UPS	Uninterruptible Power Supply, keskeytymätön sähkönsyöttöjärjestelmä
ZnBr ₂	Sinkki-bromidi

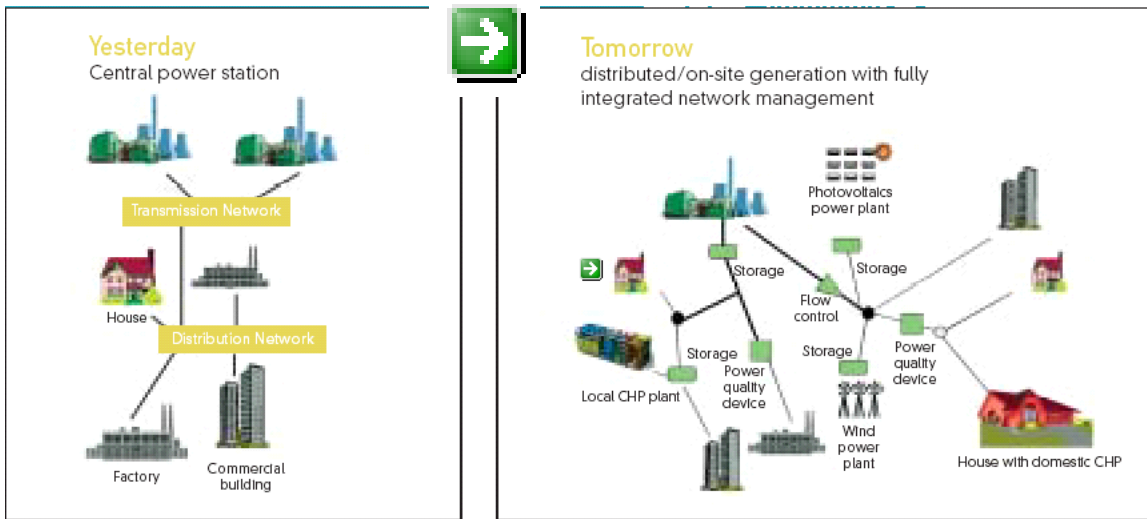
1. Johdanto: tausta ja liittymät

Sähkön laadun hallinta on tulossa maailmanlaajuisestikin katseltuna yhä tärkeämmäksi kysymykseksi sekä sähkön siirron että jakelun alueella. Sähkön laadun hallinta ja jakelun luotettavuus on myös nähty erääksi hajautetun energian jakelun kriittiseksi kohdaksi. Mm. EPRIn laatimaan sähkön jakelun teknologian roadmapin ensimmäisiin tehtäviin kuuluvat sekä sähkön laadun hallinnan että varastoinnin teknologiat (ks. kuva 1-1).



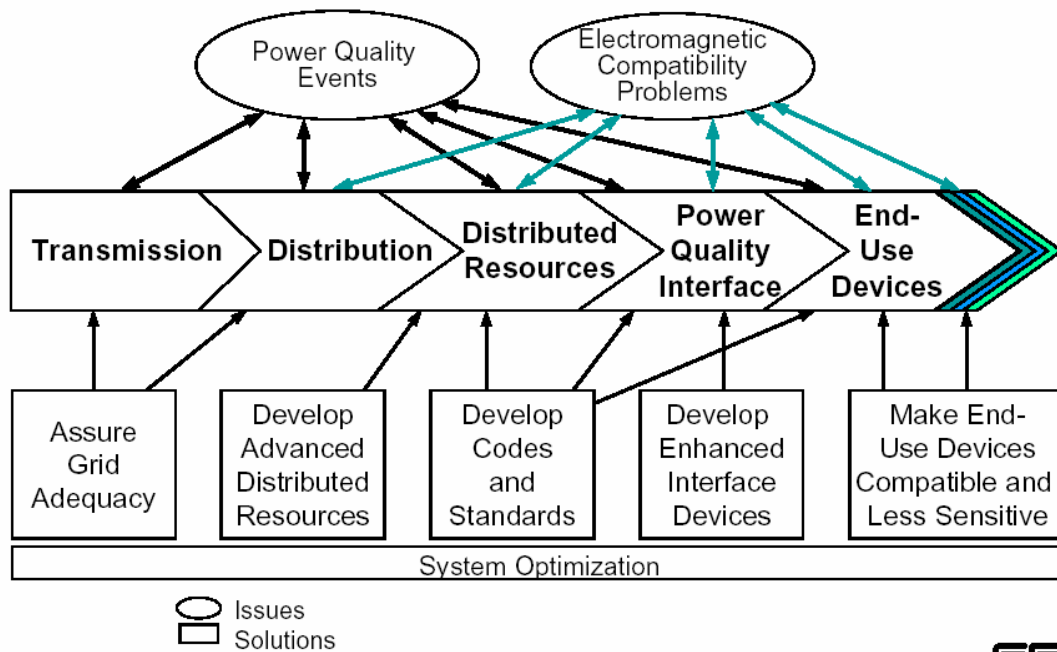
Kuva 1-1. EPRIn laatima sähkön jakelun teknologian roadmap vuosille 2000–2030. [44]

Sähkön laadun ja jakelun luotettavuuden hallinnan pääkohteita ovat jännitteen stabiiliisuuden, jännitteen aaltomuodon ja sähkönjakelun jatkuvuuden turvaaminen. Sähkön jakelun jatkuvuuden hallinta edellyttää suuria energiavarastoja ja/tai generaattoria, kun taas jännittestabiiliisuuden ja jännitteen aaltomuodon hallintaa voidaan parantaa suhteellisen pienenkin energiavaraston avulla. Energiavarastot ovat olleet jo keskitetyinkin jakelun sähkön laadun ja jakelun luotettavuuden hallintalaitteiden eräänä keskeisenä elementtinä, kuten kondensaattorit loistehon hallinnassa ja akut keskeytymättömän sähkönsyötön (Uninterruptible Power Systems, UPS) laitteissa. Hajautetun tuotannon yhteydessä nähdään myös pienjännitejakelussa energiavarastoinnin ja sähkön laadun hallinnan laitteiden kasvava tarve, kuten on visioitu Euroopan komission tuottamassa ”New ERA for electricity in Europe” -dokumentissa (ks. kuva 1-2).



Kuva 1-2. Visio sähkön jakelun kehittämisestä keskitetystä tuotannosta energianvarastointia laajassa mittakaavassa hyödyntävään hajautettuun tuotantoon. [Lähde: [European Commission: New ERA for electricity in Europe.](#)]

Myös EPRIn näkemyksessä uuden vuosituhatosen ”Digital Society” -teemaan liittyvästä infrastruktuurista korostuvat koko sähköjaketijussa näkyvä sähkön laadun hallinta ja sähkön laadun hallinnan liitynnät loppukäyttäjän päässä sekä parannustarpeet kuluttajan laite tasolla (kuva 1-3).



Kuva 1-3. EPRIn näkemys uuden vuosituhatosen ”Digital Society” -infrastruktuurista. [44]

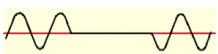
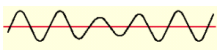
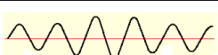
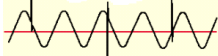
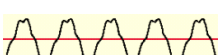
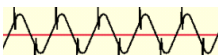
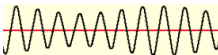
Perinteinen lähtökohta sähkön laadun ja jakelun luotettavuuden parantamiseksi on ollut verkon tai tuotannon kapasiteetin nostaminen. Uusien verkkojen tai sähköasemien rakentaminen on kuitenkin hidasta ja kallista, ja siksi tehoelektronikan komponenttien käyttöön perustuvat ns. Flexible AC Transmission Systems (FACTS) -laitteet ovatkin viime aikoina tulleet kustannustehokkaaksi ja joustavaksi ratkaisuvaihtoehdoksi sähkön laadun hallinnan alueella. FACTS-teknologia maksimoi siirrettävän tehon ja lisää [EPRI](#)n mukaan linjan tehonsiirtokykyä jopa 30 %. Ensimmäiset FACTS-laitteet otettiin käyttöön yli 20 vuotta sitten. Näitä tuotteita on sovellettu etupäässä suur- ja keskijänniteverkon alueella. Kriittisten ja herkkien kuormien sijoittuminen hajautetusti heikon verkon alueelle ja myös hajautettu energian tuotanto toimivat ajavana voimana FACTS-laitteiden sijoittamisessa jakeluverkon alueelle lähelle kulutuskohteita. Tällöin näiden laitteiden käyttö myös pienjänniteverkossa tulee lisääntymään. FACTS-laitteissa hyödynnetään erityyppisiä energiavarastoja, jotka sekä parantavat että monipuolistavat laitteiden toimintaa. FACTS-laitteita käytetään myös tietokoneiden yhteydessä ja esimerkiksi teräksen valmistuslaitoksissa jännitteen välkynnän estoon. Jännitteen hallinta rautatieverkossa ja tutkimuskeskuksissa (esimerkiksi CERN Genevessä) ovat olleet FACTS-laitteiden sovelluskohteina.

Hajautetun jakelun myötä FACTS-laitteiden käyttöön ja kehitykseen liittyvä tutkimus on suuntautunut myös pienjännitepuolen sovelluksiin. Euroopan maiden 3-vuotinen yhteistyöprojekti DGFACTS ("Improvement of the quality of supply in Distributed Generation networks through the integrated application of power electronic techniques") alkoi tammikuussa 2003. Projekti on yksi osa "Integration of RES + DG" -projektikokonaisuutta. Projektin tavoitteena on aikaisempaa kokemusta hyödyntäen ja uusia FACTS-laitteita kehittämällä ratkaista sähkön laadun hallintaan liittyviä ongelmia, jotka syntyvät liitettäessä hajautettua tuotantoa sähköverkkoon. Kyseessä ovat silloin lähinnä pienjänniteverkkoon liitettävät sähkön laadun hallintaa tukevat laiteratkaisut.

Sähkön laadun ja jakelun luotettavuuden hallinnan keskeisimmät kohteet

Sähkön laadun hallinnan keskeisimmät kohteet ovat ylijännitteen, harmonisten aaltojen, jännitteen vaihtelun, jännite-epätasapainon ja transienttien hallinta. Sähkön laatuun liittyvät tyypillisimmät ongelmat ja niiden mahdolliset syyt esitetään taulukossa 1-1.

Taulukko 1-1. Sähkönjakelun luotettavuuteen ja laatuun liittyvät keskeisimmät ongelmat ja niiden syyt.

Häiriötyyppi	Kuvaus	Mahdolliset syyt
Sähkön jakelun katkos (> 1min)		Huoltotoimet, linjaviat, onnettomuudet, sää, tuuli, salamät, jää
Pitkäaikainen ylijännite		Pieni kuormitus, huono säätö
Pitkäaikainen alijännite		Raskas kuorma, voimakkaat kuormitushuiput, ei loistehonsäätöä, huono tehokerroin
Hetkelliset katkokset		Katkaisijoiden laukeaminen, vian selvitystilanne, syötön vaihto
Jännitekuopat		Suurien kuormien kytkentä, hetkelliset viat, katkaisijoiden toiminta, induktiiviset kuormat
Hetkelliset ylijännitteet		Piirin kapasitanssi, suurten kuormien poiskytkentä, vaihevika
Transienttijännitteet		Valaistus, kapasitiivien kytkentä, virtasuojan laukeaminen, epälineaariset kuormat, häiriöt
Harmoniset virran yliaallot		Epälineaariset komponentit, korkeataajuiset kytkennät, TV, tietokoneet, valaistus, huono tehokerroin, laitteiden aiheuttama signaalihäiriö
Jaksolliset häiriöt (t < 0,5 sykliä)		Tehoelektroniikkalaitteet
Välkyntä		Eritaajuinen jännitteen vaihtelu, valaistus, loistehon vaihtelu
Jännite-epätasapaino		Epätasainen kuormitus, kompensointikondensaattorit, moottorit

Tässä tutkimusprojektissa (ENVADE) tarkastellaan lähinnä hajautetun energian tuotannon ja jakelun alueen näkökulmasta sähkön laadun ja jakelun luotettavuuden ongelmia ja ratkaisuja, joten tarkastelualue käsittää etupäässä pienjänniteverkkoon tulevia ratkaisuja. Koska kuitenkin sähkön laatuun ja jakelun luotettavuuteen liittyvät ilmiöiden ja ratkaisujen lähtökohdat ovat pääpiirteittäin yhteneväisiä koko sähkön siirto- ja jakeluverkossa, tarkastellaan seuraavassa asiaa myös laajemmasta näkökulmasta.

2. Sähkön laadun ja jakelun luotettavuuden hallintaan liittyviä määräyksiä, standardeja ja ohjeita

Suomessa sähkön jakelun luotettavuudesta ja sähkön laadusta vastaa lähinnä verkkoyhtiö. Jakeluverkkotoiminta on luvanvaraista. Suomessa jakeluverkkotoiminnasta vastaa n. 100 sähköverkkoluvan saanutta yhtiötä. Kuluttaja voi valita sähkönmyyntiyhtiön mutta ei voi valita verkkoyhtiötä. Jakeluverkkotoimintaa säätelee sähkömarkkinalaki. Vuonna 1995 voimaan tullessa ja sittemmin useaan kertaan täydennetyssä sähkömarkkinalaissa käsitellään sähkön laatua yleisellä tasolla.

2.1 Sähkömarkkinalaki

Sähkömarkkinalain ensimmäisen luvun ensimmäisessä momentissa määritellään lain tarkoituksesta mm. seuraavaa:

Tämän lain tarkoituksena on varmistaa edellytykset tehokkaasti toimiville sähkömarkkinoille siten, että kohtuuhintaisen ja riittävän hyvälaatuisen sähkön saanti voidaan turvata...

Sähkön laatuun liittyviä asioita käsitellään tarkemmin pykälässä 27. Kohdassa 27 c mainitaan:

Sähkön toimitus on virheellinen, jos sähkön laatu tai toimitustapa ei vastaa sitä, mitä voidaan katsoa sovittun. Jollei toisin ole sovittu, sähkön toimitus on virheellinen, jos sähkö ei laadultaan vastaa Suomessa noudatettavia standardeja tai jos sähkön toimitus on yhtäjaksoisesti tai toistuvasti keskeytynyt eikä keskeytystä voida pitää keskeytyksen syy ja olosuhteet huomioon ottaen vähäisenä.

1.9.2003 tuli voimaan vakiokorvausmenettelyä koskeva sähkömarkkinalain muutos. Kohdassa 27 f [5] käsitellään virheellisestä toimituksesta maksettavia korvauksia.

Vakiokorvauksen määrä on sähkönkäyttäjän vuotuisesta verkkopalvelumaksusta: 1) 10 prosenttia, kun keskeytysaika on ollut vähintään 12 tuntia mutta vähemmän kuin 24 tuntia; 2) 25 prosenttia, kun keskeytysaika on ollut vähintään 24 tuntia mutta vähemmän kuin 72 tuntia; 3) 50 prosenttia, kun keskeytysaika on ollut vähintään 72 tuntia mutta vähemmän kuin 120 tuntia; sekä 4) 100 prosenttia, kun keskeytysaika on ollut vähintään 120 tuntia. Vakiokorvauksen enimmäismäärä verkkopalvelun keskeytymisen johdosta on kuitenkin 700 euroa sähkönkäyttäjää kohti.

Kahden vuoden ajan lain voimaan tulosta sovellettava vakiokorvauksen enimmäismäärä on 350 euroa.

2.2 Standardit

Sähkön laatua käsittelevissä standardeissa IEC (1000-2-2/4) ja CENELEC (EN50160) määrittellään jakelujännitteen ominaisuuksia normaaliolosuhteissa. Sähkön laatustandardissa SFS-EN 50160 määrittellään jakelujännitteen ominaisuudet sekä pienjänniteverkolle (alle 1 000 V) että keskijänniteverkolle (1–35 kV). Sähkön laatuun liittyvän standardoinnin kehitystyötä tehdään myös eri standardointiorganisaatioiden työryhmissä ja komiteoissa [40].

Hajautettuun energiantuotantoon ei ole erillistä standardia, ja periaatteessa samat standardit pätevät myös niille. Sener on kuitenkin antanut ohjeen, jonka mukaan SFS-EN 50160 -standardia ei tule käyttää hajautetun energiantuotannon suunnitteluun, vaan suunnittelun on täytettävä tiukemmat laatuvaatimukset [2].

Sähkön laatua käsitellään Senerin suosituksessa ”Jakeluverkon sähkön laadun arviointi” [7]. SFS-EN 50160 [6] määrittelee konkreettisia raja-arvoja jännitteen ominaisuuksista taajuudelle, jänniterajoille, yliaaltopitoisuuksille (harmoniset), nopeille jännitemuutoksille, epäsymmetrialle (jännitteen vastakomponentille) sekä ohjausjännitetasoille. Standardissa ei anneta raja-arvoja jännitettä koskeville laatusuureille, kuten tasajännitekomponentille, epäharmonisille yliaalloille, epäsymmetrian nollakomponentille, jännitekuopille, keskeytyksille (lyhyet/pitkät) tai ylijännitteille.

2.2.1 Jakelu- ja siirtoverkon taajuus

Suomessa kaikkien sähköverkkojen perustaajuus on 50 Hz. Taajuuden mittaus suoritetaan 10 sekunnin keskiarvoina viikon ajan. Standardin SFS-EN 50160 mukaan 99,5 % mittausarvoista tulee olla välillä 50 Hz ± 1 % (ks. taulukko 2-1). Hyvässä ja normaalissa laadussa kaikkien mittausarvojen tulee Senerin ohjeiden mukaan olla tällä em. välillä. Erillisverkoissa sallitaan suurempi taajuuspoikkeama.

Taulukko 2-1. Taajuuden laatukriteerit. [6, 21]

Jännitteen ominaisuus	Hyvä laatu (Sener)	Normaali laatu (Sener)	SFS-EN 50160:n mukainen laatu
Taajuus	50 Hz ± 1 %	50 Hz ± 1 %	99,5 % välillä 50 Hz ± 1 % kaikki välillä 50 Hz + 4 % / -6 %
Taajuus (erillisverkoissa)			95 % välillä 50 Hz ± 2 % kaikki välillä 50 Hz ± 15 %

2.2.2 Jakelujännite

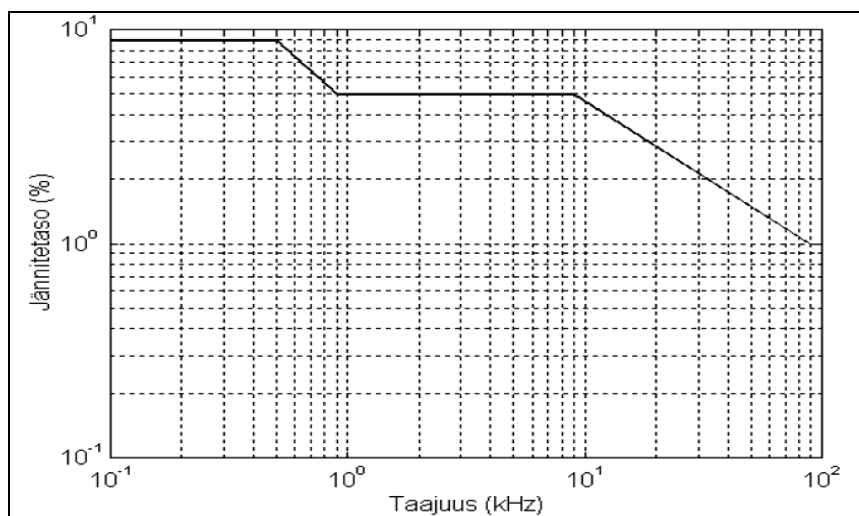
Suomessa pienjakelujännitteeksi on määritelty standardin SFS-EN 50160 mukaan vaihejohtimen ja nollajohtimen välillä 230 V. Laatumittaukset suoritetaan tehollisarvoina kymmenen minuutin keskiarvoista. Standardin mukaan 95 % arvoista tulee olla välillä $230 \text{ V} \pm 10 \%$. Lisäksi kaikkien arvojen tulee olla välillä $230 \text{ V} +10 \% / -15 \%$. Hyvän ja normaalin laadun jännitevaatimukset ovat oleellisesti suuremmat. Arvot on koottu taulukkoon 2-2. Mittausajanjaksona on yksi viikko, ja mittaus suoritetaan normaaleissa käyttöolosuhteissa, jolloin keskeytyksiä ei esiinny.

Taulukko 2-2. Jännitteen laatuksiteerit pienjännitteelle [6, 21].

Jännitteen ominaisuus	Hyvä laatu (Sener)	Normaali laatu (Sener)	SFS-EN 50160:n mukainen laatu
Jännitetason vaihtelu (pj-verkko, $U_n=230 \text{ V}$)	$U_n \pm 4 \%$ ja keskiarvo $U_n \pm 2,5 \%$	$U_n +6 / -10 \%$	95 % välillä $U_n \pm 10 \%$ kaikki välillä $U_n \pm 10 / -15 \%$

2.2.3 Signaalijännitteet

Signaalijännitteillä tarkoitetaan verkon sisällä kulkevien signaalien voimakkuutta. Niitä käytetään pienjänniteverkoissa tariffien ja kytkentätilanteiden ohjaukseen sekä erilaisten verkon komponenttien kauko-ohjaukseen. SFS-EN 50160 määrittelee signaalijännitteiden kolmen sekunnin keskiarvoille raja-arvot (ks. kuva 2-1). Normaalisti signaalijännitteinä käytetyt taajuudet ovat noin 1 kHz, jonka sallittu jännitetaso on standardin mukaan 4 % nimellisestä jännitteestä.



Kuva 2-1. Yleisessä jakeluverkossa signaalijännitteiden sallitut maksimiarvot prosentina nimellisjännitteestä [6, 21].

2.2.4 Harmoniset ja epäharmoniset jännitteen yliaallot

Yliaaltoja on sekä harmonisia että epäharmonisia. Harmoniset yliaallot ovat perustaa-juuden kerrannaisia. Ne summautuvat verkkotaajuuden päälle ja aiheuttavat ylimääräisiä häviöitä laitteissa. Harmonisia yliaaltoja muodostuu epälineaarisissa kuormissa, joiden ottama virta ei ole sinimuotoista. Tällöin säröytynyt virta aiheuttaa verkon yliaaltoimpedanssissa myös jännitteen säröytymisen. Yliaaltoja aiheuttavia laitteita ovat esimerkiksi tasasuuntaajat, taajuusmuuttajat, tyristoriohjatut kuormat, syklokonvertterit, UPS-laitteet, valokaariuunit, muuntajat, sähkösuodattimet, purkaus- ja loistelamput ja ATK-laitteet [24]. Tehoelektronikan komponenttien kasvun myötä yliaallot ovat nykypäivänä kasvava ongelma.

Epäharmonisia yliaaltoja syntyy erittäin epälineaarisissa laitteissa, joiden ottama virta vaihtelee jännitejaksoista riippumattomasti. Ne eivät ole perustaaajuuden kerrannaisia. Summautuessaan verkkotaajuuden päälle ne aiheuttavat verkkotaajuuden sinimuotoon joko alle tai yli 50 Hz:n jaksollista vaihtelua. Epäharmoniset yliaallot ovat kuitenkin hyvin harvinaisia eivätkä aiheuta mainittavia ongelmia nykypäivän verkossa.

2.2.4.1 Yliaaltojen matemaattinen tarkastelu

Kaikki jaksolliset funktiot pystytään esittämään yhden tai useamman sinifunktion summana Fourier-analyysin avulla (1). Tuloksena saadaan jännitteen yhtälö, jonka komponenttien kertoimet antavat ko. taajuuskomponentin pitoisuuden. Kokonaissignaalin tehollisarvoon suhteutettua tiettyä taajuuden pitoisuutta kutsutaan särökertoimeksi. Taajuuskomponentteihinsa muutettua signaalia sanotaan myös spektriksi. Signaalin määrittäville integroituvalla funktiolla f määritellään sen Fourier-muunnos [21].

$$F(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} f(t)e^{-j\omega t} dt, \text{ missä} \quad (1)$$

f on alkuperäinen signaali aikatasossa

ω on kulmataajuus

F on Fourier-muunnettu signaali taajuustasossa.

Signaalin kokonaissärökerroin (THD, Total Harmonic Distortion) kertoo perusaaltoa suurempien taajuuksien kokonaismäärän (2), ja se lasketaan neliösummana suhteellista yliaalloista eli särökertoimista.

$$THD = \sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} \left(\frac{F_n}{F}\right)^2}, \text{ missä} \quad (2)$$

F_n on n :nneen yliaallon komponentti

F on signaalin perustaaajuuden tehollisarvo.

2.2.4.2 Yliaaltojen kompensointi

Yliaaltojen torjuntaan käytetään kompensointiparistoja. Niitä on olemassa sekä passiivisia että aktiivisia, ja ne kytketään tyypillisesti rinnan kuorman kanssa. Paras tulos saadaan, kun kompensointi viedään mahdollisimman lähelle yliaaltolähdettä, jolloin yliaaltovirrat eivät kulje verkossa pitkiä matkoja. Passiivinen kompensointi koostuu normaalisti portaittain säädettävästä kompensointiparistosta, joka viritetään asennettaessa halutulle taajuudelle. Se muodostaa verkon impedanssin kanssa tietylle taajuudelle hyvin pienen impedanssin, joka poistaa ko. taajuuden. Aktiivinen kompensointi syöttää verkkoon samoja yliaaltoja, joita siellä on, mutta vastakkaisvaiheisena. Tällöin yliaallot kumoutuvat ja summajännitteestä muodostuu perustaaajuinen sinifunktio. Aktiivisessa kompensoinnissa on hyvänä puolena sen muuntuvuus verkon eri tilanteisiin. Aktiivinen kompensointi pystyy kompensoimaan myös epäharmonisia yliaaltoja toisin kuin passiivinen kompensointi. [21]

2.2.4.3 Yliaalloille määritellyt standardit

Standardi SFS-EN 50160 määrittelee harmonisille yliaaltojännitteille tietyt raja-arvot. Kokonaissärökertoimen raja-arvot esitetään taulukossa 2-3. Hyvässä ja normaalissa laadussa yksittäisten särökertoimien tulee olla taulukossa 2-4 esitettyjen rajojen alapuolella. Standardilaadussa riittää, kun 95 % yliaaltojännitteistä on ko. rajojen alapuolella.

Taulukko 2-3. Harmonisten yliaaltojännitteiden arvot liittymiskohdassa järjestyslukuun 25 saakka prosentteina nimellisjännitteestä [6, 21].

Parittomat yliaallot				Parilliset yliaallot	
Kolmella jaottomat		Kolmella jaolliset		järjestysluku n	suhteellinen jännite
järjestysluku n	suhteellinen jännite	järjestysluku n	suhteellinen jännite		
5	6 %	3	5 %	2	2 %
7	5 %	9	1,5 %	4	1 %
11	3,5 %	15	0,5 %	6–24	0,5 %
13	3 %	21	0,5 %		
17	2 %				
19	1,5 %				
23	1,5 %				
25	1,5 %				

Taulukko 2-4. Harmonisten yliaaltojännitteiden laatuksiteerit [6, 21].

Jännitteen ominaisuus	Hyvä laatu (Sener)	Normaali laatu (Sener)	SFS-EN 50160:n mukainen laatu
Harmoniset yliaaltojännitteet	$U_{nSh} \leq$ Taulukko 2-3 arvot ja THD $\leq 3\%$	$U_{nSh} \leq$ Taulukko 2-3 arvot ja THD $\leq 6\%$	95 % $U_{nSh} \leq$ Taulukko 2-3 arvot ja THD $\leq 8\%$

2.2.4.4 Vaatimukset hajautetun tuotannon yliaalloille

Hajautetulle tuotannolle on standardissa määritelty hieman tiukemmat yliaaltoarajat kuin tavalliselle jakeluverkolle (ks. taulukko 2-5).

Taulukko 2-5. Hajautetulle tuotannolle sallitut yliaaltovirtapitoisuudet (THD $\leq 5\%$). [26]

Yliaallon järjestysluku	Parittomien yliaaltovirtojen I_{odd} osuus referenssivirrasta I_R .	Parillisten yliaaltovirtojen I_{even} osuus referenssivirrasta I_R .
$h < 11$	4,0 %	1,0 %
$11 \leq h < 17$	2,0 %	0,5 %
$17 \leq h < 23$	1,5 %	0,4 %
$23 \leq h < 35$	0,6 %	0,2 %
$35 \leq h < 50$	0,3 %	0,1 %

2.2.5 Välkyntä eli toistuvat äkilliset jännitetasovaihtelut

Nopeat jännitemuutokset ovat alle 10 %:n muutoksia nimellisjännitteestä (suurempia jännitteen alenemia kutsutaan jännitekuopiksi). Ne aiheutuvat yleensä nopeista kuormituksen tai tuotannon muutoksista tai verkossa tapahtuvista kytkennöistä. Toistuvia nopeita jännitemuutoksia kutsutaan välkyntäksi (engl. flicker). Ne voidaan havaita mm. valaistuksen vilkkumisena, ja ne voivat myös aiheuttaa ongelmia herkille kuormille. Häiritsevyys riippuu esiintymistiheydestä, jännitevaihtelun suuruudesta sekä kestoajasta. Välkyntän mittaamiseksi on kehitetty välkyntämittareita, jotka antavat mittaustuloksena kymmenen minuutin mittausjaksolle lyhytaikaisen häiritsevyyssindeksin (P_{st}), jonka avulla voidaan laskea pitkäaikainen häiritsevyyssindeksi (P_{lt}). [21]

$$P_{lt} = \left[\sum_{i=1}^{12} \frac{P_{sti}^3}{12} \right]^{1/3} \quad (3)$$

SFS-EN 50160 -standardin mukaan normaaleissa käyttötilanteissa 95 % ajasta pitkäaikaisen häiritsevyysindeksin tulee olla $P_{lt} \leq 1$. Senerin asettaman normaalin laadun mukaan tulee aina olla $P_{lt} \leq 1$. Hyvässä laadussa tulee aina olla $P_{lt} \leq 0,74$ ja päivän kolmanneksi korkein lyhytaikainen häiritsevyysindeksi korkeintaan yksi. Arvot esitetään kootusti taulukossa 2-6.

Taulukko 2-6. Nopeiden jännitemuutosten laatuksiteerit [6, 21].

Jännitteen ominaisuus	Hyvä laatu (Sener)	Normaali laatu (Sener)	SFS-EN 50160:n mukainen laatu
Nopeat jännitemuutokset (pj- ja kj-verkoissa)	$P_{st,3 \max} \leq 1$ ja $P_{lt, \max} \leq 0,74$	$P_{lt, \max} \leq 1$	95 % ajasta $P_{lt} \leq 1$

2.2.6 Jännitteen epäsymmetria

Standardin SFS-EN 50160 mukaan 95 % jakelujännitteen vastakomponentin 10 minuutin tehollisarvoista tulee olla alle 2 % myötäkomponentista. Senerin ohjeissa hyväksi ja normaalilaaduksi määritellään tilanne, jossa kaikki vastakomponentit ovat korkeintaan 2 % [26]. Jännitteen epäsymmetria määritellään seuraavasti [21]:

$$u_n = \sqrt{\frac{1 - \sqrt{3 - 6\beta}}{1 + \sqrt{3 - 6\beta}}}, \text{ missä} \quad (4)$$

$$\beta = \frac{U_{12}^4 + U_{23}^4 + U_{31}^4}{(U_{12}^2 + U_{23}^2 + U_{31}^2)^2}$$

u_{nsh} = näytteistä laskettu 10 minuutin arvo

u_n = epäsymmetria

β = jännitekerroin

U_{12} = jännite vaiheiden L1 ja L2 välillä

U_{23} = jännite vaiheiden L2 ja L3 välillä

U_{31} = jännite vaiheiden L3 ja L1 välillä.

2.2.7 Transienttiylijännitteet

Transienttiylijännitteet eli äkilliset, lyhytaikaiset ylijännitteet johtuvat ukkosen aiheuttamasta salamasyöksystä tai suurien kuormien kytkennästä. Ne voivat aiheuttaa suojaamattomassa verkossa suuria tuhoja kuluttajien laitteissa. Ratkaisevana tekijänä ovat ylijännitteen amplitudi ja nousuaika.

2.2.7.1 Transienttilyjännitteille määritellyt standardit

Transienttilyjännitteistä ei ole varsinaista standardia. Indikointiarvona on kuitenkin annettu SFS-EN 50160 -standardissa seuraavaa.

Transienttilyjännitteiden huippuarvo ei tavallisesti ylitä arvoa 6 kV, mutta joskus esiintyy suurempiakin arvoja. Niiden nousuaika vaihtelee laajasti millisekunneista paljon alle mikrosekunnin.

2.2.8 Luotettavuus

Standardi SFS-EN 50160 ei määrittele konkreettisia raja-arvoja sähkön jakelun luotettavuuteen liittyville ilmiöille, kuten jännitekuopille ja keskeytyksille. Standardissa on kuitenkin esitetty joitakin määrittelyjä ja indikaatiivisia arvoja ao. ilmiöille. Standardissa IEEE 1159 luokitellaan katkokset, kuopat ja ylijännitteet. Standardissa IEEE 1366-2001 määritellään verkon sähköntoimitusvarmuutta kuvaavia tunnuslukuja.

2.2.8.1 Jännitekuopat

Standardissa SFS-EN 50160 ”Yleisen jakeluverkon jakelujännitteen ominaisuudet” jännitekuoppa määritellään seuraavasti:

Jakelujännitteen äkillinen aleneminen välille 1–90 % U_c ja jännitteen palautuminen lyhyen ajan kuluttua. Jännitekuopan kesto on tavallisesti 10 millisekunnaista 1 minuuttiin. Jännitekuopan suuruus määritellään vertaamalla jännitteen alinta tehollisarvoa sopimuksen mukaiseen jakelujännitteeseen. Jännitemuutoksia, joiden vuoksi jännite ei laske alle 90 % U_c , ei lueta jännitekuopiksi. (U_c on sopimuksen mukainen jännite.)

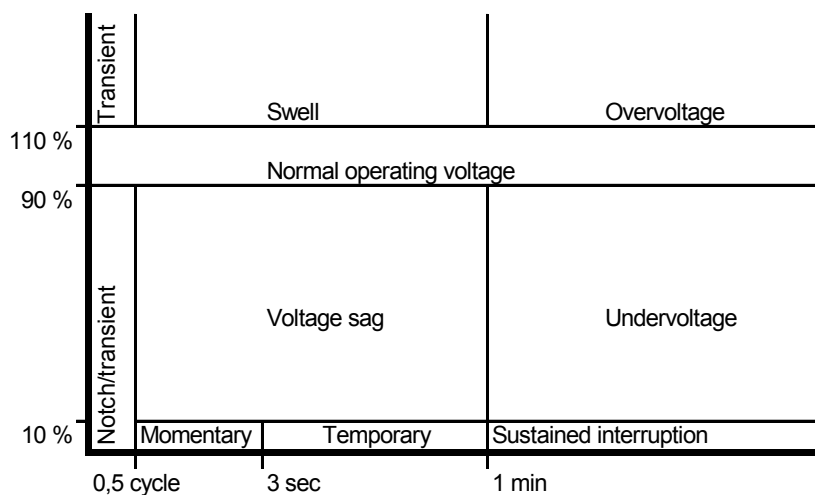
Standardissa annetaan indikaatiiviset arvot jännitekuoppien määrälle ja suuruudelle:

Normaaleissa käyttöolosuhteissa jännitekuoppien odotettavissa oleva määrä vuoden aikana voi olla muutamista kymmenistä tuhanteen. Suurin osa jännitekuopista on kestoltaan alle 1 sekunti ja niiden suuruus on alle 60 %. Suurempia ja pidempiä jännitekuoppia voi kuitenkin silloin tällöin esiintyä. Joillakin alueilla jännitekuoppia suuruudeltaan 10–15 % U_n voi asiakkaan asennuksissa tapahtuvien kytkentöjen johdosta esiintyä hyvinkin usein. U_n on järjestelmän nimellisjännite. [2, 6, 7, 9]

IEEE 1159 -dokumentissa luokitellaan katkokset, kuopat ja ylijännitteet hetkellisiin (instantaneous), lyhytaikaisiin (momentary) ja tilapäisiin (temporary) (taulukko 2-7 ja kuva 2-2).

Taulukko 2-7. IEEE 1159:n luokittelu katkoksille, kuopille ja ylijännitteille.

Luokka	Tyyppi	Tyypillinen kesto	Tyypillinen suuruus xU_n
Hetkellinen	Kuoppa (sag/dip)	0,5–30 sykliä	0,1–0,9
	Ylijännite (swell)	0,5–30 sykliä	1,1–1,8
Lyhytaikainen	Katkos	0,5–3 sekuntia	< 0,1
	Kuoppa	0,5–3 sekuntia	0,1–0,9
	Ylijännite	0,5–3 sekuntia	1,1–1,8
Tilapäinen	Katkos	3 s–1 min	< 0,1
	Kuoppa	3 s–1 min	0,1–0,9
	Ylijännite	3 s–1 min	1,1–1,8



Kuva 2-2. IEEE 1159:n määrittelyt katkoksille, kuopille ja ylijännitteille.

2.2.8.2 Keskeytykset

Standardissa SFS-EN 50160 ei anneta raja-arvoja keskeytyksille. Sähkökäyttäjän kanalta pitkät keskeytykset (> 3 min) ovat merkittävin sähkön toimitukseen liittyvä laatu-tekijä. Lyhyiden keskeytysten määrälle annetaan standardin SFS-EN 50160 kohdassa ”Jakelijännitteen ominaisuudet pienjänniteverkossa” indikaatiiviset arvot [6]:

Normaaleissa käyttöolosuhteissa lyhyiden keskeytysten esiintymismäärä vaihtelee vuosittain muutamasta kymmenestä useisiin satoihin. Lyhyistä keskeytyksistä noin 70 % voi olla kestoltaan alle yhden sekunnin.

Keskijännitteisen avojohtoverkon vioista suurin osa, noin 90 %, on lyhytkestoisia ohimeneviä vikoja, joiden selvittämiseen käytetään pika- ja aikajälleenkytkentöjä. Pikajälleenkytkentöjen määrään liittyvät Senerin suositukset on annettu erikseen city-, taajama-, maaseutu- ja erityisolosuhteille. Suositukset eivät ota kantaa oikosulkujen aiheuttamiin jännitekuoppiin.

Standardissa IEEE 1366-2001 verkon sähkötoimitusvarmuutta koko jakelualueella (myös pienjänniteverkossa) kuvataan seuraavilla tunnusluvuilla:

- SAIFI (System Average Interruption Frequency Index), keskeytysten keskimääräinen lukumäärä (kpl/asiakas) tietyllä aikavälillä

$$SAIFI = \frac{\sum_j n_j}{N_s} \quad (5)$$

n_j = asiakkaan j kokemien keskeytysten määrä

N_s = kaikkien asiakkaiden lukumäärä

- SAIDI (System Average Interruption Duration Index), keskeytysten keskimääräinen yhteenlaskettu kesto aika (h/asiakas) tietyllä aikavälillä

$$SAIDI = \frac{\sum_i \sum_j t_{ij}}{N_s} \quad (6)$$

t_{ij} = asiakkaalle j keskeytyksestä i aiheutunut sähkötön aika

i = keskeytysten lukumäärä tietyllä aikavälillä

j = keskeytyksen vaikutusalueella olleiden asiakkaiden määrä

N_s = kaikkien asiakkaiden lukumäärä

- CAIDI (Customer Average Interruption Duration Index), keskeytysten keskipituus (h/keskeytys)

$$CAIDI = \frac{\sum_i \sum_j t_{ij}}{\sum_j n_j} \quad (7)$$

n_j = asiakkaan j kokemien keskeytysten määrä tietyllä aikavälillä. Muut suureet kuten edellä.

2.2.9 Custom Power -käsite

Sähkön laadun ja jakelun luotettavuuden hallintaan liittyy myös ns. Custom Power -käsite. Custom Power on IEEE P1409:n määrittelyn mukaan vapaasti suomentaen lähinnä ”konsepti, jossa hyödyntäen tehoelektroniikan laitteita pyritään turvaamaan 1–38 kV:n jakelujärjestelmässä riittävä sähkön jakelun luotettavuus ja sähkön laatu asiakkaan laitoksen tai prosessien toiminnan turvaamiseksi”.

3. Sähkön jakelun luotettavuus

Jakelun luotettavuudella tarkoitetaan kykyä siirtää luotettavasti sähköä tuottajalta kuluttajalle. Sähkön jakelun luotettavuuteen vaikuttavat sähkön tuotanto, siirto- ja jakeluverkko. Suurjännitesähkön siirron luotettavuudesta Suomessa vastaa kantaverkkoyhtiö Fingrid Oy. Sähkön jakelun luotettavuudesta ja sähkön laadusta vastaa lähinnä verkko-yhtiö. Alue- ja jakeluverkkotoimintaa hoitaa yli 100 sähköverkkoluvan saanutta yhtiötä. Verkon haltijalla on siirtovelvollisuus ja verkon kehittämisvelvoite. Sen on ylläpidettävä verkkoaan siten, että asiakkaiden kohtuulliset tarpeet tulevat tyydyttyiksi sähkön laadun kärsimättä.

Epäideaalisuutena ovat sähkökatkoksia aiheuttavat jakelukeskeytykset sekä jännitekuopat. Etenkin teollisuuslaitoksille sähkönjakelun häiriöt saavat aikaan kalliita tuotannon keskeytyksiä. Eräissä tapauksissa lyhytkestoisella jännitekuopalla (50 %, 200 ms) saattaa olla jopa tuhoisammat seuraukset pidempään keskeytykseen verrattuna (1 s) [31]. Tämä johtuu siitä, että ellei alijännitesuojausta ole tehty kunnolla, saattaa jännitekuopan jälkeen osa teollisuuden prosesseista olla pysähtynyt ja osa olla edelleen käynnissä. Jännitekuopat eivät ole ilmiönä uusia, mutta niihin on alettu kiinnittää enemmän huomiota vasta viime vuosina.

Keskeytyksille tai jännitekuopille ei ole määritelty standardia, jota tulisi noudattaa, mutta indikaatiivisia arvoja on annettu. Toisaalta keskeytykset ovat usein verkon ylläpitäjästä riippumattomia, joten standardin määrittelemine olisi jokseenkin perusteetonta ja vaikeaa. Syyskuussa 2003 voimaan tullut laki antaa asiakkaalle mahdollisuuden saada yli 12 tunnin mittaisesta keskeytyksestä verkon omistamalta sähköyhtiöltä korvausta [27, 28]. Tältä osin sähköyhtiöt ovat siis motivoituneita myös ylläpitämään verkkoaan.

3.1 Häiriökeskeytykset

Häiriökeskeytyksellä tarkoitetaan odottamattomasta häiriöstä johtuvaa jakelujännitteen katkeamista, jossa jännite on alle 1 % nimellisjännitteestä. Häiriökeskeytyksiin ei siis lasketa suunniteltuja keskeytyksiä. Ne voivat ulottua laajalle tai koskea vain yhtä asiakasta. Jakeluverkonhaltijan on julkaisuvelvollisuutensa mukaisesti julkaistava verkkopalvelujensa hintatasoa sekä verkkotoiminnan tehokkuutta, laatua ja kannattavuutta kuvaavia tunnuslukuja ministeriön määräyksen mukaisesti.

Kauppa- ja teollisuusministeriön päätöksessä sähköverkkotoiminnan tunnuslukujen julkaisemisesta ja ilmoittamisesta sähkömarkkinaviranomaiselle (KTMp 1637/1995) mainitaan [20]:

Kauppa- ja teollisuusministeriö on 17 päivänä maaliskuuta 1995 annetun sähkömarkkinain (386/95) 13 §:n 2 momentin nojalla päättänyt: 1 §

Jakeluverkonhaltijan tulee ilmoittaa sähkömarkkinakeskukselle liitteessä 1 mainitut tunnusluvut yhdessä jakeluverkkotoiminnan ja muun sähköverkkotoiminnan osalta, mikäli näitä verkkotoimintoja ei ole eriytetty toisistaan.

Mikäli jakeluverkkotoiminta on eriytetty muusta sähköverkkotoiminnasta, tulee verkonhaltijan ilmoittaa sähkömarkkinakeskukselle muun sähköverkon kuin jakeluverkon osalta liitteen 2 mukaiset tunnusluvut.

KTMP:n 1637/1995 liitteen 1 mukaan jakeluverkkotoimintaa koskevat tunnusluvut ja niiden laskentakaavat ja -ohjeet ovat seuraavat:

Luku 27, Kuluttajan vuotuinen keskeytysaika t, h/v

Tunnusluku tarkoittaa aikaa, jonka kuluttaja on keskimäärin ilman sähköä vuodessa (mukana myös suunnitellut keskeytykset). Keskeytyksiin otetaan mukaan vain omasta verkosta aiheutuneet keskeytykset. Aikajälleenkytkennät lasketaan mukaan.

$$t = \frac{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^x mpk(ij) * h(ij)}{mp} \quad (8)$$

n = keskeytysten lukumäärä

x = kunkin vian tai suunnitellun keskeytyksen yhteydessä esiintyvät erilaiset kestoajat

(keskeytyksen i aikana esiintyvät keskeytysajat)

mpk(ij) = niiden muuntopiirien lukumäärä, joihin keskeytysaika h(ij) vaikuttaa

h(ij) = keskeytyksen kesto aika muuntajilla

mp = muuntopiirien kokonaislukumäärä

Luku 28, Kaikkien keskeytysten vuotuinen lukumäärä kuluttajalla k, kpl/v

Tunnusluku tarkoittaa sitä, kuinka monta keskeytystä kuluttajalla on vuodessa keskimäärin (mukana myös suunnitellut keskeytykset). Keskeytyksiin otetaan mukaan vain omasta verkosta aiheutuneet keskeytykset. Myös aikajälleenkytkennät lasketaan mukaan.

$$k = \frac{\sum_{i=1}^n mpk(i)}{mp} \quad (9)$$

n = keskeytysten lukumäärä

$mpk(i)$ = niiden muuntopiirien lukumäärä, joihin keskeytys vaikuttaa
 mp = muuntopiirien kokonaislukumäärä

Keskeytys katsotaan alkaneeksi siitä, kun se on tullut yhtiön tietoon joko asiakkaan tai tietojärjestelmien ilmoituksen perusteella. Keskijänniteverkon vioista ja keskeytyksistä tieto saadaan lähes poikkeuksetta verkkotieto-, käytöntuki- tai kaukokäyttöjärjestelmistä. Pienjänniteverkon viat tulevat pääosin yhtiön tietoon asiakkaiden ilmoitusten perusteella. Keskeytys katsotaan päättyneeksi silloin, kun asiakkaan sähkönjakelu on palautettu. Palautus voidaan hoitaa myös väliaikaisin menettelyin, joka useimmissa tapauksissa tarkoittaa varavoiman hyödyntämistä. Keskeytysaika on alkamisajankohdan ja päättymisajankohdan välinen aika.

Keskeytykset voidaan jakaa odottamattomiin (vikakeskeytys) ja ennalta ilmoitettaviin (suunniteltu keskeytys). Energiamarkkinavirasto on pyytänyt verkkoyhtiöitä toimittamaan edellä mainittujen kahden tunnusluvun lisäksi seuraavat kahdeksan tunnuslukua [19]:

Asiakkaan keskimääräinen vuotuinen vuosienergioilla painotettu jakeluverkon

- odottamattomista keskeytyksistä aiheutunut keskeytysaika (h)
- odottamattomista keskeytyksistä aiheutunut keskeytysmäärä (kpl)
- suunnitelluista keskeytyksistä aiheutunut keskeytysaika (h)
- suunnitelluista keskeytyksistä aiheutunut keskeytysmäärä (kpl)
- aikajälleenkytkennöistä aiheutunut keskeytysmäärä (kpl)
- pikajälleenkytkennöistä aiheutunut keskeytysmäärä (kpl)

Kaikkien odottamattomien keskeytysten yhteenlaskettu vuotuinen lukumäärä

- pienjänniteverkossa (kpl)
- keskijänniteverkossa (kpl)

Seuraavassa kuvassa 3-1 esitetään tilastoitaviin tietoihin liittyviä osatekijöitä. [19]

KESKEYTYSLAJI 4.1	AIHEUTTAJA 4.2	VIKATYYPPI 4.3	SIJAINTI 4.4	
KJ-verkon odottamaton keskeytys 4.1.1	V1 Oman verkon	L1 Tuuli ja myrsky L2 Lumi ja jää L3 Ukkonen L4 Muu sää L5 Eläimet, linnut R1 Rakenneviat R2 Verkonhaltijan toiminta T Tuntematon U1 Ulkopuoliset U2 Force Majeure	VT1 Oikosulku VT2 Maasulku VT3 Kaksoismaasulku	A1 Sähköasema A2 Avojohtoverkko A3 PAS A4 Ilmakaapeli A5 Maakaapeli
	V2 Oman syöttävän verkon			A6 Jakelumuuntamo
	V3 Vieraan syöttävän verkon			A7 Pj-verkko
	V4 Asiakkaan verkosta johtuva			A8 Asiakkaan verkko
KJ-verkon suunniteltu keskeytys 4.1.2	S1 Oman verkon	ST1 Raivaus	<i>Harmaalla merkityt kohdat eivät ole tilastoimien kannalta välttämättömiä</i>	
	S2 Oman syöttävän verkon	ST2 Verkon rakennus		
	S3 Vieraan syöttävän verkon	ST3 Kunnossapito ja huolto		
	S4 Asiakkaan verkon	ST4 Jakelurajoitus		
KJ-verkon jälleenytkennät 4.1.3	J1 PJK			
	J2 AJK			
Pj-verkko 4.1.4*	P1 Vikakeskeytys			
	P2 Pj-verkon suunniteltu			

* EMV pyytää vuosittain pj-verkon vikakeskeytysten yhteenlasketun lukumäärän. Muu pj-verkon tilastointi ei ole välttämätöntä, mutta suotavaa.

Kuva 3-1. Tilastoitavat tiedot. [19]

Sähköenergiailiitto ylläpitää keskeytystilastointia, mutta pienjänniteasiakkaisiin kohdistuvien jakelukeskeytyksien täydellinen tilastointi on lähes mahdotonta, sillä pienjänniteverkoista aiheutuvia keskeytyksiä ei pystytä riittävän laajalti seuraamaan. Tällainen reaaliaikainen vikaseuranta vaatisi jokaiselle kuluttajalle oman keskeytyksiä rekisteröivän laitteiston. Tästä syystä tässä kohdassa käsitellyt keskeytystilastot kuvaavat vain keskijänniteverkosta asiakkaalle koituvia häiriökeskeytyksiä.

Häiriökeskeytyksiä voidaan mitata asiakkaan näkökulmasta keskeytysaikana (h/a) tai keskeytysmääränä (kpl/a). Verkon kannalta katsottuna voidaan käyttää myös yksikkönä (kpl/100 km), jolloin on helppo vertailla eri johto-osuuksien vika-alttiuksia.

3.1.1 Häiriökeskeytysten syyt ja vikataajuus keskijänniteverkossa

Suomessa on keskijänniteverkkoa lähes 134 000 kilometriä (taulukko 3-1). Siitä yli 80 % on käytössä maaseutujakelussa avojohdoina. Useimmiten Suomen oloissa johtosuus sijaitsee lisäksi metsässä, jossa se on alttiina kaatuville puille, oksille ja eläimille.

Taulukko 3-1. Keskijännitelinjojen (0,5–70 kV) johtopituudet (km) vuonna 1997 ja 2001 [22, 23].

	Avo- johto	Riippu- johto	Maa- kaapeli	Vesistö- kaapeli	Yhteensä
Vuonna 1997	120930	416	11287	543	133176
Vuonna 2001	121331	377	11489	630	133827

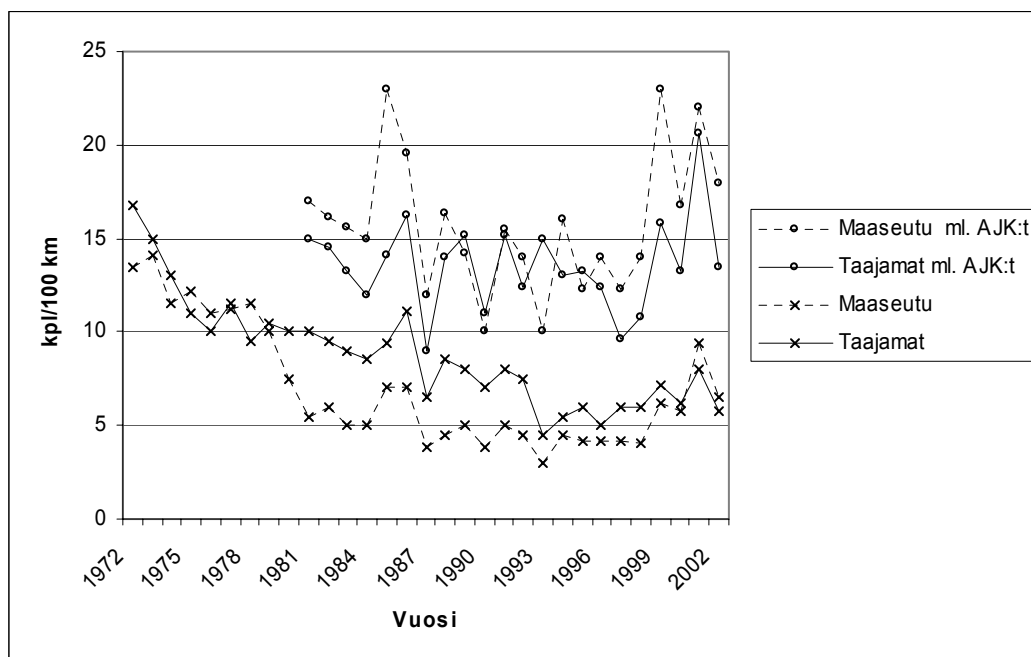
Yleisin syy keskijänniteverkoissa tapahtuviin häiriökeskeytyksiin ovat tuulen ja myrskyn aiheuttamat keskeytykset keskijänniteverkon avojohdoissa (taulukko 3-2). Todellisenä syynä tällöin voi olla tuulen linjan päälle kaatama puu, johtimien välinen kosketus tai muu linjan vaurioituminen. Muita huomattavia keskeytysten aiheuttajia ovat lumi-kuorman kaatama puu, lumi- ja jääkuorma sekä ukkonen. Taulukosta nähdään myös, että avojohdoilla esiintyy häiriökeskeytyksiä huomattavasti kaapeloitua verkkoa enemmän. Tämä johtuu maaseudun suuremmista etäisyyksistä sekä suuremmasta vika-alttiudesta. Yhteensä keskijänniteverkossa vuonna 2002 oli lähes 3 häiriökeskeytystä asiakasta kohden.

Taulukko 3-2. Häiriökeskeytysten esiintyminen keskijänniteverkossa asiakasta kohden (kpl/a) ja niiden syyt vuonna 2002 [22, 23].

	Avo- johdot	Kaapelit	Jakelu- muuntamot	Sähkö- asemat	Koko otos
Ukkonen	0,13	0	0,07	0,01	0,23
Lumi- ja jääkuorma	0,18	0	0	0	0,19
Lumikuorman kaatama puu	0,63	0	0	0	0,66
Tuuli ja myrsky	0,86	0	0,03	0	0,93
Muut sääolosuhteet	0,03	0	0	0	0,03
Eläinten tuottamus	0,06	0	0,05	0	0,11
Varomaton puun kaato	0,1	0	0	0	0,11
Maan kaivu	0,01	0,01	0	0	0,02
Muu ulkopuol. varomattomuus	0,03	0	0	0	0,04
Ilkivalta	0,01	0	0	0	0,01
Käyttövirheet	0,01	0	0	0,01	0,02
Asennus- tai suunnitteluvirhe	0,02	0	0	0	0,02
Hoitovirhe	0,03	0	0	0	0,04
Ylikuorma	0	0	0	0	0,01
Rakennevirhe	0,11	0,01	0,02	0,04	0,19
Tuntematon	0,12	0	0,02	0,02	0,35
Yhteensä	2,33	0,02	0,19	0,08	2,96

3.1.2 Häiriökeskeytysten vuosittainen vaihtelu

Vuosittain keskeytymäärät vaihtelevat tietyn tilastollisen vaihtelun mukaan. Vuodesta 1972 vuoteen 2002 keskijänniteverkon häiriökeskeytykset ilman aikajälleenkytkentää (AJK) ovat pudonneet lähes yhteen kolmasosaan (kuva 3-2). Toisaalta AJK:t mukaan luettuna keskeytysten määrä ei juurikaan ole vähennyt. Häiriöiden kokonaismäärä on siis pysynyt likipitään samana 100 kilometriä kohden, mutta AJK:n tekniikan parantuminen ja sen käytön yleistyminen on vähentänyt jakeluhäiriöitä. Kuvasta voidaan myös todeta, että aikajälleenkytkentäisiä keskeytyshäiriöitä oli vuonna 2002 sekä taajamissa että maaseudulla noin kaksi kolmasosaa kaikista häiriökeskeytyksistä.

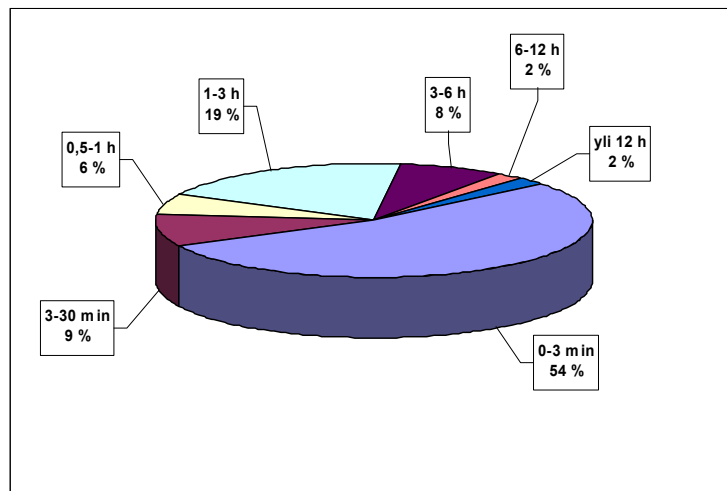


Kuva 3-2. Häiriökeskeytykset [kpl/100 km] maaseudulla ja taajamissa vuosina 1972–2002. [22 perusteella]

3.1.3 Häiriökeskeytysten aikajakaumat keskijänniteverkossa maaseudulla ja taajamissa

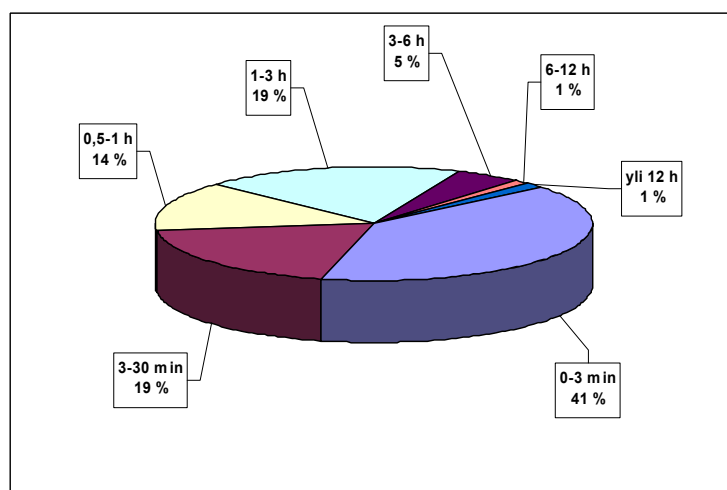
Vuonna 2002 maaseudulla häiriökeskeytyksistä suurin osa oli lyhyitä 0–3 minuutin kestoisia keskeytyksiä (kuva 3-3). Yleisimmin syy näihin on määritelty tuntemattomaksi, mutta todennäköisin syy on kuitenkin jokin oksa tai lintu, joka hetkellisesti aiheuttaa maasulun tai oikosulun. Kun oikosulun aiheuttaja on poistunut, pystyy AJK (aikajälleenkytkentä) palauttamaan sähkön verkkoon. Mikäli AJK ei kuitenkaan selvitä vikaa, joudutaan paikalle menemään miesvoimin, jolloin keskeytysaika venyy helposti 1–3

tuntiin. Yhteensä häiriökeskeytyksiä keskijänniteverkossa tapahtui vuonna 2002 maaseudulla keskimäärin 8,23 kpl/a ja taajamissa 2,03 kpl/a asiakasta kohden.



Kuva 3-3. Keskijänniteverkon häiriökeskeytysten aikajakauma maaseudulla vuonna 2002. [22]

Myös taajamissa häiriökeskeytyksistä suurin osa oli lyhyitä 0–3 minuutin keskeytyksiä (kuva 3-4), jotka AJK on pystynyt selvittämään. Kuitenkin myös pidempiä keskeytyksiä esiintyy huomattavan suuri osuus. Kuvasta 3-4 nähdään myös, että mikäli AJK ei pysty palauttamaan verkkoa ennalleen, pystytään vika paikantamaan ja korjaamaan nopeammin kuin maaseudulla ja keskeytysaika jää yleisesti alle puoleen tuntiin.



Kuva 3-4. Keskijänniteverkon häiriökeskeytysten aikajakauma taajamissa vuonna 2002. [22]

3.1.4 Häiriökeskeytyksistä aiheutuvat kustannukset

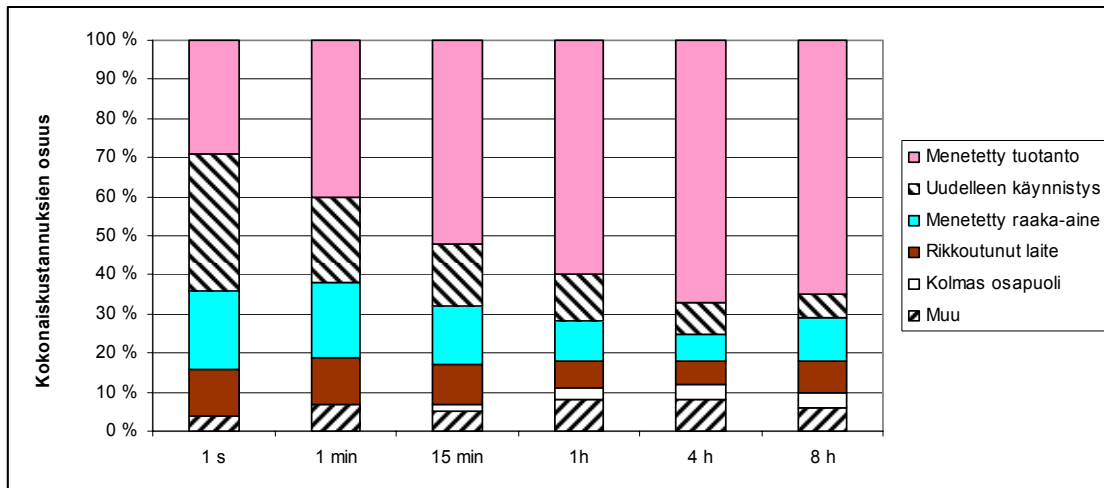
Häiriökeskeytyksistä aiheutuvat kustannukset riippuvat hyvin paljon asiakkaasta. Kotitalouksien häiriökeskeytysten kustannukset rajoittuvat lähinnä jääkaapin sulamiseen sekä mahdollisiin mukavuuden menettämisiin. Varsinaiset aineelliset vahingot jäävät yleensä hyvin pieniksi. Teollisuusasiakkaille häiriökeskeytyksistä aiheutuvat kustannukset käsittävät helposti tuotannon menetyksiä, linjaston korjauksia, ylityökorvauksia, korvauksia toimituksen viivästyttämisestä ja materiaalien menetyksiä.

Taulukossa 3-3 esitetään eri kuluttajatyypin kustannusarviot eripituisista jakelukeskeytyksistä. Taulukkoon on otettu keskiarvot Tanskan, Suomen ja Islannin kyselytutkimusten arvoista. Taulukon arvot on suhteutettu liityntätehoon. Pienimmät kustannukset ovat odotetusti pienkuluttajalla mutta suurimmat ovat yllättäen maataloudessa. Maatalouden suuret kustannukset johtuvat siitä, että tuotantolaitosten ilmanvaihdon pysähtyminen aiheuttaa pahimmillaan eläimien kuoleman. Tällöin kustannukset liityntätehoa kohden ovat suuret. Teollisuuden ja julkisen sektorin kustannukset ovat tämän tutkimuksen mukaan samansuuruiset.

Taulukko 3-3. Eri ympäristöissä koettujen keskeytyksien kustannukset (\$/kW) [37].

	1 s	1 min	15 min	1h	4 h	8 h
Kotitalous				4,2	13,5	45,1
Maatalous				29,3		161,9
Teollisuus	1,4	2,7	9,3	16,4		69,6
Julkinen	2,6	3,0	4,9	15,3		80,6

Teollisuuden keskeytyskustannukset jakaantuvat kuvan 3-5 mukaisesti. Mitä pidempi keskeytysaika on, sitä suuremmaksi tulevat menetetyt tuotannon kustannukset. Lyhyessä keskeytyksessä uudelleenkäynnistys maksaa eniten. Myös menetetyt raaka-aineen ja menetetyt tuotannon kustannukset ovat suhteellisesti suuria.



Kuva 3-5. Teollisuusasiakkaan kustannuksien jakautuminen eripituisilla jakelukeskeytyksillä [37].

3.2 Jännitekuopat

Jännitekuopat ovat tilanteita, jossa jännite alenee välille 1–90 % sopimuksen mukaisesta nimellisjännitteestä ja joiden kesto on 10 ms:sta 1 minuuttiin [25]. Jännitekuopat ovat tyypillisesti sekä hyvin vaikeasti ennustettavia että mitattavia tapahtumia. Jännitekuopamittaukset ovat alkaneet Suomessa vasta viime vuosina, eikä niistä ole vielä kerätty paljon tilastotietoa. Jännitekuoppien syinä voivat olla raskaat käynnistyvät kuormat, oiko- tai maasulku jossakin verkon osassa tai suuret tehoheilahtelut. Jännitekuoppia esiintyy kaikissa jännitetasoissa, mutta johtuen heikommista verkoista ja pitkistä etäisyyksistä, niitä esiintyy eniten maaseudun pienjänniteverkoissa. Jännitekuoppa määritellään yleisesti jäävän jännitteen ja pituuden perusteella, mutta myös vaihekulmaa ja jännitteen putoamisnopeutta voidaan käyttää antamaan lisäinformaatiota jännitekuopasta. Puhuttaessa kuopan syvyydestä tarkoitetaan jäävää jännitettä, ellei toisin mainita.

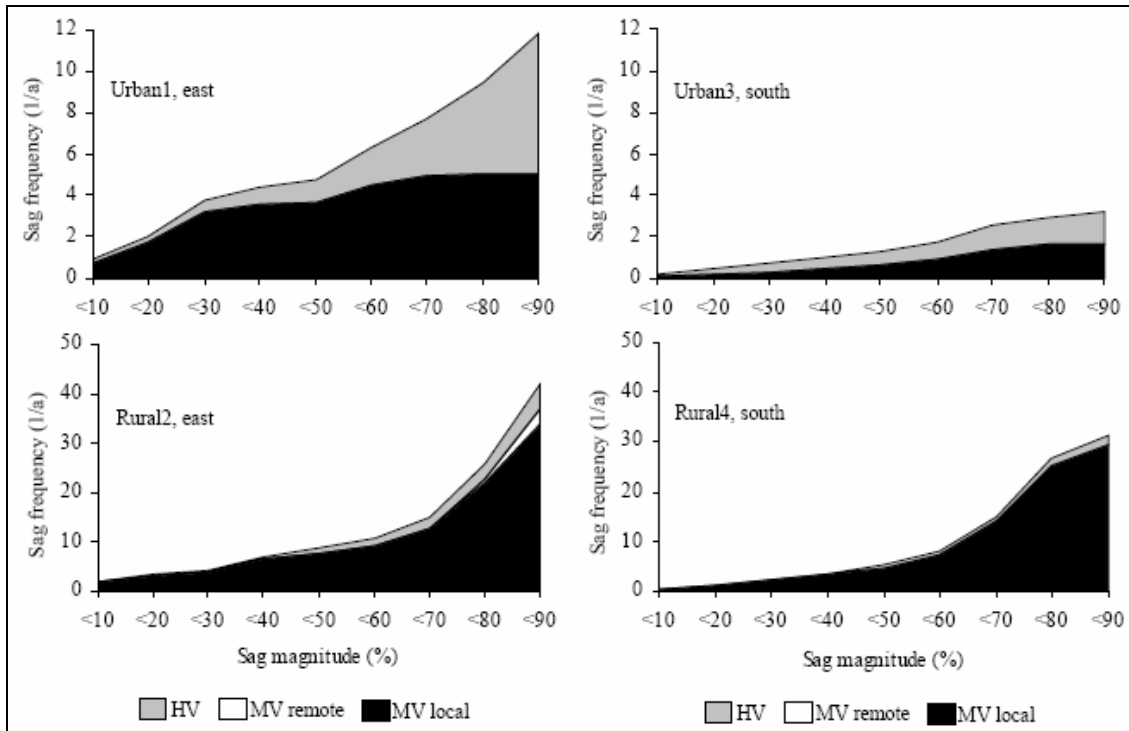
3.2.1 Jännitekuoppien synty ja vaikutusalue

Käytännössä jännitekuopan syntyyn liittyy aina ison virran kulku jossakin verkon osassa, joka aiheuttaa jännitehäviön siirtoverkon tai muuntajan impedanssissa. Tällaisen suuren virran voivat aiheuttaa luonnonilmiöt, metsän eläimet, siirtoverkossa esiintyvät viat tai suuret verkossa siirtyvät tehot.

Koska keskijänniteverkko on Suomessa yleisesti maasta erotettu, eivät siinä tapahtuvat yksivaiheiset maasulut näy Dyn-kytketyn muuntajan toisiopuolella. Tämä johtuu siitä, että keskijänniteverkon vaihejännitteet eivät muutu toisiinsa nähden yksivaiheisen vian

aikana [33]. Tästä johtuen läheskään kaikki keskijänniteverkon viat eivät aiheuta asiakkaille jännitekuoppia. Toisaalta koska keskijänniteverkko on myös rakennettu yleisesti säteittäiseksi, näkyvät jännitekuopat verkossa hyvin laajalla alueella. Tämä siksi, koska yhdessä haarassa tapahtunut vika aiheuttaa myös muuntajan virtakiskossa jännitteen aleneman ja jännitekuoppa näkyy myös kaikissa siitä lähtevissä haaroissa. Mitä lähempänä muuntajaa vika tapahtuu, sitä suurempi on virtakiskossa näkyvä jännitekuoppa. Näin ollen myös viereisten haarojen vika-alttiudet vaikuttavat jännitekuoppien esiintyvyyteen.

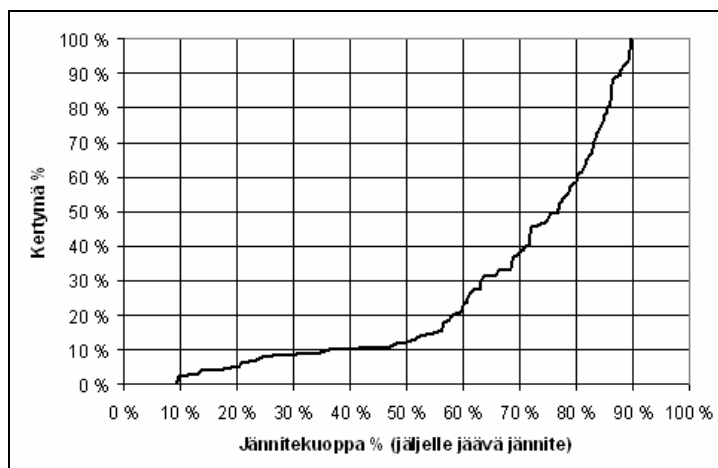
Kuvassa 3-6 esitetään asiakkaiden kokemien jännitekuoppien alkuperiä eri ympäristöissä. Tulokset on laskettu neljälle eri verkolle vikatilastojen perusteella. Laskuissa on tehty oletus, että vikatiheys jakautuu tasaisesti koko kaapelipituudelle. Tuloksien perusteella kaikissa ympäristöissä suurin osa jännitekuopista syntyy keskijänniteverkossa. Nämä keskijänniteverkosta aiheutuneet jännitekuopat jakaantuvat paikallisiin (local) ja vierekkäisten (remote) haarojen aiheuttamiin kuoppiin. Ainoastaan maaseutuverkossa myös vierekkäisten haarojen aiheuttamat jännitekuopat näkyvät tuloksissa. Nämä kuopat ovat syvyydeltään pieniä. Myös korkeajännitteissä muodostuneet jännitekuopat ovat maaseutuverkossa suhteellisesti vähäisiä. Sen sijaan, koska kaupungissa suurin osa keskijänniteverkkoa on kaapeloitua ja niissä vikatiheys on pieni, voi jännitekuoppien synnystä suuri osa olla peräisin korkeajännitelinjoista. Kuvissa ei ole otettu huomioon pienjänniteverkon aiheuttamia jännitekuoppia. Nämä ovat kuitenkin melko vähäisiä, sillä niiden vaikutusalue rajoittuu korkeintaan yhteen muuntopiiriin. Lisäksi pienjännitteessä ei ole käytössä PJK:ta tai AJK:ta. Tästä johtuen pienjänniteviat aiheuttavat lähes poikkeuksetta jännitekuopan sijaan keskeytyksen. Tosin ennen kuin viallinen haara kytkeytyy sulakkeen palaessa pois verkosta, voi se aiheuttaa muihin pienjännitehaaroihin lyhyen jännitekuopan.



Kuva 3-6. Vikatilastojen perusteella lasketut asiakkaiden kokemat jännitekuoppien esiintymiset ja niiden alkuperä erityyppisissä ympäristöissä. Pystyakselilla vikataajuus, vaaka-akselilla jännitekuopan syvyys. [34]

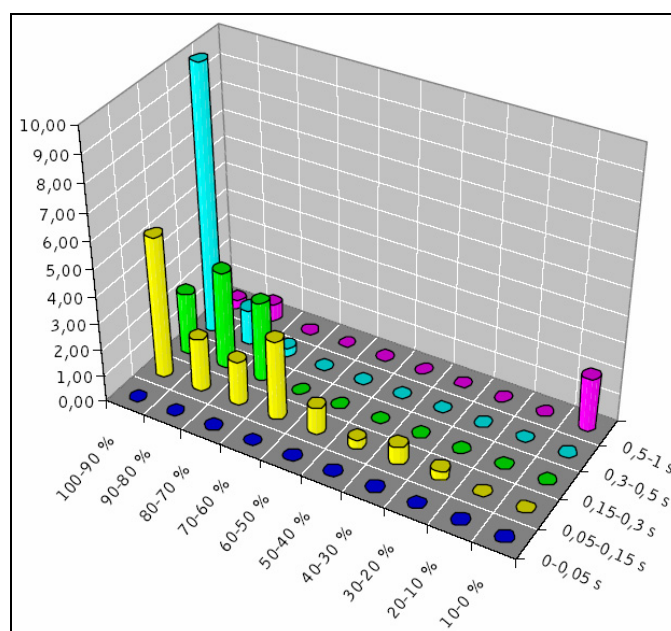
3.2.2 Jännitekuoppien esiintyvyys ja luonne

Kuvasta 3-7 nähdään erään pienjänniteaseman lähdön jännitekuoppien kertymä. Puolesa jännitekuopista oli jäljelle jäävä jännite yli 75 %. Vain 20 %:lla tapauksista jäljelle jäävä jännite oli alle 60 %. Voidaan todeta, että tämä on hyvin tyypillinen käyrä pienjänniteverkossa; hyvin suuria jännitekuoppia on suhteellisesti vähän, mutta pieniä jännitekuoppia saattaa kertyä vuodessa jopa tuhansia. Määrä ja laatu vaihtelevat kuitenkin havaintopaikan mukaan. Siirtoverkon lyhyemmät etäisyydet pienentävät kuoppien syvyyttä. Samoin tekevät syöttökaapeleiden suuremmat poikkipinta-alat ja mahdolliset rinnakkaissyötöt. Esiintyvyys taas riippuu jakelun alueen vika-alttiudesta.



Kuva 3-7. Jännitekuoppien kertymä 9 kk:n ajalta eräällä pienjänniteasemalla [29].

Kuvassa 3-8 on yksi yleinen esitystapa jännitekuoppien esiintyvyydelle. Pystyakselilla on esiintymistiheys (1/a), vaaka-akselilla ovat jännitekuopan syvyys (jäävä jännite, %) ja jännitekuopan kesto (s). Kuvan arvot ovat mittaustuloksia eräältä Kainuussa sijaitsevalta keskijänniteasemalta. Koska jännitekuopat ovat luonteeltaan hyvin stokastinen ilmiö, ei kuvan tuloksia voida juurikaan yleistää. Sekä jännitekuoppien laatu että esiintyvyys vaihtelevat suuresti havaintopaikan mukaan [30].



Kuva 3-8. Jännitekuoppien esiintyvyys eräällä keskijänniteasemalla [30].

Taulukkoon 3-4 on kerätty erään maaseutuverkon jännitekuoppien kertymä. Myös tässä pieniä jännitekuoppia esiintyy suuri osuus. Alle 1 %:n jäävää jännitettä ei lasketa jännitekuopaksi vaan keskeytykseksi.

Taulukko 3-4. Erään maaseudun pienjänniteaseman jännitekuoppien määrä yhden viikon aikana [36]. Mittaus on tehty vuonna 1998. Taulukossa on esitetty jäävä jännite sekä jännitekuopan pituus.

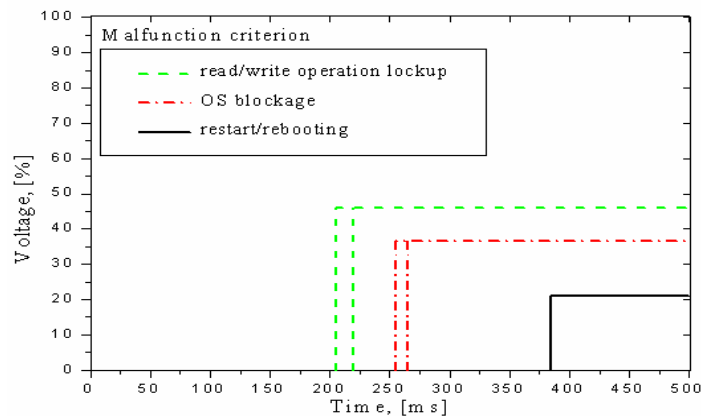
	< 20 ms	20...100 ms	100...500 ms	0,5...1 s	1...3 s	3...20 s	20...60 s	> 1 min
0 %			9					6
1...40 %		1	2					
40...70 %								
70...85 %	1	1	25					
85...90 %	36	9	16					
> 90 %								

3.2.3 Laitteiden herkkyys jännitekuopille

Laitteiden herkkyys jännitekuopille riippuu monesta eri tekijästä, kuten jännitekuopan ominaisuuksista, laitteen toimintatilasta ja ympäristöolosuhteista (lämpötila, kosteus, värinä, ilmanpaine jne.). Laitteiden reagoiminen häiriötekijöihin voi myös olla eriasteista. (Ks. kuva 3-9.) Taulukon 3-5 kohdan 1) häiriö ei vaikuta normaliin toimintaan ja kohdassa 4) häiriö on aiheuttanut vikaantumisen. Kohdassa 2) laite toipuu häiriöstä, mutta informaatiota tapahtumasta tarvitaan, ja vaikka laitteen toiminta on palautunut, myös muulle prosessille on voinut aiheutua häiriötä. Kohdan 3) häiriöstä palautumiseen vaaditaan eriasteisia palautustoimenpiteitä.

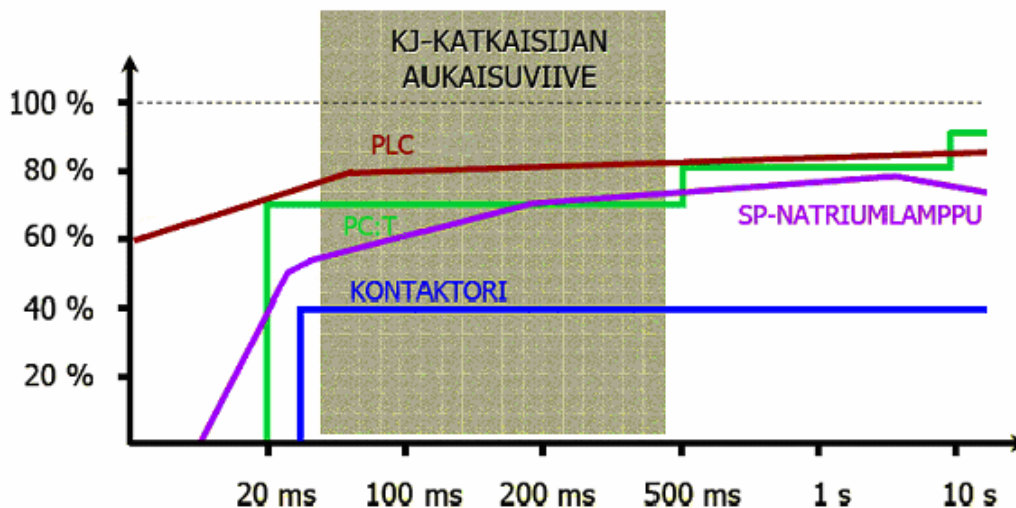
Taulukko 3-5. Laitteiden häiriöasteet. [39]

Häiriöaste	
1) Normaali toiminta asetettujen raja-arvojen puitteissa	2) Itsetoipuva hetkellinen toiminnan häiriö.
3) Hetkellinen toimintahäiriö, joka vaatii palautustoimenpiteitä.	4) Toimintahäiriö, joka ei ole palautuva johtuen laitteen, sen komponenttien tai ohjelman vikaantumisesta tai datan häviämisestä.



Kuva 3-9. Jännitekuopan ominaisuuksien vaikutus tietokoneen häiriöasteeseen. [39]

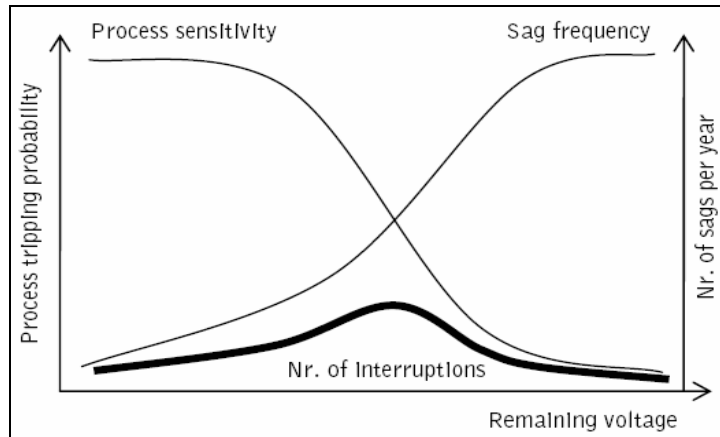
Eri laitteet häiriintyvät jännitekuopista eri tavalla. Ihmissilmä havaitsee jännitteen aleneman hehkulamppujen himmenemisenä melko helposti. Hehkulamppujen himmenemistä voidaan kuitenkin pitää melko harmittomana, sillä hehkulamppu syttyy ja kirkastuu jälleen uudelleen kuopan loputtua. Pasi Pohjanheimo on tutkinut eri laitteiden herkkyyttä jännitekuopille [30 ja 38]. (Ks. kuva 3-10.)



Kuva 3-10. Jännitekuopan syvyyden ja keston vaikutus eri laitteille. Kuvan laitteet ovat PLC (Programmable Logic Controller), PC-tietokone, SP-natriumlamppu ja kontaktori. KJ-katkaisijan aukaisuviive kertoo ajan, jonka sisällä pikajälleenytkentä toimii. [38]

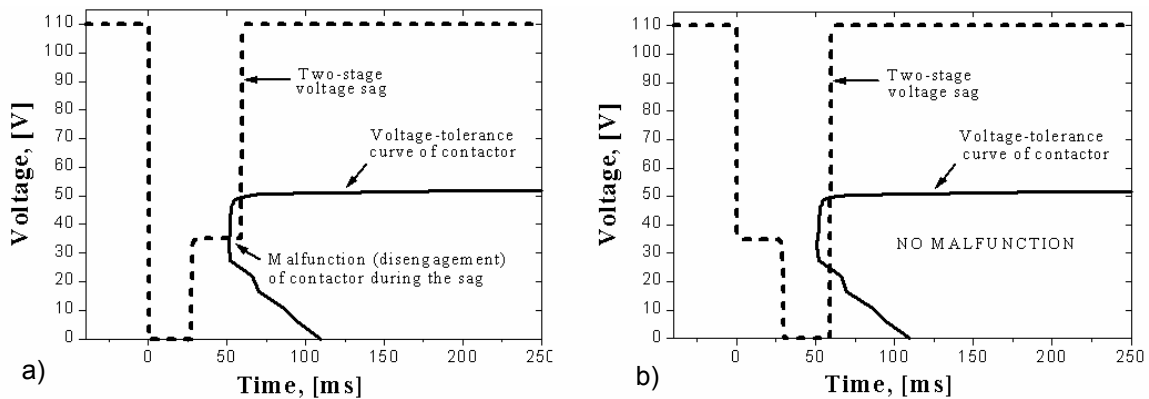
Pohjanheimon tutkimuksen [30] mukaan kontaktorit kestävät yleisesti 60 %:n jännitekuopan ennen kuin laukeavat. Merkittävänä tekijänä kontaktoreiden raja-arvon määrittämisessä on jännitteen kulma, jolla jännitekuoppa alkaa. Tutkimuksessa olleista tietokoneista suurin osa sammuu, kun jäävä jännite on 60 %. Tuloksista voidaan päätellä, että vanhemmat tietokoneet sietävät jännitekuoppia paremmin kuin uudemmat. Tutkituista purkauslamppuista herkin sammumiselle on elohopealamppu (80 %) ja syvimmän jännitekuopan kestää monimetallilamppu (50 %). Kaikkiin komponentteihin liittyy tietty hajonta, ja esitetyt käyrät edustavat näistä saatua keskiarvoa.

Koska sekä laitteiden herkkyys että jännitekuoppien esiintyvyys vaihtelee jännitekuopan syvyyden funktiona, voidaan todennäköisyys prosessien häiriintymiselle esittää kuvan 3-11 tapaan. Kuvasta voidaan todeta, että tärkein alue jännitekuoppien ehkäisyssä on alue, jossa laitteet eivät enää varmuudella toimi. Kuvan parametrien lisäksi voidaan mukaan ottaa myös jännitekuopan kesto, jolloin kuva laajentuisi kolmiulotteiseksi ja käyrät muuttuisivat tasoiksi.

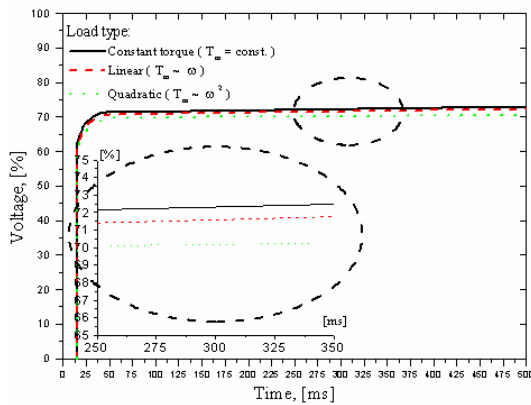


Kuva 3-11. Todennäköisyys prosessin keskeytymiselle jännitekuoppien johdosta. [30]

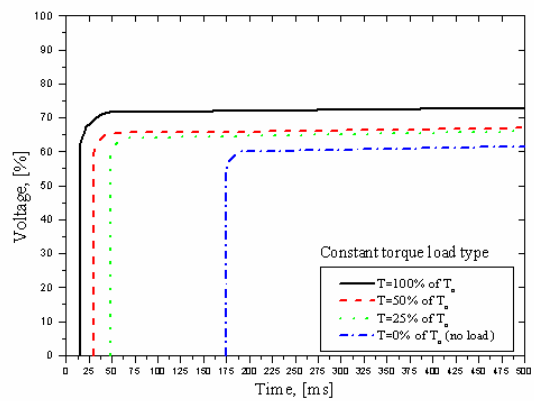
Jännitekuopan syvyyden ja pituuden lisäksi myös muut tekijät, kuten vaihekulma ja jännitteen putoamisnopeus ja jännitekuopan muoto (symmetrinen/epäsymmetrinen) (kuva 3-12), vaikuttavat laitteiden häiriintymisasteeseen. Laitteiden herkkyyteen jännitekuopille vaikuttavat itse kuoppaan liittyvien tekijöiden lisäksi myös mm. laitteen toimintatyyppi ja sen luonteenpiirteet. Kuvassa 3-13 esitetään symmetrisen 3-vaiheisen jännitekuopan vaikutus taajuusmuuttajaan eri toimintatyypeissä [39]. Kohdassa 1) on eri momenttityyppien vaikutus, kohdassa 2) on momentin suuruuden vaikutus, kohdassa 3) nopeuden vaikutus ja kohdassa 4) säätöpiirin kytkentätavan vaikutus taajuusmuuttajan herkkyyteen jännitekuopille.



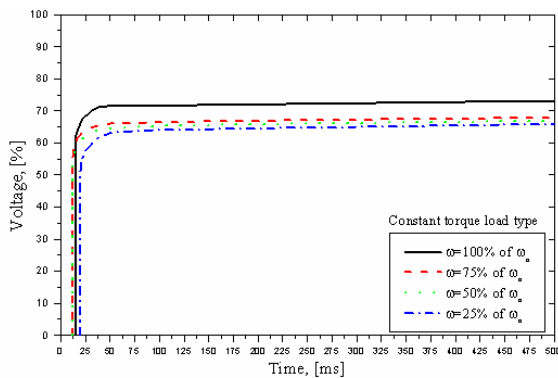
Kuva 3-12. Jännitekuopan muodon vaikutus vaihtovirtakontaktorin herkkyyteen. Kohta a) kontaktori päästää ja b) kontaktori jää vetämään. [39]



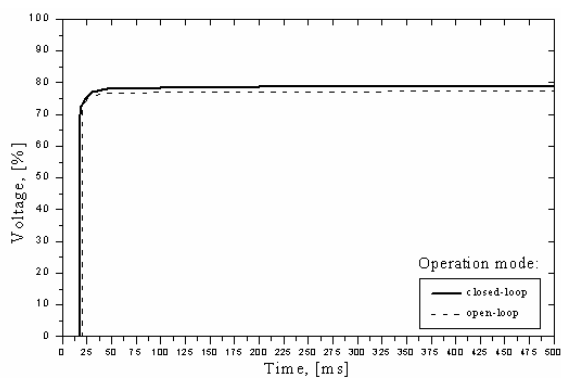
a) Eri kuormatyyppien vaikutus taajuusmuuttajan herkkyteen jännitekuopille



b) Momentin suuruuden vaikutus taajuusmuuttajan herkkyteen jännitekuopille



c) Nopeuden vaikutus taajuusmuuttajan herkkyteen jännitekuopille

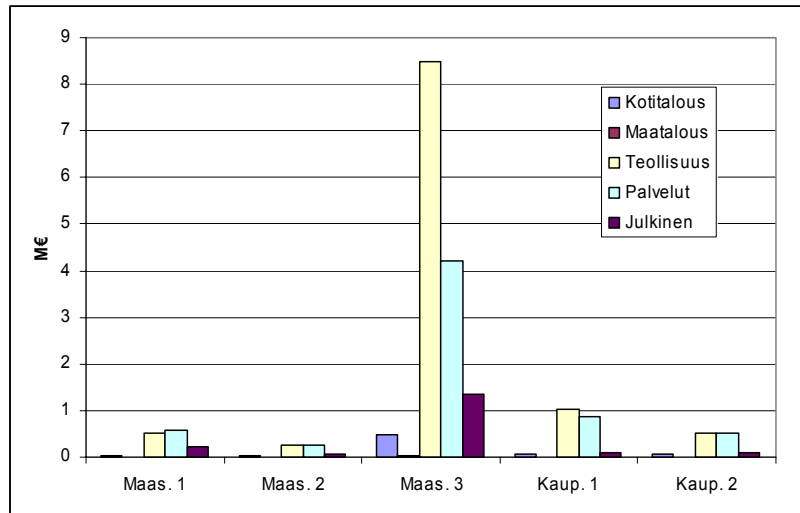


d) Kytkeäntävän vaikutus taajuusmuuttajan herkkyteen jännitekuopille: takaisinkytketty säätö (jatkuva), takaisinkytkemätön (katkoviiva)

Kuva 3-13. Symmetrisen 3-vaiheisen jännitekuopan vaikutus taajuusmuuttajaan eri toimintatyyeissä. [39]

3.2.4 Jännitekuopista aiheutuvat kustannukset

Kuten edellä esitetystä voidaan havaita, laitteiden herkkyys jännitekuopille vaihtelee. Tästä syystä myös eri asiakkaiden jännitekuopista aiheutuvat kustannukset vaihtelevat suuresti. Herkimpiä jännitekuopille ovat prosessiteollisuuden laitteet. Tällaisen teollisuuden jännitekuopista aiheutuvat kustannukset voivat koostua tuotantomenetyksistä, menetetyistä raaka-aineista ja energiasta, linjan korjauskuluista, ylityöpalkoista, toimituksen viivästyskatoista, linjan puhdistusmaksuista sekä linjan uudelleenkäynnistyskuluista. Toisaalta suurin osa asiakkaista ei koe mitään taloudellisia menetyksiä jännitekuopista. Nämä lukuarvot riippuvat suuresti teollisuuden ja kuluttajan tyypistä. Lisäksi kyselyn tuottamat vastaukset ovat vain arvioita kustannuksista eivätkä vastaa täysin todellista tilannetta. (Ks. kuva 3-14.)

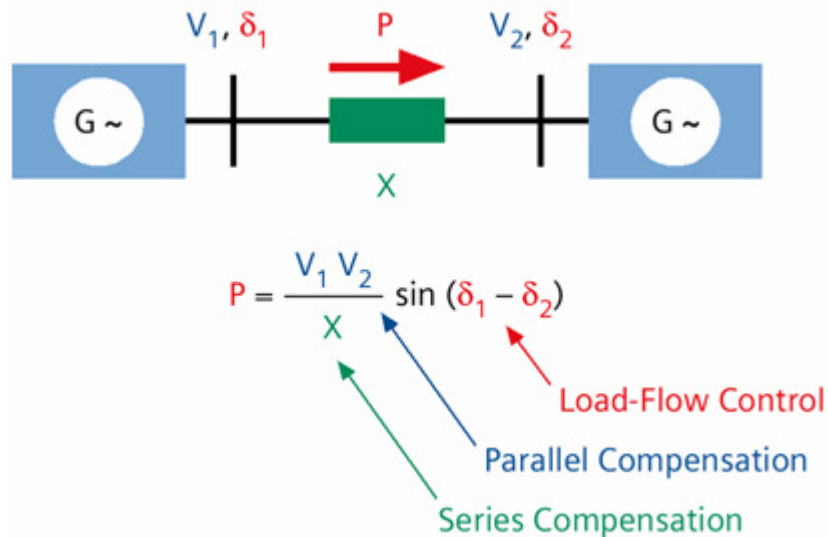


Kuva 3-14. Kyselyn tuottamat tulokset jännitekuoppien kustannuksista eräillä maaseutu- ja kaupunkialueilla [35].

4. Sähkön laadun ja jakelun luotettavuuden hallintalaitteet

4.1 Yleistä

Tehoelektroniikan kehittyessä markkinoille on tullut lukuisia joukko erityyppisiä tuotteita, joita käytetään sähkön jakelun luotettavuuden ja laadun hallintaan (FACTS-laitteet tai Custom Power -laitteet) (taulukot 4-1 ja 4-2, kuva 4-2) perinteisten laitteiden lisäksi. Energiavarastoja hyödynnetään joko näiden laitteiden yhteydessä (esimerkiksi akkuja ja kondensaattoreita) tai energiavarastojärjestelmät voivat toimia sinällään verkkoliitännälaitteen (lataus/purkaus) kanssa sähkön laadun ja luotettavuuden hallintalaitteistona. FACTS-laitteiden pääidea voidaan nähdä vaihtovirtatehon siirron perusyhtälöstä (kuva 4-1).



Kuva 4-1. FACTS-laitteiden toiminnan pääidea vaihtovirtaverkon tehon siirron perusyhtälön avulla esitettyinä. (Series compensation = sarjakompensointi, Parallel Compensation = rinnakkaiskompensointi, Load-flow control = tehon hallinta, V = jännite, δ = vaihekulma, X = verkon reaktanssi, P = teho.) [Lähde: [Siemens](#)]

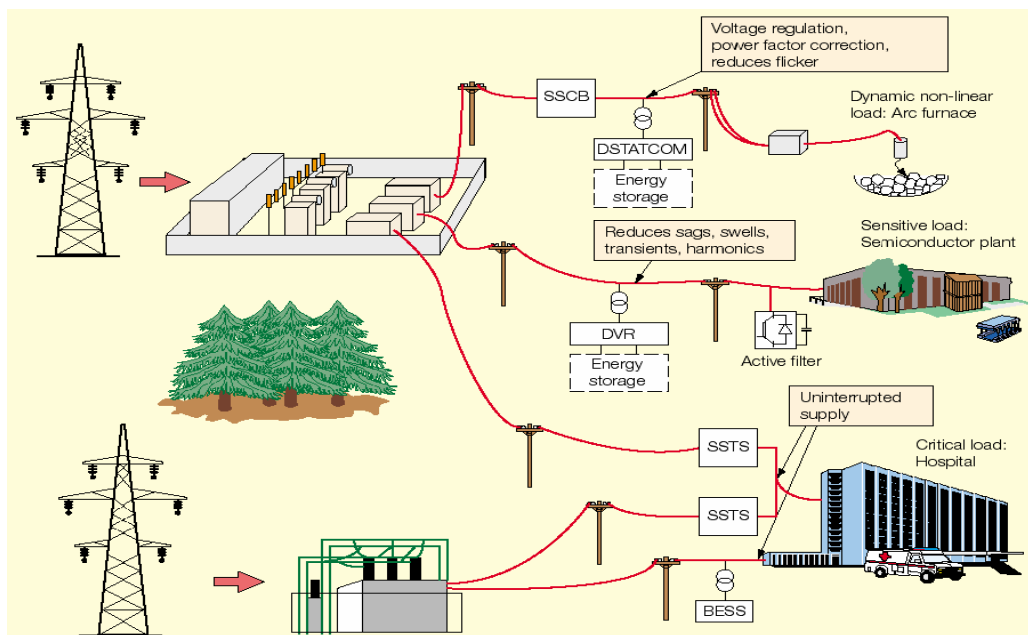
*Taulukko 4-1. Sähkön laadun ja jakelun luotettavuuden hallintaan soveltuvia laitteita.
[Perustuu osittain lähteeseen 10.]*

Lyhenne	Engl. nimitys	Nimitys	Laittevalmistajia
SA	Surge arrester	Ylijännitesuoja	
BESS	Battery	Akut	Exide, Yuasa, Matsushita, Johnson, JSB, Varta
STATCOM	Static synchronous compensator	Staattinen tahtikompensoaattori	ABB, Siemens, S&C Electric Company
DSC	Dynamic Synchronous Condenser	Dynaaminen tahtikompensoaattori	American Superconductor
DSC	Distribution Series Capacitor	Sarjakondensaattori	Nokian Capacitors, ABB
DVR	Dynamic voltage restorer	Dynaaminen jännitteen säätäjä	ABB, Siemens, S&C Electric Company, American Superconductor
PFCC	Power factor correction capacitor	Tehokerrointa korjaava kondensaattori	
SMES	Superconducting magnetic energy storage	Suprajohtava magneettinen energia- varasto	American Superconductor
SETC	Static electronic tap changer	Staattinen sähköinen käämikytkin	
SSTS	Solid-state transfer switch	Elektroninen vaihtokytkin	Powerware, MGE, Toshiba, Chloride, GE
SSCB	Solid-state circuit-breaker	Elektroninen katkaisija	Siemens, The ABB Group, General Electric, Westinghouse-Cutler-Hammer
SVC	Static var compensator	Staattinen loistehon kompensoaattori	ABB, Nokian Capacitors
TSC	Thyristor switched capacitor	Tyristorikytketty kondensaattori	ABB, Nokian Capacitors
UPS	Uninterruptible power supply	Keskeytymättömän sähkön syöttölaite	Powerware, APC, Toshiba, MGE, Chloride, GE
APF(TF)	Active power filter or tuned filter	Aktiivisuodin	Nokian Capacitors, ABB

Taulukko 4-2. Sähkön laadun ja jakelun luotettavuuden hallintaan soveltuvien laitteiden toimintoja. [Perustuu lähteeseen 10.]

Laite	SA	BESS	STATCOM	DSC	DVR	PFCC	SMES	SETC	SSTS	SSCB	SVC	TSC	UPS	APF(TF)
Kuopat		X			X		X	X	X		X		X	
Keskeytykset		X					X		X	X			X	
Hetkellinen ylijännite		X			X		X	X	X		X		X	
Transientit	X	X	X		X		X					X		X
Ylijännite		X	X			X	X	X			X		X	
Alijännite		X	X	X		X	X	X			X	X	X	
Harmoniset yliaallot			X								X			X
Toistuvat häiriötransien-														X
Jännitteen vaihtelu/ välkyntä/fliikkeri		X	X	X	X		X				X			

Kuvassa 4-2 on esimerkki eräiden sähkön laadun hallintalaitteiden sijoittamisesta jakeluverkkoon kriittisten ja herkkien kuormien yhteyteen.



Kuva 4-2. Esimerkki sähkön laadun hallinnan laitteiden sijoittumisesta joidenkin kriittisten kohteiden yhteydessä. [10]

4.2 Katkeamaton sähkönsyöttö, UPS

4.2.1 Yleistä

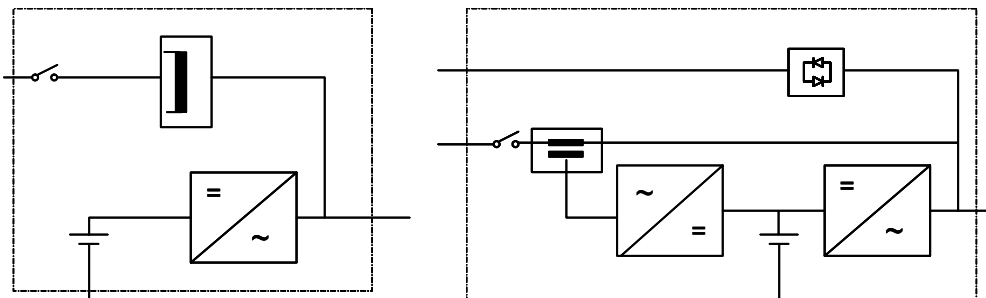
Katkeamaton sähkönsyöttö toteutetaan perinteisesti syöttö-/varasyöttöjärjestelmällä, UPS-laitteistolla, UPS-/varavoimageneraattorilaitteistolla tai näiden yhdistelmillä. Katkeamaton syötön vaihto edellyttää nopeiden automaattisesti toimivien elektronisten kytkinten käyttöä. UPS (Uninterruptible Power Supply) -järjestelmä on eräs energiavarastojen tyypillinen sovelluskohde sähkön jakelun luotettavuuden ja laadun hallinnan alueella. UPS-järjestelmiä on varavoimakoneen rinnalla perinteisesti käytetty turvaamaan katkeamaton sähkönsyöttö kriittisille erikoiskohteille, kuten tietokonejärjestelmille. Tyypillisesti UPS-laitteet on suunniteltu turvaamaan sähkönsyöttö 5–15 minuutin ajan ja toimimaan ns. ride-through-laitteena varavoimakoneen käynnistymiseen asti. Telekommunikaatiojärjestelmien ja mm. elektroniikkateollisuuden määrän ja tarpeiden kasvun myötä on myös suurempia UPS-järjestelmiä tullut markkinoille. Suuret (20 kVA–2 400 kVA) on-line-toimivat UPS-laitteet ovat saaneet uusia ominaisuuksia sähkön laadun hallinnan toiminnoista sähkön laadulle asetettävien vaatimusten kasvaessa.

UPS-järjestelmiä on kahta päätyyppiä: off-line- (stand-by) ja on-line-järjestelmät. Lisäksi ovat ns. line-interactive- eli hybridityypit. Hybridityyppisessä off-line UPS-laitteistossa (kuva 4-3) invertteri pidetään stand-by-tilassa ja käytetään erikoismuuntajaa stabiloimaan ja poistamaan sähköisiä häiriöitä. Sähkökatkoksen sattuessa invertteri aktivoituu ja syöttää kuormaa. Hybridityyppisiä UPS-laitteita käytetään suojaamaan kuormia, jotka ovat suhteellisen epäherkkiä sähköisille häiriöille.

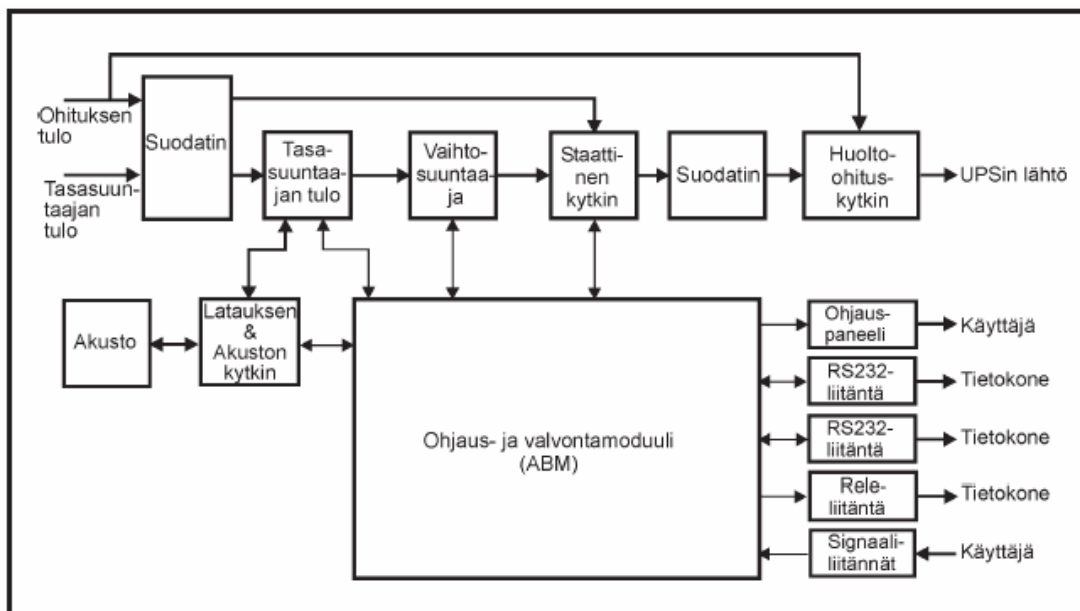
On-line toimivat UPS-järjestelmät voidaan rakenteensa puolesta jakaa kahteen pääalueeseen: kaksimuunnostekniikkaa ja yksimuunnostekniikkaa hyödyntävät järjestelmät. Molemmissa järjestelmissä energiavarasto on aina kytkettynä järjestelmään. Kaksoismuunnostekniikkaa hyödyntävissä järjestelmissä koko sähköteho tasasuunnataan ja vaihtosuunnataan, jolloin saavutetaan lähtöjännitteen täydellinen ohjattavuus ja hyvä suodatus verkkojännitteen häiriöille. Haittana ovat häviöt, harmonisten yliaaltojen muodostuminen verkkoon ja myös rajoittunut kyky syöttää säröytynyttä epälineaarista kuormaa. (Ks. kuva 4-4.) Yksimuunnostekniikassa vaihtosuuntaaja muodostaa aktiivisesti lähtöjännitteen kuten kaksimuunnostekniikassakin mutta pätötehoa ei tarpeettomasti tasasuunnata, jolloin saavutetaan hyvä hyötysuhde ja sinimuotoinen tulovirta.

Yksimuunnostekniikan kehittyneempi versio on ns. delta-muunnostekniikka (kuva 4-3), jossa pääinvertterin rinnalla on delta-invertteri, joka tulokuristimen avulla säätää virran ja jännitteen vaihekulman samaksi. Delta-muunnostekniikkaa hyödyntävä UPS-järjestelmä ottaa verkosta sinimuotoista pätötehoa kuormituksesta ja verkkojännitteestä riippumatta.

UPS-laitteet varustetaan staattisella ohituskytkimellä. UPS-laitteet luokitellaan standardin ENV 50091-3:1998 määrittysten mukaisesti suorituskyvyn perusteella. [21]



Kuva 4-3. Line-interactive off-line UPS ja delta-muunnostekniikkaa hyödyntävä on-line UPS.



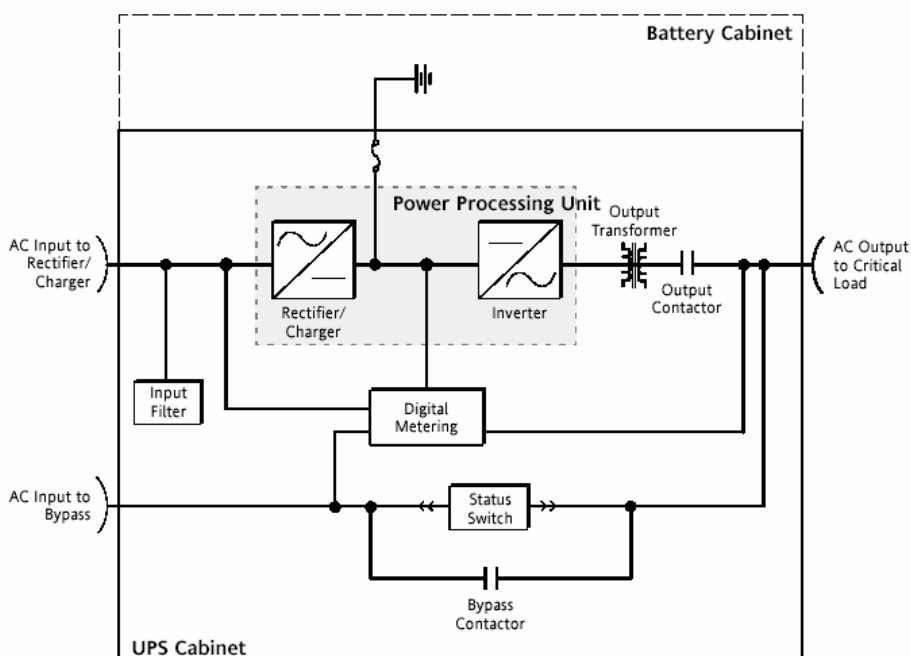
Kuva 4-4. Esimerkki kaksimuunnostekniikalla toteutetun on-line UPS-laitteen lohkokaa-
viosta. [3]

UPS-järjestelmien tarpeen ja siten myös käytön kasvaessa ovat järjestelmien hinnat lievästi laskeneet. UPS-järjestelmät ovat tulleet ”älykkäämmiksi”: niissä on enemmän ennakoivaa huoltoa tukevia piirteitä, kuten WEB-sivuille saatavat tiedot akkujen lataustilasta ja lämpötilasta ja tulevia tapahtumia ennakoivat oppivat ominaisuudet.

4.2.2 Suuret UPS-järjestelmät

Suuria UPS-järjestelmiä toimittavat mm. Powerware, American Power Conversion (APC), Toshiba International Group (–2 400 kVA), MGE ja Chloride Group.

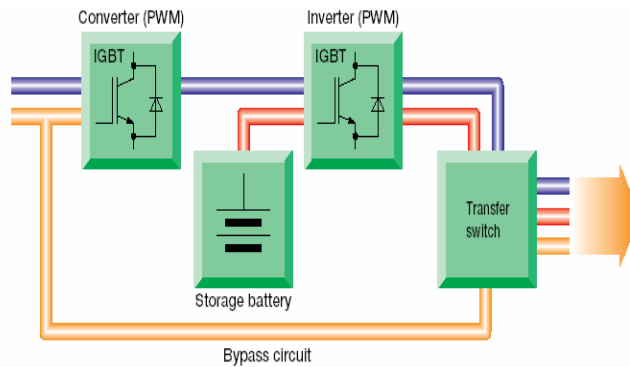
[Powerware](#) valmistaa UPS-tuotteita aina 615 kVA:iin asti. Esimerkiksi 9315-sarjan UPS-laitteen tehoalue on 300–625 kVA jännitealueelle 380/400/415 VAC. Back-up-aika on tyypillisesti 5–60 min ja laajennettavissa useisiin tunteihin asti. Päätoiminnot esitetään kuvassa 4-5. 9-sarjan UPS-laitteet suojaavat lähtöä yli- ja alijännitteiltä, kytkentätransienteilta, suuritaajuisilta häiriöiltä, taajuuden vaihteluilta ja harmoniselta säröltä.



Kuva 4-5. Powerwaren UPS-järjestelmän päätoiminnot. [Lähde: [Powerware 15.10.2004](#)]

[APC](#):n Silcon-sarjan 10–500 kVA/kW 3 x 380/400/415 V on-line UPS-järjestelmät voidaan varustaa ulkopuolisella akkujärjestelmällä 80 kW:n koosta lähtien. Silcon-sarjan tuotteissa on käytetty delta-muunnostekniikkaa. Hyötysuhde kasvaa 87,5 %–95 % kuorman kasvaessa 25 %–100 %. Järjestelmä ottaa verkosta sinimuotoista virtaa.

[Toshiba](#) valmistaa 3-vaiheisia on-line (kuva 4-6) UPS-laitteita 15–500 kVA. Esimerkiksi Toshiba 7000-sarjan UPSien tehoalue on 150–500 kVA ja rinnakkain asennettuna max. 3 MVA. Sekä tulo- että lähtövirta ovat sinimuotoisia.

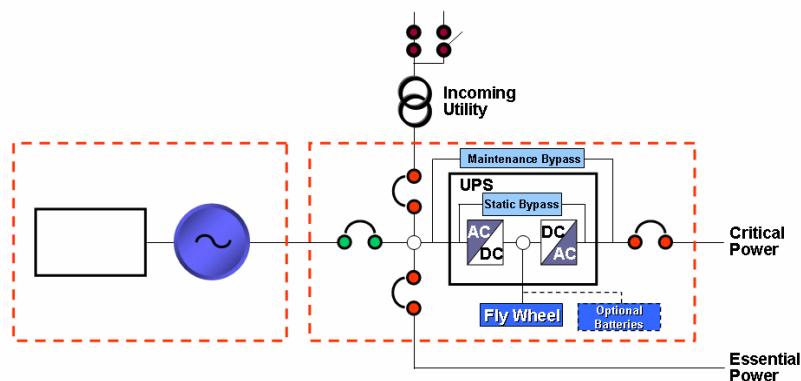


Kuva 4-6. Toshiba 7000-sarjan UPS-laitteen perustoiminnot. [Lähde: [Toshiba 15.10.2004](#)]

[MGE](#):n 3-vaiheisiin kaksimuunnostekniikkaa edustaviin on-line UPSeihin kuuluvan [Galaxy](#)-sarjan tuotteen tehoalue on 160–800 kVA ja jännitealueet 380 V / 415 V (208 V / 220 V / 480 V). UPSissa on harmonisten yliaaltojen suodatus. Back-up-aika voidaan valita kahdeksaan tuntiin asti. Tuotteessa on Upsilon STS staattinen vaihtokytkin ja synkronointimoduuli. Tuotteeseen on saatavissa kunnossapitoa ja hallintaa varten lisäohjelmia sekä asiantuntija- ja etäpalveluja.

[Chloride](#) kaksimuunnostekniikkaa edustavan 3-vaiheisen 90-NET-sarjan tehoalue on 60–800 kVA ja rinnakkaisten järjestelmien avulla aina 6,4 MVA:iin asti. Jännite-alue on 400 V \pm 15 % (380 V / 415 V). UPSiin on mahdollista integroida staattinen kytkin (250–1 250 A). Harmonisten yliaaltojen hallintaan voidaan käyttää 12-pulssiversiota tai suodattimia.

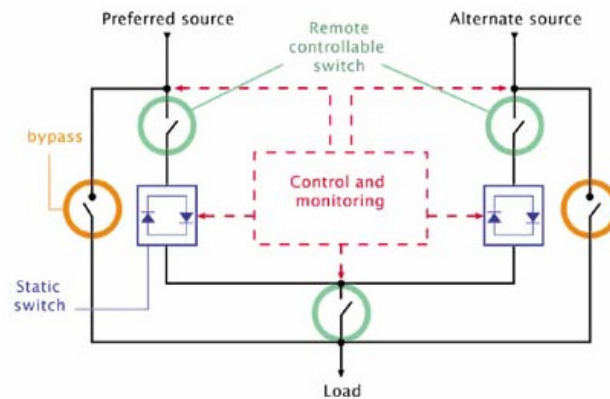
[GE](#) valmistaa SitePro-sarjan kaksimuunnostekniikan on-line UPS-laitteita 10–500 kVA 3 x 380/400/415 V jännitteille. Järjestelmä voidaan toteuttaa lyijy- tai NiCd-akuilla. GE:n Advanced Power System APS250–APS2000 koostuu dieselgeneraattorista (100–2 000 kW), kaksimuunnostekniikan on-line UPS-järjestelmästä (60–1 250 kVA) ja energiavarastona on akusto tai vauhtipyörä tai suuremmissa pelkästään vauhtipyörä-järjestelmä.



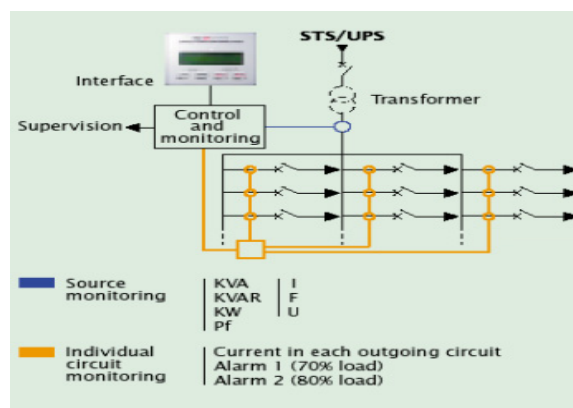
Kuva 4-7. GE:n APS-järjestelmän konfiguraatio. [Lähde: [GE](#)]

4.2.3 Staattiset vaihtokytkimet

Staattisia vaihtokytkimiä (Static Transfer Switch, STS) käytetään syöttölinjan vaihtoon mm. UPS-laitteistojen ja kahdennettujen järjestelmien yhteydessä. Perusteknologiaa on sovellettu jo kolmisenkymmentä vuotta lähinnä pienjännitteille alle 480 V. 1990-luvun puolivälissä tehoelektronikan kehittyessä staattisia vaihtokytkimiä on alettu valmistaa myös suuremmille jännitteille aina 38 kV:iin asti. Kytkimissä noudatetaan ns. break-before-make-toimintamallia, jossa syöttävät linjat eivät ole koskaan yhtä aikaa päällä. Kytkimeen liitetty automatiikka analysoi jatkuvasti kummankin syöttölinjan tilaa ja vaihtaa syötön sille linjalle, joka parhaiten vastaa annettuja kriteereitä (kuva 4-8). Automaattinen vaihto voi tapahtua esimerkiksi silloin, kun syöttävän verkon jännitteessä on häiriö tai ylivirtaa. Kytkimien vaihtoaika on tyypillisesti muutamia millisekunteja. Vaihtoaikaa koskevat vaatimukset on esitetty IEC:n standardissa 62040. Nopea vaihtoaika mahdollistaa mm. jännitekatkosten, -kuoppien ja särön hallitsemisen varasyötön tai UPSin kanssa.



Kuva 4-8. Esimerkki staattisen vaihtokytkimen toiminnallisista osista. [Lähde: [MGE](#)]



Kuva 4-9. Esimerkki staattiseen kytkimeen liittyvistä valvontatoiminnoista. [Lähde: [MGE](#) 18.10.2004]

Laitevalmistajat

Staattisia vaihtokytkimiä valmistaa mm. Powerware. Powerwaren [STS300](#)-sarjan kytkimien virta-alue on 100–800 A ja jännitealue 208/380/400/415/440/480 Vac, 3-vaiheisena 50/60 Hz. Hyötysuhde on ≥ 99 %. Vaihtoaika on ≤ 4 ms (break-before-make-periaate). STS300 HC -sarjan ominaisuudet ovat samat kuin STS300-sarjalla mutta virta-alueet ovat 1 000 A, 1 250 A, 1 600 A, 2 000 A, 3 000 A. Järjestelmään on saatavissa valvonta- ja diagnostiikkatoimintoja: graafinen ohjauspaneeli, hälytys- ja datahistoria ja tapahtumaloki, järjestelmän kaaviopaneeli, mittaukset (kVA, kW, tehokerroin, vaihekulma, virta, jännite ja taajuus) sekä RS232- ja RS 485 -liityntä Modbus-protokollalla.

[MGE](#):n UPSILON-vaihtokytkimien (kuva 4-8) virta-alueet ovat 30–600 A ja nimellisjännitteet 380 V (± 35 %) / 400 V / 415 V (± 20 %). Sallitut ylikuormitusarvot ovat 110 %/15 min–150 %/2 min–200 %/20 ms. 3- tai 4-napaisessa kytkimessä on seitsemän tehoaluetta.

[Toshiban](#) 7000-sarjan UPS-järjestelmään liittyvän vaihtokytkimen virta-alueet ovat 100–1 000 A.

[Chloriden](#) [CROSS](#) Static 3- tai 4-napaisen kennoon asennetun vaihtokytkimien virta-alue on 250–1 250 A ja erillisen koteloidun kytkimen virta-alue on 250–450 A. Nimellisjännite on 400 V. Ylikuormituskapasiteetti on 125 %/10 min, 150 %/1 min, 200 %/10 s, 6 000 A/1 s (250–800 A) ja 10 500 A/1s (1 250 A).

[GE](#) valmistaa [Digital Energy](#) -staattisia vaihtokytkimiä 400 V:lle ja 25–630 A:n virta-alueelle.

Muita staattisten vaihtokytkinten valmistajia ovat mm. Liebert (200–600 A) ja Cyberex Develops Industry (800–4 000 A, 208/480/600 V, 3-v.).

4.3 Loistehon ja harmonisten yliaaltojen hallinta

4.3.1 Yleistä

Suuret nopeasti vaihtelevat kuormat, kuten hitsauslaitteet, valokaariuunit ja suuret moottorit, aiheuttavat jännitteen nopeita vaihteluita (välkyntä, flikkeri) ja harmonisia yliaaltoja. Suurin syy jännitteen vaihteluihin on heikossa järjestelmässä syntynyt loisteho. Harmonisia aaltoja taas tuottavat epälineaariset kuormat mm. tasasuuntaajat, sähköhitsauslaitteet ja elektroniset moottorikäytöt. Harmoniset yliaallot aiheuttavat häviöitä muuntajissa ja moottoreissa ja voivat häiritä ohjausjärjestelmiä ja elektronisia laitteita.

Säätämällä loistehoa voidaan hallita verkon jännitetasoa ja minimoida verkon häviöt. Tuotannon ja siirron eriyttämisen jälkeen esimerkiksi kaupunkivoimalaitosten käyttämä loistehon kulutuksen säätö voimalaitoksen magnetointia säätämällä ei välttämättä ole enää mahdollista. Loistehotariffeja kiristämällä asiakkaat pyritään saamaan kompensoimaan omat loistehonsa, jolloin verkkoyhtiön kompensoitavaksi jää ainoastaan verkon kuluttama loisteho. Tuottamalla loistehoa paikallisesti voidaan verkkoa käyttää tehokkaammin, verkossa siirtyvän loistehon määrä pienenee eikä loisvirta kasvata syöttövirran rms-arvoa, joten häviöt ja jännitteen alenema pienenevät. Tyypillisin kompensointitapa Suomessa on rinnakkaiskompensointi, sarjakompensointia käytetään harvemmin. Sarjakompensointia käytetään lähinnä pitkillä siirtolinjoilla pienentämään jännitealenemaa. Myös erilaisia sarja- ja rinnankytkennän yhdistelmäratkaisuja on saatavissa. [4]

4.3.2 Kompensointilaitteita

Yksinkertaisimmillaan loistehon kompensointi hoidetaan laitteen tai laiteryhmän yhteyteen asennettavalla kiinteällä kompensointikondensaattoriparistolla. Yliaaltopitoisissa verkoissa voidaan resonanssi-ilmiön (ks. kaava 10) välttämiseksi käyttää kiinteää estokelaparistoa, jossa estokelakuristin on kytketty kondensaattorin kanssa sarjaan.

$$n = \sqrt{\frac{S_{SC}}{Q_C}}, \quad (10)$$

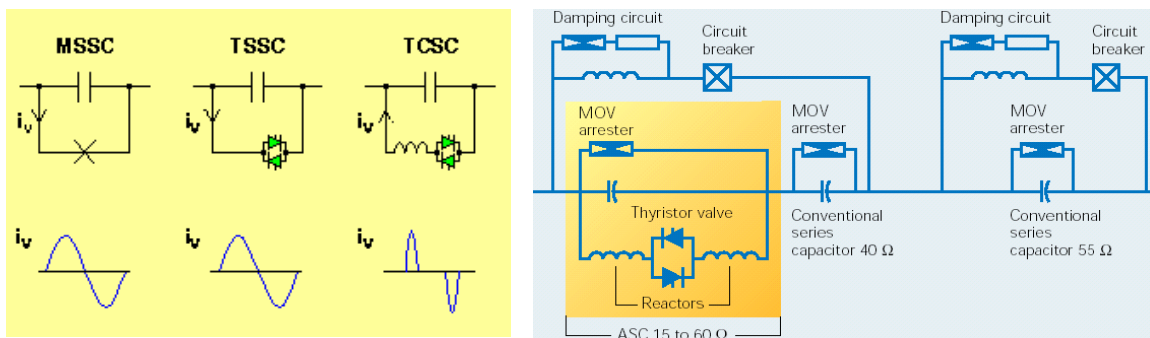
missä n on resonanssiriski n :lle harmoniselle yliaallolle, S_{SC} on verkon oikosulkuteho ja Q_C on loisteho.

Keskitetty kompensointi tehdään yleensä automaattisesti portaittain toimivalla järjestelmällä. Isompien järjestelmien kompensointiin käytetään erityyppisiä automaattisia kompensointijärjestelmiä, jotka loistehon hallinnan lisäksi voivat hoitaa myös muita sähkön laadun hallinnan toimintoja, kuten flikkerin ja harmonisten yliaaltojen hallintaa. Pyörivien kompensointilaitteiden, kuten tahtimoottorien ja generaattorien, rinnalle ovat tulleet ns. staattiset tehoelektroniikkaan perustuvat kompensointilaitteet. Uusinta tekniikkaa edustava pyörivä tahtikompensointilaitte perustuu korkean lämpötilan suprajohtavaan tekniikkaan. Staattisia kompensointilaitteita on periaatteessa kahta eri tyyppiä: a) tyristorikytketyt kondensaattorit ja tyristoriohjatut kuristimet sekä b) jännitelähdekonvertterit. Tyristorikytkettyjä tai ohjattuja kompensointilaitteita on saatavissa pienjännitteillekin, mutta niitä käytetään tyypillisesti yli 5 kV:n jännitteillä ja suurilla tehoilla alkaen 5 MVA:sta. Suurten vesijäähdytteisten tyristorien, suurten kuristimien ja kondensaattoriparistojen takia laitteet asennetaan tyypillisesti jakeluasemien yhteyteen. Jännitelähdekonvertterit, joissa käytetään IGBT (Integrated Gate Bipolar Transistor) tai IGCT (Integrated Gate Commutated Thyristor) -tekniikkaa, ovat pienihäviöisiä ja mo-

dulaarisen rakenteensa takia pienempikokoisia kuin muut staattiset kompensointilaitteet. Rinnakkaiskompensointitekniikkaa pulssileveysmoduloidulla taajuusmuuttajalla kutsutaan yleensä STATCOM- tai DSTATCOM-tekniikaksi.

4.3.2.1 Sarjakompensointilaitteet (MSSC, TSC, TCSC, SSSC)

Sarjakompensointilaitetyyppejä ovat mekaanisesti kytketyt sarjakondensaattorit (Mechanically Switched Series Capacitors, MSSC), tyristorikytketyt sarjakondensaattorit (Thyristor Switched Capacitors, TSC) ja tyristoriohjatut sarjakondensaattorit (Thyristor Controlled Series Capacitors, TCSC). Lisäksi tehdään näiden tuotteiden yhdistelmiä erilaisilla suojauspiireillä varustettuna (kuva 4-10). Staattinen tahtisarjakompensaattori (Static Synchronous Series Compensator, SSSC) säätää siirtolinjan reaktanssia liittämällä kompensoivan jännitteen sarjaan verkon kanssa ja 90° vaihe-erolla verkon virran kanssa. Yhdistämällä energiavaroja SSSC:hen voidaan jännitettä tukea tehokkaammin ja saavutetaan parempi jännitteen stabiilisuus.

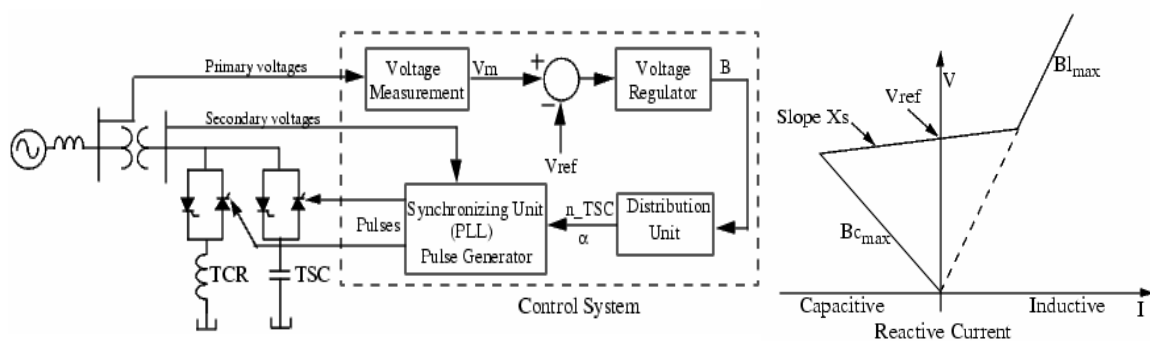


Kuva 4-10. Sarjakompensointilaitetyyppejä. [Lähde: [ABB](#) ja [Siemens](#)]

Nokian Capacitors valmistaa [sarjakondensaattoreita](#) myös tyristoriohjattuna.

4.3.2.2 Rinnakkaiskompensointilaitteet (SVC, TSC, TCR, STATCOM, DSTATCOM)

Rinnakkaiskompensoinnissa käytetään kuristinta tai kondensaattoria, joka voi olla portaittain tai jatkuvasti ohjattavissa. Tyristoriohjattuja staattisia kompensointilaitteita (Static Var Compensator, SVC) on kahta päätyyppiä: tyristorikytkettyjä kondensaattoreita (Thyristor-Switched Capacitors, TSC) ja tyristoriohjattuja kuristimia (Thyristor-Controlled Reactors, TCR). Loistehon hallintaan käytetään myös näiden yhdistelmiä, kuten TSR-TSC- ja TCR-TSC-suotimet.

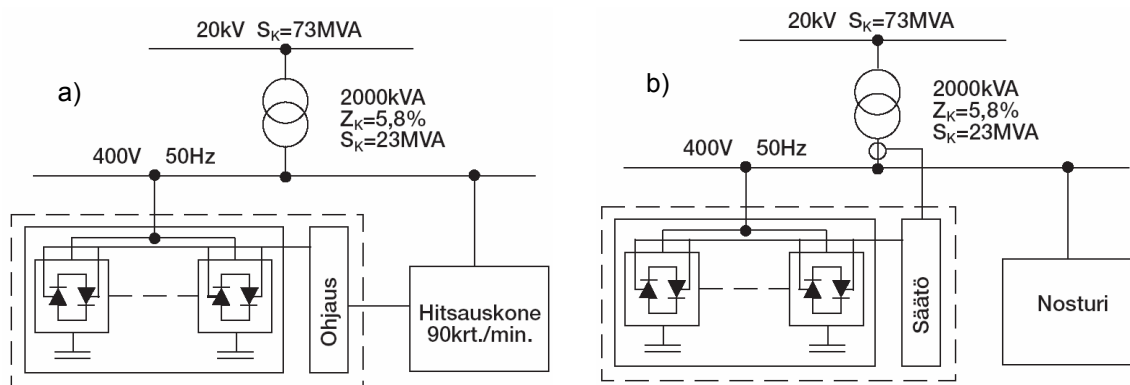


Kuva 4-11. Esimerkki staattisen rinnakkaiskompensointijärjestelmäyhdistelmän TCR-TSC konfiguraatiosta ja virta-jännitekarakteristikasta. [Lähde: [Mathworks](#)]

Tyristoriohjatun kuristimen etuna on portaattomasti säädettävä loistehon hallinta. Laitetta käytetään myös on-off-tyyppisenä (Thyristor-Switched Reactor, TSR). Laite tuottaa harmonisia yliaaltoja, joten sen yhteydessä käytetään tyypillisesti harmonisia suotimia (Harmonic Filter, HF). Tyristorikytketty kondensaattori ohjaa portaittain kapasitiivista reaktanssia. Tyristorikytketty kondensaattori soveltuu nopeaan tehokertoimen kompensointiin ja transienttien hallintaan. Tyypillisiä käyttökohteita ovat laitteet, joissa kuormitus muuttuu nopeasti ja jotka vaativat suuria määriä loistehoa, kuten suuret moottorit, hitsauskoneet ja nostolaitteet. Nopeasti muuttuvat kuormat aiheuttavat syöttöjännitteeseen kuopan, jonka suuruus riippuu kuormituksen tehosta sekä syöttävän verkon oikosulkutehosta. Nopealla tyristorikytketyllä kondensaattorilla voidaan pienentää jakeluverkkoon syntyvien häiriöiden suuruutta. Tyristorikytkennällä kondensaattori voidaan kytkeä päälle ja pois jopa alle jakson vasteajalla ilman transienttia, sillä kytkentä tapahtuu hetkellä, jolloin verkon ja kondensaattorin jännite on sama. Tyristorikytkettyjä kondensaattoreita valmistavat mm. ABB ja Nokian Capacitors.

ABB:n [Dynacompin](#) nimellisjännitealue on 220–690 V, 50/60 Hz joko 3- tai 1-vaiheisena. Loistehoa saadaan portaittain enimmillään 500 kVAR:n portaitailla. Kytkentänopeus voi olla < 20 ms.

Nokian Capacitors valmistaa [tyristorikytkettyä kondensaattoriparistoa](#) jännitealueelle 400–690 V. Porrasteho on 50–300 kVar. Pariston jokainen porras koostuu kondensaattorin ja kuristimen sarjakytkennästä. Nämä muodostavat sarjaresonanssiipiirin, jonka virtataajuus on alempi kuin verkossa esiintyvä alin yliaaltotaajuus. Pariston ohjaus voidaan ottaa joko suoraan kompensoitavasta laitteesta tai verkosta (kuva 4-12). Kompensoitavat laitteet voivat olla symmetrisiä tai epäsymmetrisiä pää- tai vaihejännitteeseen kytkettyjä kuormituksia.



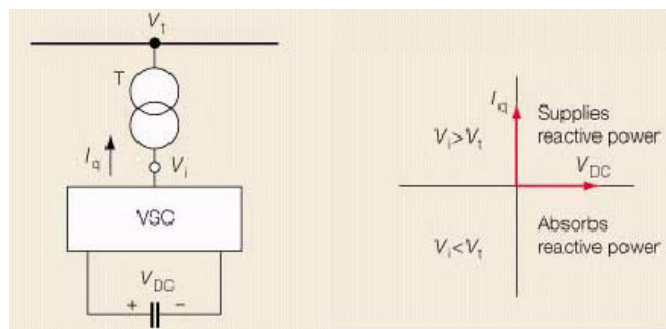
Kuva 4-12. Esimerkki a) kuorman ohjaaman pariston ja b) loistehon ohjaaman pariston kytkennästä. [Lähde: [Nokian Capacitors](#)]

Tarvittava kompensointiteho Q kohdassa a) voidaan laskea kaavasta

$$Q = S_k \Delta U(\%), \quad (11)$$

missä ΔU on kuormituksen aiheuttama jännitteen alenema liityntäpisteessä ja S_k on oikosulkuteho liityntäpisteessä.

Staattinen synkronikompensoattori STATCOM tai D-STATCOM koostuu jännitelähdekonvertterista (Voltage Source Converter, VSC), joka toimii kuten invertteri käyttäen DC-lähteenä kondensaattoreita. Se toimii staattisen loistehon säätimen tavoin säätelemällä jännitettä syöttämällä loisvirtaa verkkoon. STATCOM liitetään verkkoon muuntajan välityksellä. Laitteella voidaan säätää jännitteen suuruutta mutta ei vaihekulmaa. Jos invertterin AC-puolen jännite on pienempi kuin järjestelmän jännite, loisteho absorboidaan ja päinvastaisessa tapauksessa loistehoa tuotetaan. Siirtoverkossa STATCOMin toiminnot ovat pitkälle samat kuin staattisen loistehon säätimen: jännitteen tuki ja säätö, jännitestabiilisuuden parantaminen ja parantunut synkroninen stabiilisuus ja siirtokapasiteetti. Lisäpiirteinä saadaan, etenkin jos invertteri on pulssileveysmoduloitu, parantunut dynaaminen kuormitustasapaino, parantunut flikkerin säätö ja nopeampi vaste kuorman kompensoinnissa. Suurin etu saavutetaan STATCOMin käytöllä järjestelmissä, joissa tarvitaan tehokasta jännitteen välkynnän kompensointia, kuten valokaariuuni-yhteydessä. Kun STATCOM varustetaan energiavarastolla, saavutetaan tehokkaampi välkynnän ja transienttien hallinta ja voidaan hallita myös pätötehoa. [11 ja 12] (Ks. kuva 4-13.)



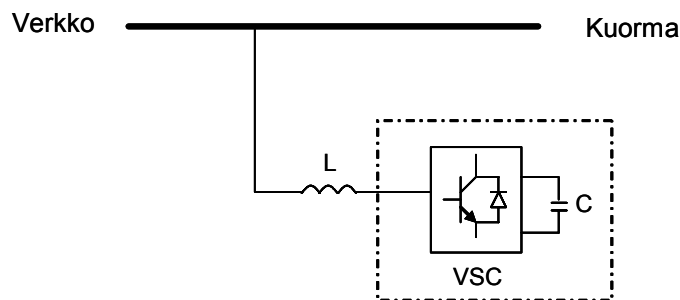
Kuva 4-13. STATCOM-järjestelmän kokoonpano ja ohjausperiaate. [12]

ABB valmistaa STATCOM-tuotetta SVC Light -nimikkeellä. Esimerkiksi 0–44 MVar, 10,5 kV:n järjestelmä on ollut toiminnassa vuodesta 1999 Uddeholm Tooling AB:n te-rästehtaalla Hagforsissa, Ruotsissa. ABB:n [MiniComp](#)-tuotetta valmistetaan sekä pien-että keskijännitteelle 400–600 V tai 4,16 kV–132 kV, loistealueelle ± 300 kVAr– ± 20 MVar. MINICOMP-tuotteessa on jännitelähdekonvertteri, jossa käytetään IGBT- tai IGCT-tekniikkaa. Kondensaattori voi olla kiinteä tai kytkettävä.

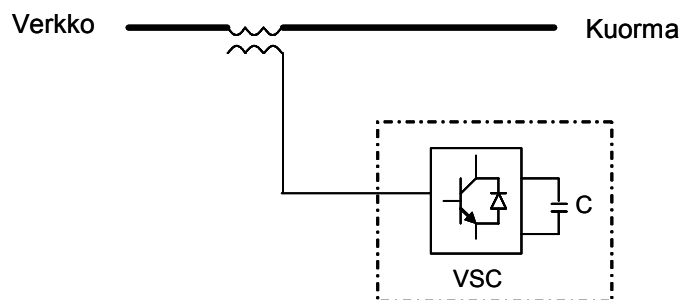
American Superconductor valmistaa 10 MVar:n dynaamista tahtikompensaattoria [SuperVAr](#), jonka toiminta perustuu korkean lämpötilan suprajohtavaan tekniikkaan.

4.3.3 Aktiivisuotimet

Harmonisten virtojen suodattamiseen verkosta käytetään sekä passiivisia että aktiivisia suotimia. Passiivisuodin koostuu sarjassa olevista LC-suotimista, joista jokainen on viritetty tietylle harmoniselle yliaallolle. Passiivisuodin on usein yhdistetty high-pass-suotimeen, joka poistaa korkeamman kertaluvun yliaallot. Passiivisuodinten ongelmana on niiden voimakas riippuvuus järjestelmän impedanssista, johon vaikuttavat sekä verkon konfiguraatio että kuormat. Aktiivisuotimia käytetään suurten epälineaaristen kuormien verkkoon aiheuttamien harmonisten aaltojen ja loistehon hallintaan [11]. Aktiivisuotimen konfiguraatioon ja ohjaukseen on esitetty lukuisia ratkaisuja. Kolmivaiheverkossa voidaan aktiivisuotimena käyttää 3-vaiheista invertteriä kondensaattoriyksikön kanssa. Harmonisten virtojen ja loistehon kompensointia suoritetaan erilaisten suodatalgoritmien avulla [13]. Aktiivisuotimet voidaan jakaa DC- ja AC-suotimiin. Rinnan-kytketyn AC-suotimen tyypillisin versio perustuu jännitelähdekonvertteriin (VSC, voltage source converter), joka koostuu DC-piirin kondensaattorista, tehoelektronikasta ja kuristimesta (kuva 4-14). Sarja-aktiivisuodin on kytketty sarjaan linjaa syöttävän muun-tajan kanssa (kuva 4-15).



Kuva 4-14. Rinnankytketyn aktiivisuotimen konfiguraatio.



Kuva 4-15. Sarjaan kytketyn aktiivisuotimen konfiguraatio.

Aktiivisuodinlaitteet

[Nokian Capacitors](#) valmistaa [MaxSine](#)-aktiivisuodinta harmonisten yliaaltojen ja loistehon kompensointiin. MaxSine perustuu suoraan vaihevirtaohjaukseen, Direct Phase Current Control (DPPCC). Jännite on 3 x 400 V +10 % –20 %, taajuus on 50 Hz tai 60 Hz, ± 2 % ja ylikuormituskestoisuus 1,2 x IRMS (dynaaminen). KytKentätaajuus on 10 kHz (keskimääräinen). Nimellistehot ovat 17–100 kVA, vasteaika on < 1 ms, kolmivaiheinen yliaaltovirtojen kompensointi 50. harmoniseen saakka.

ABB valmistaa pienjännitteelle [PQFA](#) aktiivisuotimia nimellisjännitteille 400–600 V, 50/60 Hz. 50 Hz:n järjestelmä kykenee suodattamaan harmonisia yliaaltoja 20:een asti ja ohjelmoitavana 50:een asti. Tehokerroin on ohjelmoitavissa 0,7 induktiivisesta 0,7 kapasitiiviseen. Vasteaika on 40 ms. Tehonkulutus on < 7 kW/moduuli (max. 8 moduulia/järjestelmä).

4.4 Jännitetason, ylijännitteiden, jännitekuoppien ja katkosten hallinta

Siirtoverkon jännitteen säädön hoitaa kantaverkkoyhtiö aluesäätöä käyttäen. Jakeluverkon jännitteen hallinta käsittää jännitteen tason, jännitteen vaihtelun, transienttien ja

jännite-epätasapainon hallintaa. Jakeluverkon jännitetaso voidaan päättää sähkölaitoskohtaisesti. Jakeluverkon jännitteen alenema voidaan laskea kaavan (12) mukaan:

$$U_h = \frac{100}{U_v} I(R \cos \varphi + X \sin \varphi), \quad (12)$$

missä U_h on johtimen suhteellinen jännitealenema, U_v on vaihejännite, I on kuormitusvirta, R on johtimen resistanssi, X on johtimen reaktanssi ja φ on kuormanvaihesiirtokulma.

Jakeluverkon jännitteen perussäätö tehdään sähköaseman päämuuntajan yläjännitteen puolella olevalla käämikytkimellä, jota ohjaa jänniteensäätäjä. Jännitteen alenema jakelumuuntajassa lasketaan kaava (13) mukaan:

$$U_h = \frac{S}{S_n} (r_k \cos \varphi + x_k \sin \varphi + \frac{(x_k \cos \varphi - r_k \sin \varphi)^2}{200}), \quad (13)$$

missä U_h on muuntajan suhteellinen jännitealenema, S on muuntajan kuorma, S_n on muuntajan nimellisteho, r_k on muuntajan oikosulkuresistanssi, x_k on muuntajan oikosulkureaktanssi ja φ on muuntajan kuorman vaihesiirtokulma. Säätäjä voi olla käsinohjattava, tai se voi toimia automaattisesti esimerkiksi vuodenajan mukaan tai sakkofunktion ohjaamana. Kääminkytkimiä on kolme perustyyppiä: lineaarinen, plus-miinus- ja karkea-hienosäätötyypit. Jänniteportaat riippuvat muuntajan käämityksen ulosotoista. Käämikytkintä käytetään tasaamaan siirtoverkon jännitevaihteluja ja kuormituksen muuntajassa aiheuttamaa jännitteenalenemaa. Keski-jänniteverkossa syntyneitä jännitteenalenemaa voidaan kompensoida myös jakelumuuntajien väliottokytkimen avulla silloin, kun muuntaja on jännitteetön. [8]

Jännitteen hetkelliset vaihtelut, jännitekuopat ja ylijännitteet sekä jännitekatkokset ovat kriittisimmät sähkön laadun ongelmista sekä teollisuuden että yleisen sähkönjakelun puolella. Pienitaajuisilta eli hitaasti nousevilta ylijännitteiltä voidaan suojautua käyttämällä jännitteen säätöä, relesuojasta, maadoittamista sekä ennaltaehkäisyä verkon huolellisella suunnittelulla. Paras tapa suojautua kytkentäylijännitteiltä on ennaltaehkäisy kehittämällä itse kytkinlaitetta, mutta kyseeseen tulevat myös ylijännitesuojat. Ilmastollisia ylijännitteitä vastaan ei voida soveltaa ennaltaehkäisyä, vaan niitä vastaan suojaututaan ylijännitesuojilla sekä ukkosjohtimilla. [32]

Ylijännitesuojat asennetaan normaalisti vaihejohtimen ja maan välille, jolloin johtimen ylijännite pääsee purkautumaan suojan kautta maahan. Suojia on käytössä kahdenlaisia: kipinävälisuoja ja venttiilisuoja. Kipinävälisuoja muodostuu kahdesta johtavasta elektrodista, jotka on asennettu sopivan etäisyyden päähän toisistaan. Ylijännitteen saapuessa

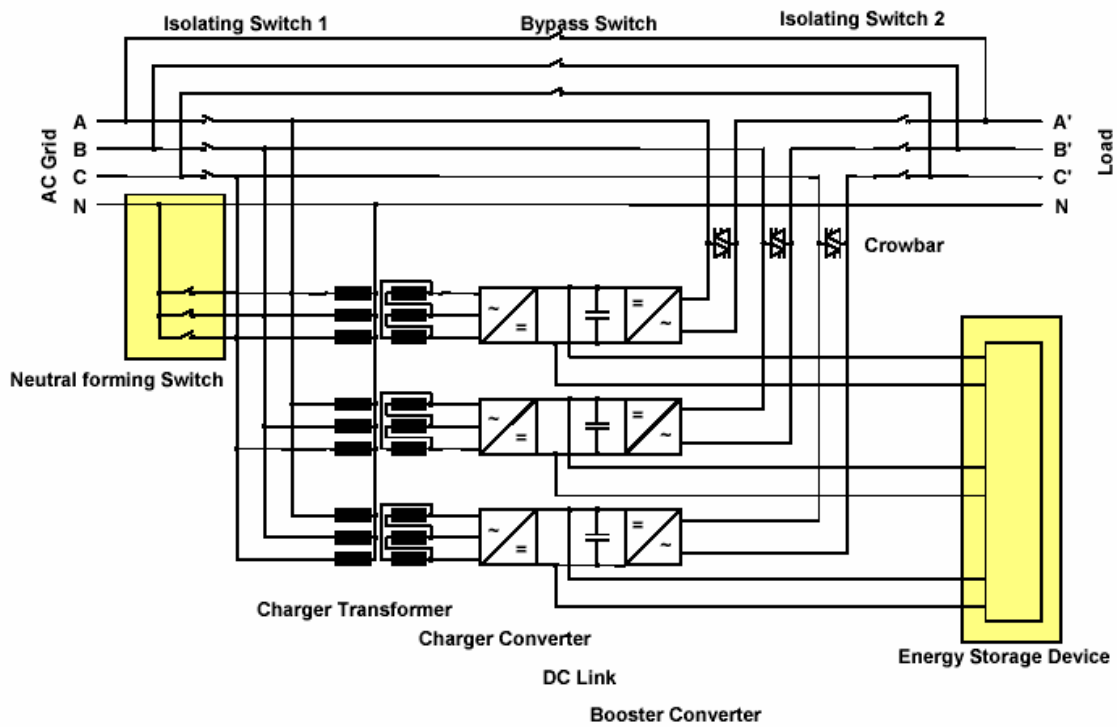
tapahtuu purkaus elektrodien välillä, ja virta purkautuu johtimia pitkin maahan. Kipinävälin huonoina puolina ovat ilmastoriippuvuus sekä sen aiheuttama maasulku ja sähkökatkos. Tämä johtuu siitä, että valokaari ei sammuu ennen kuin jännite on laskenut lähelle nollaa. Hyvänä puolena on kipinävälin yksinkertaisuus ja halpa hinta. Venttiilisuojan muodostaa metallioksidista (ZnO) valmistettu epälineaarinen vastus. Sen hyvänä ominaisuutena on virran katkeaminen lähes heti, kun jännite on laskenut hieman alle nimellisen. Se ei siis aiheuta jakelukeskeytystä. Vaikka venttiilisuojia on kipinäväliä huomattavasti kalliimpi, asennetaan uusiin jakelumuuntajiin lähes yksinomaan venttiilisuojia.

Suurin syy jännitekuoppiin on joko paikallis- tai jakeluverkossa tapahtunut oikosulku. Lyhytaikaisten jännitekuoppien aiheuttamia ongelmia voidaan välttää mm. parantamalla laitteiden jännitevaihteluiden sietokykyä. Pitempiaikaisia jännitekuoppia ja katkoksia voidaan estää ja vähentää jakelujärjestelmän rakenteella, suojauksella ja nopeuttamalla vianpoistotoimia [11,14,15,16]. Useimmissa tapauksissa ei kuitenkaan voida vaikuttaa laitteiston eikä verkon rakenteeseen, vaan jännitekuoppien ja katkosten hallintaan joudutaan käyttämään erillisiä laitteita, kuten Series Voltage Restorer (SVR) ja Dynamic Voltage Restorer ([DVR](#))-tekniikoita. Myös muilla sähkön laadun hallintaan kehitetyillä laitteilla, kuten DSTATCOMilla, voidaan hoitaa jännitekuoppia. Katkosten hallintaan tarvitaan energian varastointijärjestelmä, esimerkiksi akkujärjestelmä (Battery Energy Storage System, BESS).

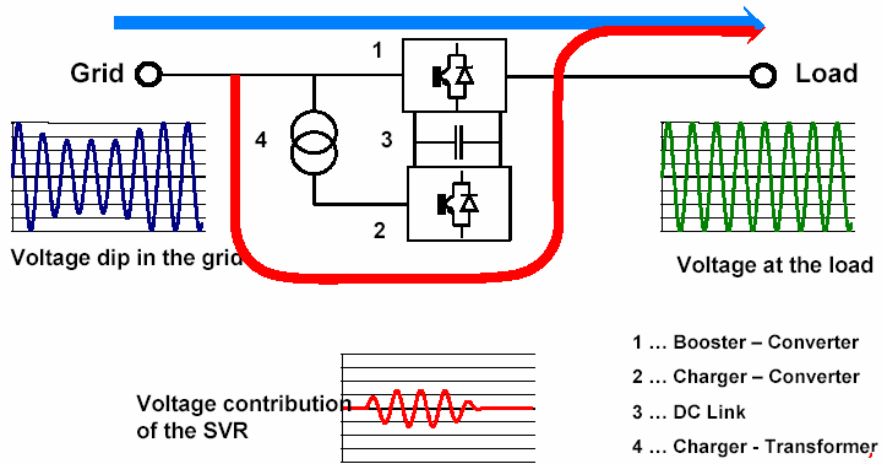
DVR on staattinen sarjakompensaattori (Static Series Compensator, SSC), joka tuottaa vaihtojännitettä ja syöttää sen sarjassa syöttäjännitteen kanssa muuntajan välityksellä. DSTATCOM toimii rinnakkaisperiaatteella tuottaen vaihtojännitettä, joka aiheuttaa järjestelmään virtalisäyksen rinnankytketyn muuntajan kautta. Sekä DVR että DSTATCOM voivat tuottaa loistehoa, mutta pätötehon syöttöä varten ne tarvitsevat energiavaraston tai muun lisäenergian lähteen.

SVR- (kuva 4-16) ja DVR-laitteita käytetään tyypillisesti sellaisen teollisuuden yhteydessä, jossa jännitevaihteluiden aiheuttamat hetkellisetkin katkokset voivat aiheuttaa vaaratilanteita tai merkittäviä lisäkustannuksia, joita syntyy esimerkiksi prosessin alasajon ja uudelleenkäynnistyksen sekä tuotantomentyksen yhteydessä. Tällaisia teollisuuskohteita on mm. puolijohdeteollisuus, lasi- ja muoviteollisuus, lääketeollisuus, petrokemian teollisuus ja paperiteollisuus.

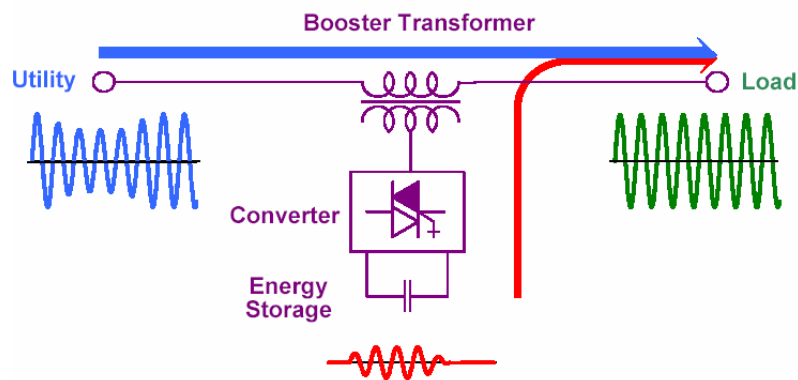
SVR tuottaa jännitekuopan aikana puuttuvan jännitteen tehollähteen avulla (kuva 4-17). [SVR](#) ei tarvitse erillistä energiavarastoa jännitekuoppien hallintaa varten, mutta silloin kompensointikyky on rajoitettu. Kaupallisissa DVR-tuotteissa käytetään yleensä suuria kondensaattorijärjestelmiä riittävän energian tuottamiseksi [11]. (Ks. kuva 4-18.)



Kuva 4-16. Esimerkki SVR-laitteen konfiguraatiosta, jossa optiona voi olla suurempi energiavaroasto. [Lähde: [ABB](#)]



Kuva 4-17. Jännitekuopan hallinta SVR-laitteella. [Lähde: [ABB](#)]



Kuva 4-18. Jännitekuopan hallinta DVR-laitteella. [Lähde: [ABB](#)]

Jännitteen hallintalaitteiden laitevalmistajia

ABB valmistaa laitetta [SVR 1500](#), jonka nimellisjännite on 380–600 V, virta 1 800 A ja vikavirtakestoisuus 30 kA. Vasteaika on tyypillisesti < 1 ms. Laite voi kompensoida jännitettä 100 %:n kuormalla 1-vaiheisena 50 % ja 3-vaiheisena 40 % sekä 50 % kuormalla 55 % 3-vaiheisena. Ylijännitteen kompensointikyky on > 115 % 3-vaiheisena. Optiona on saatavissa jatkuva jännitteen säätö, tehokertoimen korjaus ja etämonitorointi.

Siemens valmistaa pienjännitteelle sarjakytkeäistä laitetta [SIPCON DVR LV](#), jonka nimellisteho on 25–1 000 kVA, jännite < 1 000 V. DVR LV -toimintoja ovat aktiivinen jännitteen säätö sekä kuoppien ja hetkellisten ylijännitteiden hallinta. Rinnakkaiskytkentäisen SIPCON DSTATCOM LV:n nimellisarvot ovat DVR LV:tä vastaavat ja laitteen toimintoihin kuuluu aktiivinen jännitteen hallinta sekä tehokertoimen, harmonisten yliaaltojen ja flikkerin hallinta. Myös keskijännitesovelluksiin on saatavissa vastaavia tuotteita.

[S&C Electric Company](#) valmistaa PureWave DVR 2–36 MVA, 69 kV:iin asti. DVR suojaa kriittiset kuormat 120 MVA:iin asti.

American Superconductor valmistaa [D-VAR](#) dynaamista jännitteensäätöjärjestelmää. Järjestelmä tuottaa jatkuvasti 1–8 MVar ja hetkellisesti 24 MVar yksikköä kohden. Nimellisjännitealue on 480 V–35 kV. Laite perustuu IGBT-tekniikalla toteutettuun invertteriin ja kondensaattoreihin. [D-SMES](#) on rinnankytketty järjestelmä, joka tuottaa sekä lois- että pätoitehoita. Laite toteutetaan 4-kvartantin IGBT-tekniikkaa sisältävillä 250 kW:n invertterilohkoilla. Invertterin hetkellinen ylikuormituskapasiteetti on 2,3 kertaa nimellisvirta, ja se voidaan konfiguroida jatkuvaan VAR-säätöön. Tuote voidaan varustaa optiona SMES (Superconducting Magnetic Energy Storage) -energiavarastointijärjestelmällä käyttäen 3 MJ:n yksikköjä. Järjestelmät voidaan toimittaa trailereihin asennettuna.

4.5 Sähkön laadun hallinnan uudet laitekoneptit ja tehoelektronikan komponenttikehitys

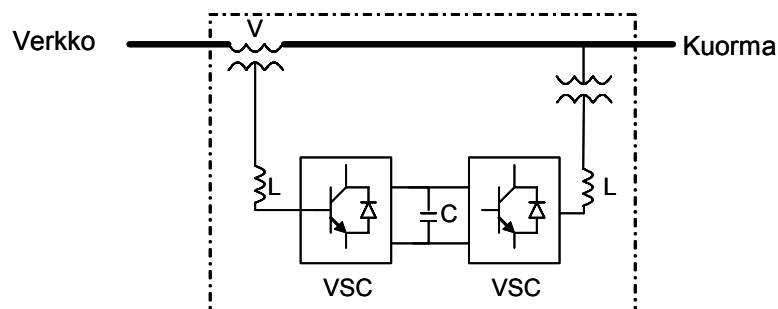
Viimeisimmät sähkön laadun hallinnan laitteet pyrkivät kattamaan laajasti sähkön laadun ongelmien hallinnan toiminnot. Erityyppisten sähkön laadun hallintalaitteiden yhdistelmällä voidaan saavuttaa monipuoliset ominaisuudet omaava sekä teknisesti että taloudellisesti optimaalinen järjestelmä.

4.5.1 Laitteiden yhdistelmäkonseptit

Yhdistetty sähkön laadun hallintalaite (Unified Power Quality Conditioner, UPQC) -konsepti demonstroitiin ensi kertaa vuonna 1998. Muita yhdistettyjä sähkön laadun hallinnan konsepteja ovat

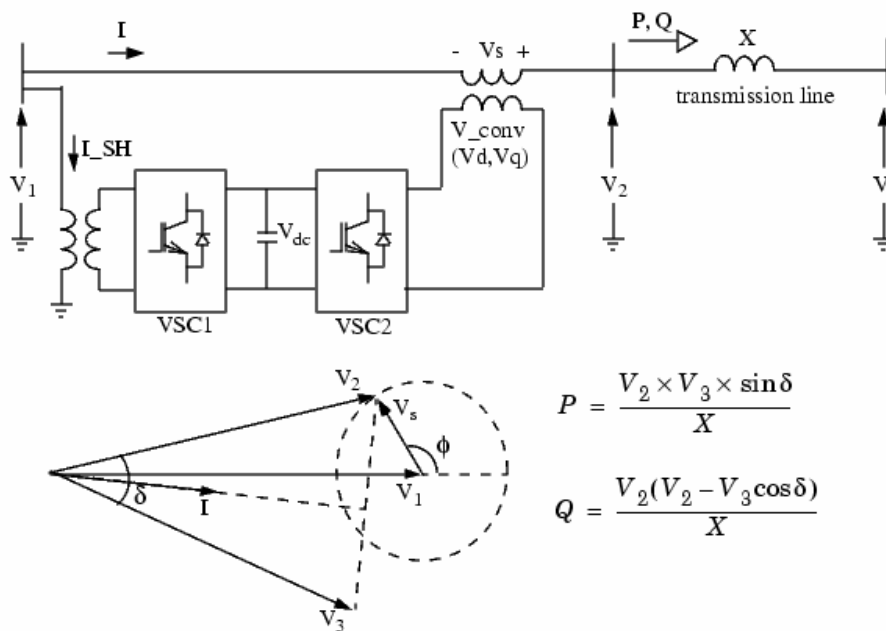
- Unified Power Flow Controller (UPFC)
- Universal Power Line Conditioner (UPLC)
- Interline Power Flow Controller (IPFC).

UPQC-toiminnot kattavat sellaiset sähkön laatuun liittyvät ilmiöt kuten jännitekuopat, hetkelliset ylijännitteet, jännite-epätasapainon, flikkerin, harmoniset ja loisvirrat. UPQC muodostuu kahdesta jännitelähdekonvertterista, joilla on yhteinen kapasitiivinen DC-välipiiri. Toinen konverttereista on kytketty rinnan ja toinen sarjaan verkon kanssa (kuva 4-19) [4]. Kyseessä on itse asiassa hybridityyppinen aktiivisuodin tai aktiivisuodinpassiivisuodin yhdistelmä. Sarjaankytketty aktiivisuodin hoitaa jännitteen säädön (kuopat tai hetkelliset ylijännitteet ja jännitteen harmoniset yliaallot), flikkerin ja jännite-epätasapainon hallinnan toiminnot ja rinnankytketty aktiivisuodin hoitaa harmonisten virtojen suodatuksen ja/tai loistehon säädön ja DC-välipiirin virran säädön. Kytkenästä ja laitteen ohjausjärjestelmästä on sittemmin tehty useita kehitelmiä.



Kuva 4-19. Aktiivisuotimet sähkön laadun hallintajärjestelmänä (UPQC).

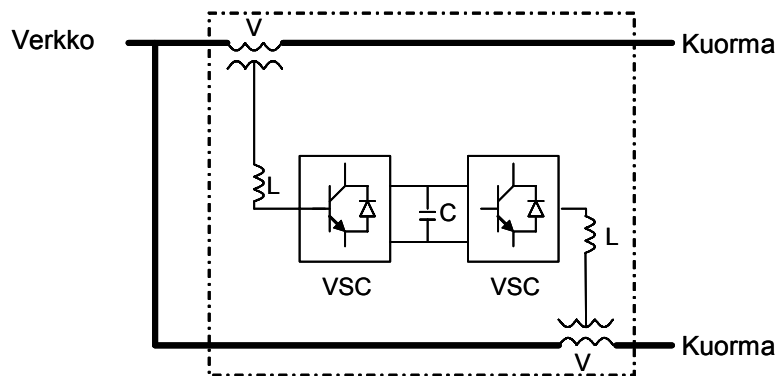
UPFC on STATCOMin ja staattisen tahtisarjakompensaattorin yhdistelmä (kuva 4-20). UPFC:lla saadaan jatkuva pätö- ja loistehon kompensointi ja tehon hallinnan dynamiikka voidaan parantaa lisäämällä järjestelmään energiavarasto.



Kuva 4-20. UPFC:n konfiguraatio ja virta-jännitediagrammi. [Lähde: [Mathworks](#)]

Siemens valmistaa SIPCON-U-tuotenimellä UPFC-järjestelmää yhdistelmänä SIPCON-P (rinnakkaiskompensaattori) ja SIPCON-S (sarjakompensaattori).

UPLC on UPFC:n ja UPQC:n yhdistelmä. IPFC on kahden siirtolinjan tehon hallintajärjestelmä (kuva 4-21), jossa kumpaankin linjaan on kytketty staattinen tahtisarjakompensaattori ja kompensaattorit ovat yhteydessä toisiinsa kapasitiivisen DC-välipiirinsä välityksellä.

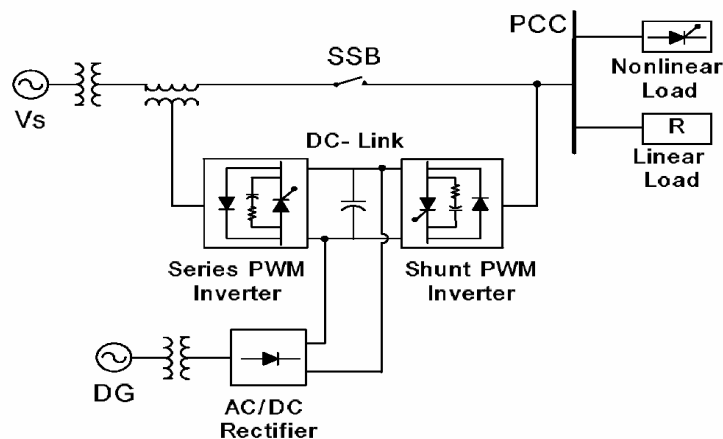


Kuva 4-21. Kahden siirtolinjan tehonhallintajärjestelmänkonsepti IPFC.

Perus-UPQC:n huonona puolena on rajoitettu energiavarasto, joten laite pystyy syöttämään vain rajoitetusti pätötehoa. Vapautuneiden energiamarkkinoiden ja hajautetun tuotannon edistyessä kasvaa asiakkaiden tarve suunnitella omaa energian tuotantoaan ja kulutustaan. UPQC varustettuna energiavarastolla antaa mahdollisuuden myös energian hallintaan. Tarvittava energia voidaan tuottaa myös UPQC:n yhteydessä olevalla generaattorilla.

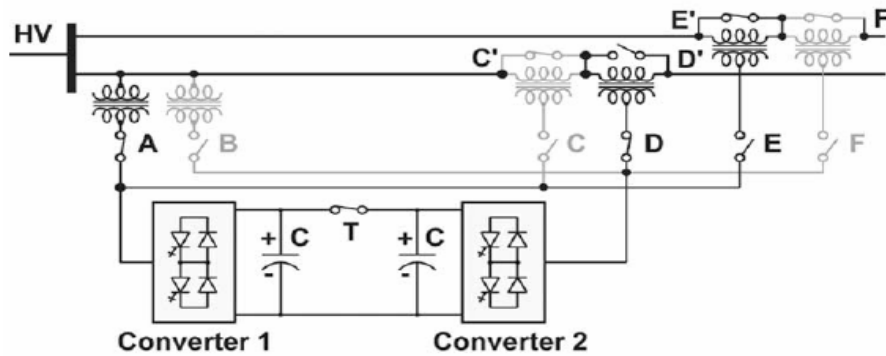
4.5.2 Monitoimiset muunneltavat laitteet

Park et al. [17] esittävät UPQC:n hajautetun tuotannon version (**Multi-functional Dispersed Generation, MDG**), jossa generaattori on yhdistetty invertterin kautta UPQC:n DC-välipiiriin (kuva 4-22). Tällöin normaalitilanteessa sarjaan kytketty invertteri säätelee kuorman jännitettä ja rinnankytketty invertteri syöttää tehoa kuormaan, suodattaa harmonisia virtoja ja estää tehon virtauksen vastasuuntaan. Saarekekäytössä sarjaankytketyllä invertterillä ei ole toimintoja ja rinnankytketty invertteri hoitaa jännitteen säädön ja syöttää tehoa verkkoon.



Kuva 4-22. UPQC:n hajautetun tuotannon MDG-versio. [17]

Muunneltava staattinen kompensattori (Convertible Static Compensator, CSC) koostuu kahdesta invertteristä, muuntajista ja kondensaattoreista (kuva 4-23). CFC:stä voidaan konfiguroida 11 erityyppistä kompensattoria, mm. UPFC, IPFC, STATCOM ja SSSC. Järjestelmään voidaan liittää myös energiavarasto, kuten akusto tai SMES-järjestelmä, parantamaan järjestelmän toimintaa, esimerkiksi stabilointiominaisuuksia.



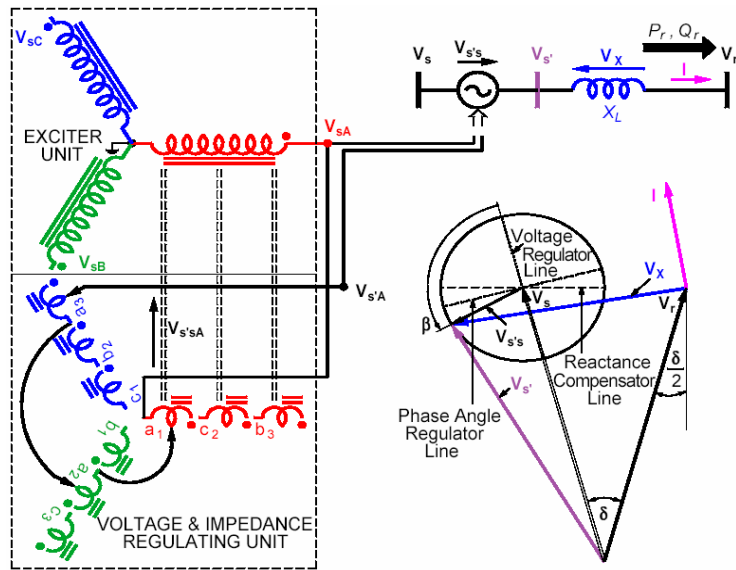
- Unified Power Flow Controller (UPFC) – AD tai AF
- Interline Power Flow Controller (IPFC) – DE tai CF
- Erillinen STATCOM ja SSSC – AD tai AF ja T auki
- STATCOM (2x mitoitus) – AB (käyttäen varamuuntajaa)
- SSSC (2x mitoitus) – CD tai EF (käyttäen varamuuntajaa)

Kuva 4-23. Muunneltavan staattisen kompensattorin (CSC) konfiguraatio. [42]

Kesällä 2004 saatiin valmiiksi New Yorkissa Marcyn 345 kV:n sähköaseman muunneltavan staattisen kompensattorin (Convertible Static Compensator, CSC) asennus. Marcyn CSC:n konfiguraatio on muutoin kuvan 4-23 mukainen, mutta siinä on vain yksi sarjamuuntaja kussakin siirtolinjassa. CSC koostuu kahdesta 100 MVA:n invertteristä, 200 MVA:n rinnan- ja kahdesta 100 MVA:n sarjaankytketystä muuntajasta. CSC on vähentänyt tarvetta rakentaa uusia linjoja ja lisännyt järjestelmän luotettavuutta ja tehokkuutta. CSC on toiminut staattisen sarjasynkronikompensaattorin (SSSC) kytkennällä.

4.5.3 SEN-muuntaja

EPRIn vuonna 2004 päättyneessä tutkimusprojektissa tarkasteltiin patentoitua SEN-muuntajaa (Sen transformer, ST), jolla saadaan aikaan toisistaan riippumaton pätö- ja loistehon hallinta kuten UPFC:lläkin, mutta laite pystyy syöttämään rajoitetummin jännitettä (120° – 240°). Laitekustannuksien odotetaan putoavan viidesosaan (15–20 \$/kVA) ja käyttökustannusten kymmenesosaan vastaavan UPFC:n kustannuksista. SEN-muuntaja koostuu 3-vaiheisesta muuntajasta ja käämikytimestä (kuva 4-24).



Kuva 4-24. SEN-muuntajan konfiguraatio. [Lähde: [EPRI](#)]

4.5.4 Tehoelektroniikan komponenttien kehitys

Tehoelektroniikkaan perustuvien tuotteiden kehittyminen on hyvin pitkälle sidoksissa tehoelektroniikan komponenttien kehittymiseen. Tänä päivänä käytettävien komponenttien lämpötilan-, jännitteen- ja virrankestoisuus sekä hinta ovat rajoittavina tekijöinä sovellusten kehittymiselle. Komponenttikehityksen lähtökohtia ja viimeisimpiä innovaatioita ovat

- uudet materiaalit ja materiaalien valmistusratkaisut
- uudet komponenttien valmistusratkaisut so. integroidut ”älykkäät komponentit”
- uudet komponentit.

Uudet materiaalit ja materiaalien valmistusratkaisut

Tehopuolijohdeiden tavoiteltavat ominaisuudet ovat mm. suuri tehokapasiteetti, korkea taajuus, suuri lämmön ja sähkön johtokyky. Näihin ominaisuuksiin vaikuttavat valmistusratkaisut, mutta suurin vaikutus on valmistukseen käytetyillä materiaaleilla. Tänä päivänä yleisin puolijohdemateriaali on pii (Si), mutta seuraavan sukupolven puolijohdemateriaaleiksi katsotaan mm. galliumarsenidi, galliumnitridi (GaN), piikarbidi (SiC), timantti (ohut filmi) ja suprajohteet. Taulukossa 4-3 vertaillaan puolijohdemateriaalien ominaisuuksia.

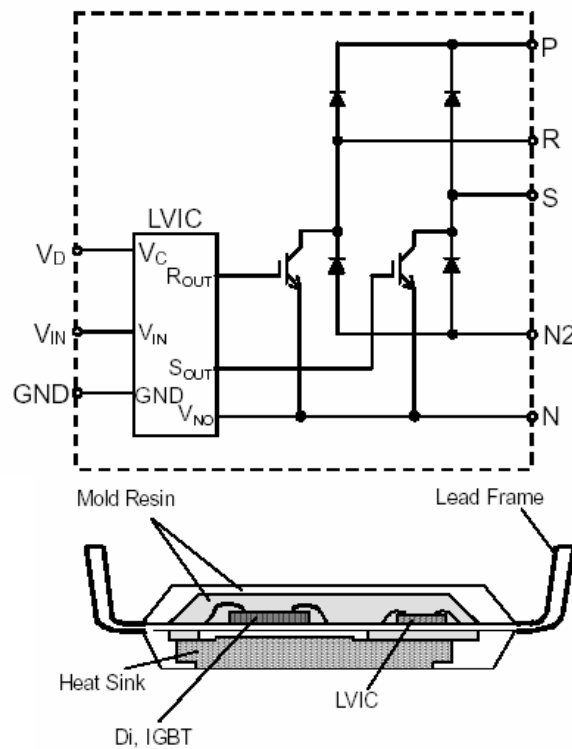
Taulukko 4-3. Puolijohdemateriaalien ominaisuuksien vertailu.

		Si	4H-SiC	GaN	Timantti
Energia aukko (band gap)	eV	1,1	3	3,4	5
Läpilyöntikenttä (breakdown field)	MV/cm	0,3	3	2,6	10
Maks. elektronin nopeus	10^7 cm/s	1	2	2,5	3
Lämmönjohtokyky	W/cmK	1,5	5	1,3	20

Piihin perustuvan elektroniikan ongelmana on ollut lämpökestoisuus ja siten myös huono korkeiden virtojen kestoisuus korkeilla jännitteillä. Piikarbidi kestää korkeita lämpötiloja, ja siitä valmistettujen laitteiden jännite olisi piistä valmistettuihin laitteisiin verrattuna 5–10 kertaa korkeampi, virran tiheydet 10–100 kertaa suuremmat ja kytkentähäviöt kymmenes–sadasosa tämän päivän piikomponenttien kytkentähäviöistä. Piikarbidin valmistaminen puhtaana on ollut vaikeaa. Nyt japanilaisten (Toyota Central R&D Laboratories Inc.) kehittämä uusi kolmivaiheiseen kerroksittaiseen valmistukseen perustuva (Repeated A-Face) menetelmä näyttää antavan mahdollisuuden valmistaa puhtaana suurempia (halk. 8 cm) SiC-levyjä, joista voidaan valmistaa suuremman tehoalueen ja korkeamman lämpötilan (650 °C) kestäviä puolijohteita. [[BBC News elokuussa 2004.](#)] SiC ei pysty kilpailemaan hintansa puolesta piin kanssa mutta antaa mahdollisuuden kehittää suuritehoisia puolijohdetuotteita, joiden valmistukseen Si ei sovellu. Koska SiC-tuotteet voivat toimia korkeilla taajuuksilla, passiiviset komponentit, kuten kondensaattorit ja muuntajat, voivat olla aikaisempaa pienempiä, millä on tärkeä merkitys esimerkiksi avaruusteknologiassa ja muissa suuritehoisen elektroniikan sovelluksissa. [[IEEE Spectrum Online 29.11.2004.](#)]

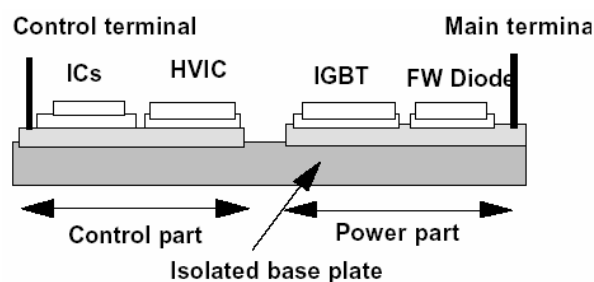
Uudet komponenttien valmistusratkaisut so. integroidut ”älykkäät komponentit”

Integroitu hybriditekniikka on viimeisin trendi myös tehoelektroniikan alueella. Tarve integroida ohjaus-, suojaus-, prosessori- ja muistipiirit myös tehoelektroniikan komponentteihin älykkäämpien komponenttien (IPM, Intelligent Power Module) saavuttamiseksi on selkeästi nähtävissä. Teho-MOSFET oli ensimmäinen uuden sukupolven tehoelektroniikan tuote, jossa esiteltiin integroidun piirin ja tehoelektroniikan komponentin yhdistelmä. Aluksi kyseessä olivat pienivirtaiset ja -tehoiset laitteet, esimerkiksi alle kilowatin moottoriohjauspiirit. Kuvassa 4-25 on tehokertoimen korjauspiiri, jossa on yhdistetty IGBT, diodit ja ohjauksen integroitupiiri. Piirissä tarvitaan yksi diodi vähemmän kuin perinteisessä järjestelmässä, ja teho- ja lämpötilahäviöt jakaantuvat kahden IGBT:n kesken.



Kuva 4-25. Integroitu tehokertoimen korjauspiiri. [Lähde: [Mitsubishi 2004](#)]

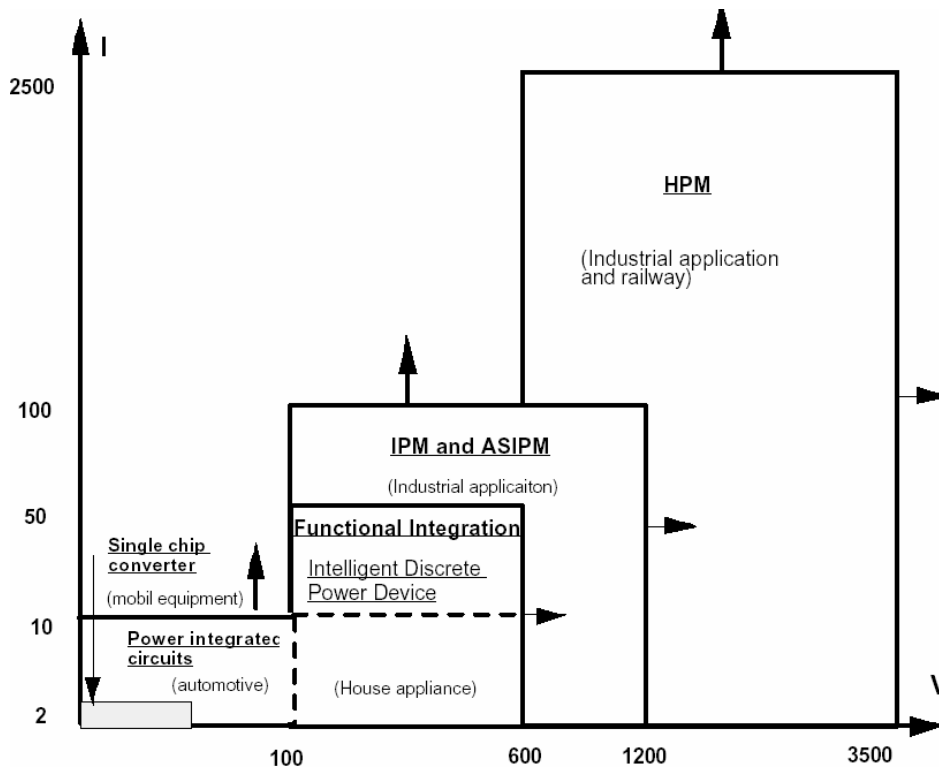
Sittemmin on esitelty myös ns. ASIPM (Application Specific Intelligent Power Modules) jännitealueelle 600 V:iin asti ja virta-alueelle 4–30 A. ASIPM IGBT:ssä on IGBT suojaustoimintoineen yhdistetty integroiduksi tehopiiriksi, jota voidaan ohjata suoraan mikrokontrollerilla (kuva 4-26). Moduulin lämpötilakestoisuus rajoittaa kuitenkin sen käyttöä keskijännitesovelluksissa. [49]



Kuva 4-26. Kaavio ASIPM IGBT -toteutuksesta. [49]

Muutamien wattien tehoalueella uusimpia trendejä edustaa passiivisten komponenttien integrointi.

Suuremmille tehoalueille ($I > 100$ A ja $V < 3,5$ kV) on lähinnä integroitu rinnakkaisia IGBT-komponentteja ja diodeja. Kuvassa 4-27 esitetään eri integrointityyppien jakautuminen virran ja jännitteen mukaan. [49]



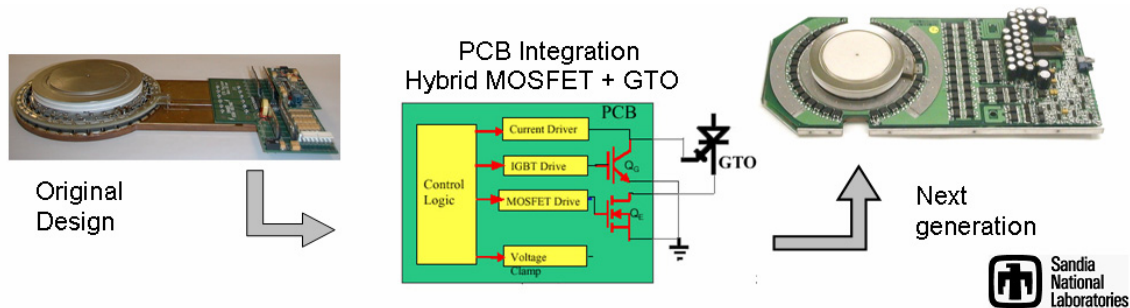
Kuva 4-27. Eri integrointitapojen jakautuminen jännite- ja virta-alueille. [49]

Uudet komponentit

Viimeisimmät tehoelektronikan sovellukset ovat suurelta osin perustuneet IGBT:n käyttöön. IGBT esiteltiin vuonna 1983 ja tuotiin markkinoille 1988. IGBT:n ominaisuuksia (häviöt, nopeus, estokapasiteetti) on paranneltu vuosien varrella ja ”älykkäissä moduuleissa” IGBT on integroitu muiden komponenttien ja piirien kanssa. Esimerkiksi HVIGBT:ssä on mielenkiintoisia piirteitä, kuten aktiivinen dv/dt ja di/dt -ohjaus, oikosulkuvirran rajoitus ja aktiivinen suojaus mutta toisaalta korkeammat häviöt ja huonompi piialueen hyödyntäminen.

Uusimpia IGBT-tyyppejä ovat vuonna 2000 IXYSen lanseeraama RBIGBT (Reverse Blocking IGBT) ja RCIGBT (Reverse Conducting IGBT). RCIGBT voi toimia sekä eteenpäin että taaksepäin johtavassa tilassa. RCIGBT:lle nähdään potentiaalia sekä pienettä keskijännitesovelluksien tehokytkenä. RCIGBT:n tavoin RBIGBT:n valmistus perustuu ohutlevyteknikkaan. RBIGBT:n valmistuksessa käytetään myös erityistä eristysprosessia, kuten diffuusioeritystä. RBIGBT poistaa diodien ja välipiirin kondensaattoritarteen matriisikonvertterisovelluksissa. [47 ja 48]

EPRI on kehittänyt mm. DOE:n rahoittamana ETO (Emitter turn-off) -puolijohdekomponenttia. ETO-komponentissa on pyritty yhdistämään GTO:n ja IGBT:n ominaisuudet kustannustehokkaasti niin, että toiminta ja luotettavuus paranevat. ETO-komponentti on tarkoitettu suuritehoisiin laitteisiin (6 kV, 4 kA). (Ks. kuva 4-28.)



Kuva 4-28. ETO-komponentin kehitys ja piirteet. [Lähde: [SANDIA](#) Laboratories]

4.6 Yhteenveto FACTS-laitteista

4.6.1 Ominaisuudet

Seuraavassa taulukossa (taulukko 4-4) on yhteenveto FACTS-laitteiden ominaisuuksista.

Taulukko 4-4. Yhteenveto sähkön laadun hallinnan laitteiden ominaisuuksista. [Perustuu viitteeseen 18.]

Sähkön laadun hallinnan laite	Ominaisuudet
STATCOM, staattinen tahtikompensointilaite ilman energiaravastoa	Jännitteen säätö, loistehon kompensointi, oskilloinnin vaimennus, jännitteen stabilointi
STATCOM ja kondensaattorit	Jännitteen säätö, loistehon kompensointi, oskilloinnin vaimennus, transienttien ja dynamiikan stabilointi, jännitteen stabilointi
SVC, staattinen loistehon kompensointilaite (SVR, TCR, TCS, TRS), rinnankytkentä	Jännitteen säätö, loistehon kompensointi, oskilloinnin vaimennus, transienttien ja dynamiikan stabilointi, jännitteen stabilointi
SSSC, staattinen tahtisarjakompensointilaite (TCSC) ilman energiaravastoa	Virran säätö, oskilloinnin vaimennus, transienttien ja dynamiikan stabilointi, jännitteen stabilointi, vikavirran rajoitus
SSSC ja energiaravasto	Virran säätö, oskilloinnin vaimennus, transienttien ja dynamiikan stabilointi, jännitteen stabilointi
UPFC, yhdistetty sähkön laadun hallintalaite	Jännitekuopat, hetkelliset ylijännitteet, jänniteepätasapainon hallinta, flikkeri, harmoniset ja loisvirrat
UPS, katkeamaton tehon syöttö	Yli- ja alijännitteet, kytkentätransientit, suuritaajuiset häiriöt, taajuuden vaihtelut ja harmoninen särö

4.6.2 Järjestelmävaikutukset

Seuraavassa kuvassa esitetään yhteenvetona FACTS-laitteiden vaikutus järjestelmän toimintaan (kuva 4-29). Sarjakompensointilaitteilla (FSC, TPSC, TCSC) muutetaan linjan impedanssia. Toiminnalla on suuri vaikutus järjestelmän stabiilisuuteen, pieni vaikutus sähkön laatuun ja tehon hallintaan. Jännitesäätöä tehdään rinnakkaiskompensointilaitteilla (MSCR, SVC, STATCOM). SVC:n ja STATCOM:n vaikutus jännitteen laatuun on suuri, ja laitteet auttavat myös stabiilisuuden hallintaan. Tehon hallinnan laitteilla (UPFC ja HVDC [High Voltage DC], B2B [Back-to-Back Converter], LDT [Long-Distance Transmission]) voidaan hallita myös järjestelmän stabiilisuutta ja jännitteen laatua.

Principle	Devices	Scheme	Impact on System Performance		
			Load Flow	Stability	Voltage Quality
Variation of the Line Impedance: Series Compensation	FSC (Fixed Series Compensation)		●	●●●●	●
	TPSC (Thyristor Protected Series Compensation)		●	●●●●	●
	TCSC (Thyristor Controlled Series Compensation)		●●	●●●●	●
Voltage Control: Shunt Compensation	SVC (Static Var Compensator)		○	●●●●	●●●●
	STATCOM (Static Synchronous Compensator)		○	●●●●	●●●●
Load-Flow Control	HVDC (B2B, LDT)		●●●●	●●●●	●●
	UPFC (Unified Power Flow Controller)		●●●●	●●●●	●●●●

Influence: *

- low or no
- small
- medium
- strong

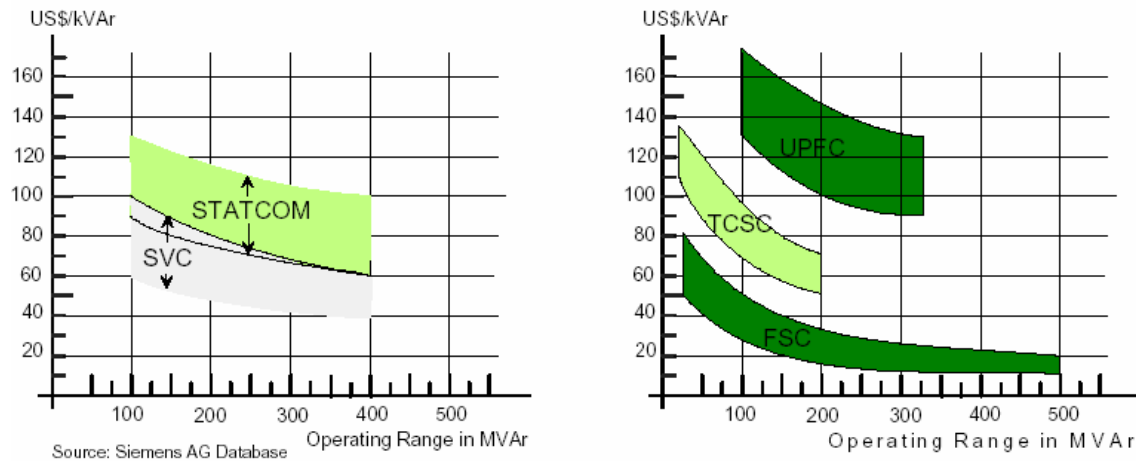
* Based on Studies & practical Experience

Kuva 4-29. FACTS-laitteiden vaikutus järjestelmän toimintaan. [Lähde: [Siemens](#)]

4.6.3 FACTS-laitteiden kustannukset

Sähkön laadun hallinnan laitteiden kokonaiskustannuksiin liittyvät paitsi itse laitteen investointikustannukset myös infrastruktuuriin liittyvät kustannukset, kuten maankäyttöön, rakentamiseen ja rakennuksiin ja järjestelmään liittämiseen tarvittavat kustannukset. Kokonaiskustannuksiin vaikuttavat myös eri maissa vaihtelevasti määräytyvät verot ja muut pakolliset kustannukset. Kuvassa 4-30 on Siemens AG:n arvioita joidenkin FACTS-laitteiden investointikustannuksista. Kunkin laitetypin kustannusalueen alaraja

ilmoittaa investointikustannukset ja yläraja kokonaiskustannukset, jotka sisältävät myös infrastruktuuriin liittyvät kustannukset. Pienitehoisilla laitteilla kustannukset voivat olla esitettyä korkeammat ja suuritehoisilla laitteilla pienemmät. Kokonaiskustannukset voivat vaihdella -10% :sta $+30\%$:iin, joissakin maissa jopa enemmän. [41]



Kuva 4-30. Esimerkki FACTS-laitteiden investointikustannuksista. STATCOM = Static Synchronous Compensator, SVC = Static Var Compensator, UPFC = Unified Power Flow Controller, TCSC = Thyristor Controlled Series Capacitor, FSC = Fixed Series Capacitor. [41]

5. Energiavarastot ja FACTS-laitteet

FACTS-laitteiden perustoiminta energiaa syöttävänä laitteena perustuu inverttereiden DC-välipiirin kondensaattoriin varattuun energiaan. Laitteisiin voidaan kuitenkin tyypillisesti integroida lisää energiavarastoja parantamaan laitteiden toimintakykyä. Esimerkiksi [U.S. DOE \(Department of Energy\) v. 2002 tutkimuksen](#) mukaan energiavarasto STATCOM-laitteen yhteydessä parantaa oskilloinnin vaimennusominaisuuksia ja transienttistabiilisuutta sekä antaa lisäksi mahdollisuuden pätötehon syöttöön. Energiavarasto SSSC:n yhteydessä parantaa jännitteen säätö- ja stabiilisuusominaisuuksia. Energiavarastot FACTS-laitteiden yhteydessä

- parantavat järjestelmän vaimennusominaisuuksia ylläpitäen vakojännitettä häiriön aikana
- lisäävät vaimennusominaisuuksia silloin, kun traditionaalisen FACTS-laitteen tuottama loisteho on riittämätön
- tuottavat energiaa mm. paikallisille epätahtimoottoreille häiriön aikana ja estävät näin jännitteen putoamisen.

Suurten FACTS-laitteiden energiavarastoiden liityntäjännitteeksi on EPRI TR-111093:n mukaan valittu 2 kV ja tavoitteena on saada 1 000 A (2 MW) 4 sekunniksi. Yleisesti sähkön laadun hallintaan soveltuvat varastot ovat purkaustehoalueeltaan 0,1–2 MW ja purkausaika on tyypillisesti 1–30 s (taulukko 5-1).

Taulukko 5-1. Energiavarastojen koot vs. sovellusalue. [Lähde: Sandia, 2003: Viite 46]

Sovellusalue	Purkausteho-alue	Purkausaika-alue	Varastoitu energia	Toiminnot
Suuret varastot	10–1000 MW	1–8 h	10–8000 MWh	Kuormituksen tasaus, pyörivä reservi
Hajautetun jakelun varastot	0,1–2 MW	0,5–4 h	50–8000 kWh	Huipun tasaus, siirron lykkäys
Sähkön laadun hallintaan liittyvät varastot	0,1–2 MW	1–30 s	0,1–60 MJ (0,028–16,67 kWh)	Loppukäyttäjän sähkön laatu ja luotettavuus

Seuraavassa taulukossa on IEA:n (International Energy Agency) keräämiä tietoja energiavarastoista (taulukko 5-2).

Taulukko 5-2. Energiavarastojen ominaisuuksia. [Lähde: IEA, 2004: Viite 45]

Varastotyyppi	Kust. (€/kWh)	Hyötysuhde (%)	Itsepurkautuvuus	Elinikä (täydet syklit tai vuodet)	Kapasiteetti	Teho	Ominaisenergia (Wh/kg)	Ominaisteho (W/kg)	Turvallisuus
Lyijyakut	50–150	81–94	1–4 %/kk	100–1500 sykliä, 3–15 v	5–6000 Ah	–10 MW	35–40	–400	Pieni riski (sähköinen, kemiallinen)
Litiumakut	300–1500	93–100	0–6 %/kk	200–3000 sykliä, 6–20 v	Useita mAh–100 Ah	–100 kW	30–200	6–2000	Vaarallisia materiaaleja
Nikkeliakut	220–3200	60–83	5–40 %/kk	500–3000 sykliä	–350 Ah	1–100 kW	10–60	40–1300	Haitallisia aineita
Metalli-ilma akut	50–200	50	1–4 %/kk	30 sykliä	25–2500 Ah	–10 kW	100–450	10–200	Ei erityistä riskiä
NaS-akut	500–2500	75–86	ei ole	Yli 2500		–6 MW	53–116	9–15	Vaarallisia materiaaleja
Super-kondensaattorit	50000–150000	85–100	50 %/kk	–500000 sykliä, 10 v	0,05–5000 F	–1 MW (tehokond.)	0,1–5	100–10000	Pieni riski (sähköinen, kemiallinen)
Vauhtipyörät	700–1000	90–96	72 %/kk	100 000 sykliä, 20 v		1–5 kW (energiavp) ja 1–100 kW (tehovp)	5–100	–1600	Ei riskiä
Redox-akut	100–200	60–75	–10 %/p (kytkettyinä)	≥2000 sykliä, 5–15 v	Riippuu säiliön koosta	10 kW–1 MW	10–70	10–25	Ei riskiä
Polttokenno-järjestelmä	4000–4500	30–60	2–3 % Pn (kulutus toimintaan kytkettyinä)	1000–50 000 h	Riippuu säiliön koosta	–100 kW		70–300 mW/cm2	Pieni riski (vain H2 varastointi)
Paineilmalaitokset	300–800	40–73	25 %/kk	20 000–100 000 sykliä, 20 v		1–1000 kW	3–50		Pieni riski
SMES	800–1800	90–99		100 000 sykliä, 20 v		–5000 MW	4–75	1000–100000	Turvallinen
Pumppulaitos		50–85	ei ole	75 v		–100 MW			Turvallinen
Lämpövarastot	100	60		10 000 sykliä		60 MW (x 10 h)	30–40		Turvallinen

Sandia on tehnyt vuonna 2003 tarkemman erittelyn energiavarastojen kustannuksista silloin, kun niitä käytetään sähkön laadun hallintaan (taulukko 5-3).

Taulukko 5-3. Sähkön laadun hallintaan käytettävien energiavarastojen tarkempi kustannusanalyysi. [Lähde: Sandia, 2003: Viite 46]

Teknologia	Inv. kust. (energiaper. toim.) \$/kWh	Inv. kust. (tehooper.) \$/kW	Hyötysuhde (AC-AC)	Uusintakust. \$/kWh	Uusinta-aika v.	Inverterin häviöt kW/kW	Varaston häviöt kW/kW	Kiinteät O&M kust. \$/kW/a
Lyijyakut	300	250	0,75	300	6	0,002	0,00001	10
Litium-ioni-akut	500	200	0,85	500	10	0,002	0,0001	10
SMES	50000	200	0,95	0	-	0,002	0,01	10
Vauhtipyörä (suurinop.) 150 kW/15 min.	1000	300	0,95	0	-	0,002	0,0005	5
Vauhtipyörä (suurinop.) 120 kW/20 s.	24000	333	0,95	16000	16	0,002	0,0005	5
Vauhtipyörä (suurinop.) 200 kW/20 s.	125000	300	0,95	0	-	0,002	0,002	5
Vauhtipyörä (pieninop.)	50000	300	0,9	0	-	0,002	0,002	5
Superkondensaattorit	30000	300	0,95	0	-	0,002	0,0001	5

Sähkön laadun hallinnan laitteiden yhteydessä yleisimmin käytettyjä energiavarastotyyppisiä ovat [1]

- SMES-järjestelmät (Superconducting Magnetic Energy Storage systems)
- akut (lyijy-, nikkeli-kadmiumakut)
- vauhtipyörät.

Uudet potentiaaliset energiavarastot sähkön laadun hallintaan ovat

- litium-ioniakut
- superkondensaattorit.

SMES-järjestelmien etuja ovat hyvä hyötysuhde, korkea jännite, pitkä elinikä, pienet huoltokustannukset, nopea vasteaika ja sopiva teholuokka (1–10 MJ, 1–2 s). Haittapuolina ovat korkea hinta, korkeat käyttökustannukset jäähdytyksen takia, huono skaalattavuus, voimakas magneettikenttä ja laitevalmistajien vähyys. Suprajohtavaan magneettisen energian (SMES) varastoon perustuvia suuria sähkön laadun hallinta- ja UPS-järjestelmiä on mm. Englannissa ja USA:ssa.

Akuista saadaan erityyppisiä järjestelmiä riippuen siitä, minkä tyyppisiä akkuja käytetään. Akkujärjestelmien, etenkin lyijyakkujen, hyvänä puolena on helppo skaalattavuus, saatavuus ja hinta. Toisaalta suljettujen, pitkän eliniän huoltovapaiden akkujen hinta voi olla moninkertainen halpojen lyijyakkujen hintaan nähden. Lyijyakkujen elinikä vaihtelee 3:sta 25 vuoteen ja vastaavasti purkaussyklien määrä 300:sta 3 000 sykliin tyyppistä riippuen. UPS-järjestelmissä käytetään energiavarastona vielä pääasiassa lyijyakkuja. Monet UPS-järjestelmät ovat modulaarisia, ja niiden back-up-toiminta-aikaa voidaan lisätä lisäämällä akkuja. Suljetut lyijyakut ovat huoltovapaina ja pitemmän eliniän vuoksi valtaamassa alaa. Laajan lämpötila-alueen omaavia NiCd-akkuja käytetään etenkin ulkotiloissa. NiMH-, litium-ioni- ja litium-polymeeriakut ovat tulossa etuina mm. pieni koko ja energiatehokkuus, mutta ne eivät vielä ole hinnaltaan täysin kilpailukykyisiä. Litium-ioni-akkujen, kuten useimpien akkutyypin, ongelmana on se, että niitä ei voi purkaa täysin muutamassa sekunnissa.

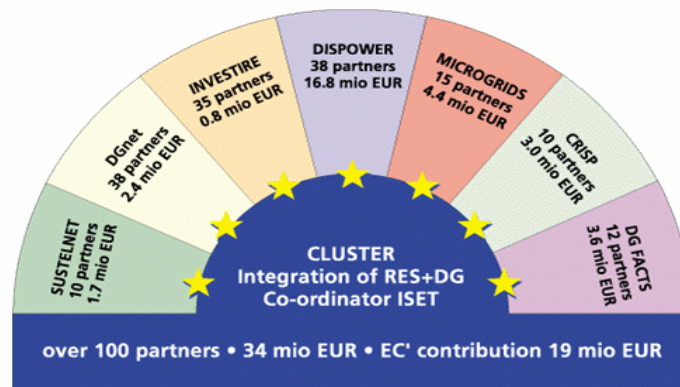
Vauhtipyörien elinikä on pitkä, mutta suuret järjestelmät ovat tilaa vieviä, ja kokonaiskustannukset voivat muodostua suuriksi mm. turvallisen koteloinnin, tyhjöjärjestelmän, laakeroinnin ja tarvittavan tehoelektroniikan vuoksi. Mm. UPS-laitteissa on energiavarastona käytetty myös vauhtipyöriä.

Superkondensaattorit sijoittuvat ominaisuuksiltaan kondensaattorien ja akkujen välille. Superkondensaattorit ovat ideaalisia sähkön laadun hallinnan energiavarastoja, sillä suurin osa varastoidusta energiasta voidaan purkaa sekunnissa. Superkondensaattoreiden etuina ovat pitkä elinikä, pienet huoltokustannukset, erittäin hyvä hyötysuhde ja laaja toimintalämpötila-alue. Superkondensaattoreista voidaan muodostaa modulaarinen ja ympäristöystävällinen järjestelmä. Ongelmana on pieni kennojännite (tyypillisesti < 3 V), jolloin joudutaan kytkemään paljon kondensaattoreita sarjaan riittävän jännitteen saavuttamiseksi ja vastaavasti joudutaan kytkemään kondensaattoriketjuja rinnakkain riittävän tehon saamiseksi. Superkondensaattorit ovat herkkiä ylijännitteille, ja suuri kennomäärä vaatii hyvän latausjännitteen säätöpiirin kennojännitteen vakauttamiseksi kennojen erilaisten vuotovirtojen ja hyötysuhde-erojen vuoksi.

Sandia National Laboratories tutkii super(ultra)kondensaattorien käyttöön (suuremmilla jännitteillä 1 000–2 000 V) liittyviä kysymyksiä, kuten sitä, mikä jännitealue on optimaalisin, tarvitaanko aktiivista jäähdytystä tehokäytössä, mitkä ovat lataustehokkuuserot eri lämpötiloilla, millaiset lämpötilagradientit syntyvät jatkuvalla lataus/purkaussyklillä ja missä määrin ominaisuudet heikkenevät pitkäaikaisessa käytössä. Ensimmäinen tutkittava tyyppi on ESMAn ultrakondensaattori. TVA (Tennessee Valley Authority) ja EPRI ovat valinneet vesipohjaisella elektrolyytillä toimivan epäsymmetrisen ESMAn ultrakondensaattorin 2 000 V:n järjestelmään (2 000 A, 4 MW, 26 MJ) mm. korkean teho- ja energiatiheuden ja turvallisemman orgaanisen elektrolyytin vuoksi. ESMAn ultrakondensaattorit kestävät lisäksi suhteellisen hyvin yli- ja alilatausta. Järjestelmä toteutetaan kahdella 1 000 A:n ultrakondensaattoriketjulla, joissa on kussakin neljä 504 V:n moduulia. Vastaavasti kahdeksalla moduulilla voidaan toteuttaa 4 000 A, 1 008 V, 4 MW ja 26 MJ:n järjestelmä kytkemällä rinnakkain neljä kahden 504 V:n moduulin ketjua. [43]

6. Hajautetun jakelun sähkön laadun hallintaan liittyvä tutkimustyö

Euroopan maiden 3-vuotinen yhteistyöprojekti [DGFACTS](#) ("Improvement of the quality of supply in Distributed Generation networks through the integrated application of power electronic techniques") alkoi tammikuussa 2003. Projektin budjetti on 3,6 M€. Projekti on yksi osa "Integration of RES + DG" -projektikokonaisuutta. Projektin tavoitteena on aikaisempaa kokemusta hyödyntäen ja uusia FACTS-laitteita kehittämällä ratkaista sähkön laadun hallintaan liittyviä ongelmia, jotka syntyvät liitettäessä hajautettua tuotantoa sähköverkkoon. Kyseessä ovat silloin lähinnä pienjänniteverkkoon liitettävät sähkön laadun hallintaa tukevat laiteratkaisut.



Kuva 6-1. Euroopan komission "Integration of Renewable Energy Sources and Distributed Energy Sources" -projektiryhmän kokoonpano. [Lähde: European Commission, [DGFSCTS 2004](#)]

EPRI on tutkinut FACTS-laitteita ja energiavarastojen käyttöä projekteissaan FACTS with Energy Storage: Conceptual Design Study TR-111093 ja New Generation Advanced Power Electronics and Energy Storage for Transmission Networks – System Study. [EPRI](#) tekee kenttäkokeita ETO-komponenteille ja vertailee uusia tehoelektronikan komponentteja. EPRI:n vuoden 2006 tavoitteisiin kuuluu mm. kehittää ETO-komponentin käyttöön perustuva monitasoinen kontrolleri.

[U.S. DOE on tutkinut energiavarastojen käyttöä FACTS-laitteiden kanssa](#) tehden mm. SMES:n ja akuston toimivuusvertailuja ja tukien monitasoinvertterin käyttöä vähentämään varaston kokoa ja parantamaan jännitestabiilisuutta. Tutkimustulosten mukaan energiavaraston lisääminen FACTS-laitteeseen parantaa järjestelmän ominaisuuksia kuten myös monitasotopologia, joka antaa myös mahdollisuuden pienentää energiavaraston kokoa.

7. Yhteenveto

Tässä julkaisussa tarkasteltiin sähkön laadun hallintaan liittyviä kysymyksiä ja viimeisintä teknologiaa. Sähkön laadun hallinta on tulossa maailmanlaajuisestikin katseltuna yhä tärkeämmäksi kysymykseksi sekä sähkön siirron että jakelun alueella. Sähkön laadun hallinta ja jakelun luotettavuus on myös nähty erääksi hajautetun energian jakelun kriittiseksi kohdaksi. Hajautetun tuotannon yhteydessä nähdään myös pienjännitejakelussa energiavarastoinnin ja sähkön laadun hallinnan laitteiden kasvava tarve.

Tässä julkaisussa tarkasteltiin lähinnä Suomessa voimassa olevaan sähkön laadun ja jakelun luotettavuuden hallintaan liittyviä määräyksiä, ohjeita ja standardeja. Suomessa jakeluverkkotoimintaa säätelee sähkömarkkinalaki. 1995 voimaantulleessa ja sittemmin useaan kertaan täydennetyssä sähkömarkkinalaissa käsitellään sähkön laatua yleisellä tasolla. Sähkömarkkinalaissa määritellään myös virheellisestä sähkön toimituksesta (keskeytyksistä) maksettavia korvauksia, jotka sinällään kannustavat verkkopalvelujen toimittajaa huolehtimaan myös toimitettavan sähkön luotettavuudesta. Sähkön laatua käsittelevissä standardeissa IEC (1000-2-2/4) ja CENELEC (EN50160) määritellään jakelujännitteen ominaisuuksia normaaliolosuhteissa. Sähkön laatustandardissa SFS-EN 50160 määritellään jakelujännitteen ominaisuudet sekä pienjänniteverkolle (alle 1 000 V) että keskijänniteverkolle (1–35 kV). Sähkön laatuun liittyvän standardoinnin kehitystyötä tehdään myös eri standardointiorganisaatioiden työryhmissä ja komiteoissa. Hajautettuun energiantuotantoon ei ole vielä erillistä standardia, ja periaatteessa samat standardit pätevät myös siinä. Sener on kuitenkin antanut ohjeen, jonka mukaan SFS-EN 50160 -standardia ei tule käyttää hajautetun energiantuotannon suunnitteluun vaan sen on täytettävä tiukemmat laatuvaatimukset.

Keskeytyksille tai jännitekuopille ei ole määritelty standardia, jota tulisi noudattaa, mutta indikaatiivisia arvoja on annettu. Energiamarkkinavirasto on antanut ohjeita häiriökeskeytystietojen keruusta. Sähköenergialiitto ylläpitää keskeytystilastointia, mutta pienjänniteasiakkaisiin kohdistuvien jakelukeskeytyksien täydellinen tilastointi on lähes mahdotonta, sillä pienjänniteverkoista aiheutuvia keskeytyksiä ei pystytä riittävän laajalti seuraamaan. Kerättyjen tilastojen mukaan keskijänniteverkossa vuonna 2002 oli lähes 3 häiriökeskeytystä asiakasta kohden. Yhteensä häiriökeskeytyksiä keskijänniteverkossa tapahtui vuonna 2002 maaseudulla keskimäärin 8,23 kpl/a ja taajamissa 2,03 kpl/a asiakasta kohden. Häiriökeskeytyksistä suurin osa oli lyhyitä 0–3 minuutin keskeytyksiä ja keskeytysaika jäi yleisesti alle puolen tunnin. Häiriökeskeytyksistä aiheutuvat kustannukset riippuvat hyvin paljon asiakkaasta. Pienimmät kustannukset ovat odotetusti pienkuluttajalla ja suurimmat maataloudessa. Teollisuuden ja julkisen sektorin kustannukset ovat tämän tutkimuksen mukaan samansuuruiset. Jännitekuopille herkimpiä taas ovat prosessiteollisuuden laitteet. Jännitekuoppien aiheuttamat kustannukset riippuvat suuresti teollisuuden ja kuluttajan tyypistä.

Sähkön laadun hallinnan keskeisimmät kohteet ovat ylijännitteen, harmonisten aaltojen, jännitteen vaihtelun, jännite-epätasapainon ja transienttien hallinta. Sähkön laadun hallintaan liittyvinä laiteratkaisuina tehoelektroniikan komponenttien käyttöön perustuvat ns. Flexible AC Transmission Systems (FACTS) -laitteet ovat viime aikoina tulleet kustannustehokkaaksi ja joustavaksi ratkaisuvaihtoehdoksi perinteisesti käytettyjen menetelmien rinnalle. Hajautetun jakelun myötä myös FACTS-laitteiden käyttöön ja kehitykseen liittyvä tutkimus on suuntautunut pienjännitepuolen sovelluksiin (vrt. Euroopan maiden 3-vuotinen yhteistyöprojekti DGFFACTS). FACTS-laitteissa hyödynnetään erityyppisiä energiavarastoja, jotka sekä parantavat että monipuolistavat laitteiden toimintaa.

Julkaisussa esitettiin sähkön laadun hallinnan ja etenkin FACTS-laitteiden state of art -tarkastelu pääkohtina katkeamaton sähkön syöttö (UPS-laitteet), loistehon ja harmonisten yliaaltojen hallinnan laitteet ja ylijännitteiden, jännitekuoppien ja katkosten hallinnan laitteet. Lisäksi tarkasteltiin sähkön laadun hallinnan laitteiden kustannuksia ja uusimpia laiteratkaisuja. Sarjakompensointilaitteilla (FSC, TPSC, TCSC) muutetaan linjan impedanssia. Toiminnalla on suuri vaikutus järjestelmän stabiilisuuteen, pieni vaikutus sähkön laatuun ja tehon hallintaan. Jännitesäätöä tehdään rinnakkaiskompensointilaitteilla (MSCR, SVC, STATCOM). SVC:n ja STATCOMin vaikutus jännitteen laatuun on suuri, ja laitteet auttavat myös stabiilisuuden hallintaan. Tehon hallinnan laitteilla, kuten UPFC:llä voidaan hallita myös järjestelmän stabiilisuutta ja jännitteen laatua.

Energiavarastot FACTS-laitteiden yhteydessä parantavat järjestelmän vaimennusominaisuuksia ylläpitäen vakojännitettä häiriön aikana ja lisäävät vaimennusominaisuuksia silloin, kun traditionaalisen FACTS-laitteen tuottama loisteho on riittämätön. Energiavarasto voi tuottaa myös energiaa mm. paikallisille epätahtimoottoreille häiriön aikana ja estää jännitteen putoamisen. Tässä julkaisussa esitettiin myös viimeisimmät kansainväliset tutkimustulokset energiavarastojen ominaisuuksista ja kustannuksista ja tarkasteltiin sähkön laadun hallinnan laitteisiin liitettäviä potentiaalisia energianvarastointiratkaisuja, joista uusinta lupaavaa teknologiaa edustavat superkondensaattorit ja litiumakut.

Tämä tutkimus on pohjatietoa ENVADE-projektiin liittyvään tavoitteeseen kehittää pienjänniteverkossa toimivan sähkönlaatuaseman konsepti, joka paitsi sähkön laatuun liittyvien ongelmien hallintaa ja UPS-toimintaa voi suorittaa myös tietyssä mittakaavassa energian hallintaa, kuten huipputehojen leikkausta.

Lähdeluettelo

1. Alanen, R., Koljonen, T., Hukari, S. & Saari, P. 2003. Energian varastoinnin nykytila. VTT Tiedotteita 2199. Espoo: VTT. 169 s. + liitt. 60 s.
2. Alanen, R., Holttinen, H. & Saari, P. 2004. Energian varastoinnin teknologiat Suomen tuulivoimalaitoksissa. Projektiraportti PRO2/P5 120/04. Espoo: VTT Prosessit. 148 s. + liitt. 3 s.
3. Powerware. 2004. 20–80 kVA UPS Käyttö- ja asennusohje. Internet: http://www.powerware.com/products/Large_UPS_Manuals.asp. Viitattu 25.11.2004.
4. Bojrup, M. 1999. Advanced Control of Active Filters in a Battery Charger Application. Department of Industrial Electrical Engineering and Automation (IEA), Lund Institute of Technology (LTH). CODEN:LUTEDX/(TEIE-1021)/1-124/(1999). Internet: http://www.iea.lth.se/publications/point/Theses/pdf_files/LTH-IEA-1021.pdf. Viitattu 25.11.2004.
5. Sähkömarkkinalaki. Internet: <http://www.energiamarkkinavirasto.fi/select.asp?gid=42&pgid=42>. Viitattu 26.10.2004.
6. SFS-EN 50160. 2000. Yleisen jakeluverkon jakelujännitteen ominaisuudet. Helsinki: Suomen standardisoimisliitto SFS ry. 28 s.
7. Sähköenergialiitto ry SENER. 1996. Jakeluverkon sähkön laadun arviointi. Helsinki. 29 s.
8. Uusitalo, K., Jalonen, M. & Lehtonen, M. 2000. Jännitteen säätö jännitejakauman avulla. TESLA raportti nro 22/2000. Espoo: VTT Energia.
9. Järventausta, P., Mäkinen, A., Nikander, A., Kivikko, K., Partanen, J., Lassila, J., Viljanen, S. & Honkapuro, S. 2003. Sähkön laatu jakeluverkkotoiminnan arvioinnissa. Energiamarkkinaviraston julkaisuja 1/2003. Internet: http://www.energiamarkkinavirasto.fi/files/Sahkon_laatu_TTY-LTY_1-2003.pdf. Viitattu 29.10.2004.
10. Arora, A., Chan, K., Jauch, T., Kara, A. & Wirth, E. 1998. Innovative system solutions for power quality enhancement. ABB Review 3/1998.

Internet:

[http://library.abb.com/GLOBAL/SCOT/scot271.nsf/VerityDisplay/B90133B19BF48124C1256EC2004E08F8/\\$File/04-12m470.pdf](http://library.abb.com/GLOBAL/SCOT/scot271.nsf/VerityDisplay/B90133B19BF48124C1256EC2004E08F8/$File/04-12m470.pdf). Viitattu 1.11.2004.

11. Sannino, A., Svensson, J. & Larsson, T. 2003. Power-electronic solutions to power quality problems. *Electric Power Systems Research*, Vol. 66, s. 71–82. Internet: <http://www.elkraft.chalmers.se/Publikationer/EKS.publ/Abstract/2003/sanninosvenssonlarssonpq.pdf>. Viitattu 9.11.2004.
12. John, E. M. 2002. Reactive Compensation Tutorial. IEEE. S. 515–519. Internet: <http://ieeexplore.ieee.org/iel5/7733/21228/00985056.pdf?tp=&arnumber=985056&isnumber=21228&arSt=515&ared=519%20vol.1&arAuthor=John%2C+E.M.%3B>. Viitattu 2.11.2004.
13. Svensson, J. & Ottersten, R. 1999. Shunt active filtering of vector current-controlled VSC at a moderate switching frequency. *Industry Applications, IEEE Transactions on*, Vol. 35, No. 5, s. 1083–1090. Internet: <http://ieeexplore.ieee.org/iel5/28/17214/00793369.pdf?tp=&arnumber=793369&isnumber=17214&arSt=1083&ared=1090&arAuthor=Svensson%2C+J.%3B+Ottersten%2C+R.%3B>. Viitattu 8.11.2004.
14. Sannino, A. & Bollen, M. H. J. 2000. Mitigation of voltage sags and short interruptions through distribution system design. Department of Electric Power Engineering, Chalmers University of Technology S-412 96 Göteborg, Sweden. EPETM conference, Capri, Italy, May 2000. Internet: <http://www.elkraft.chalmers.se/Publikationer/EKS.publ/Abstract/old/SanninoBollenEPETM2000.pdf>. Viitattu 8.11.2004.
15. Kumpulainen, L., Hautala, J. & Kauhaniemi, K. 2002. Voltage dip mitigation possibilities in industrial distribution systems. Espoo: VTT Processes. Internet: http://www.vtt.fi/pro/tutkimus/tesla/tshrapkooste/interim_2002_kumpulainen.pdf. Viitattu 8.11.2004.
16. Järvinen, J., Pylvänäinen, J. & Verho, P. 2004. Voltage dip analysis as part of network planning software. Tampere University of Technology, Institute of Power Engineering. Nordac 2004. Internet: http://powersystems.tkk.fi/nordac2004/papers/nordac2004_jarvinen_et_al_paper.pdf. Viitattu 8.11.2004.

17. Park, S., Chung, I., Choi, J., Moon, S. & Kim, J. 2003. Control Schemes of the Inverter-Interfaced Multi-functional Dispersed Generation. IEEE. Internet: <http://powerlab.snu.ac.kr/~iryop/paper/IC7.pdf>. Viitattu 9.11.2004.
18. University of Zielona Gora, Institute of Electrical Engineering. Power electronics arrangements in distributed systems. Internet: <http://www.iee.uz.zgora.pl/English/presentations/%5b1%5dPEADS.pdf>. Viitattu 11.11.2004.
19. Isoviita, T., Eklund, T., Alasalmi, O., Kivikko, K., Lehtomäki, E. & Vainola, K. 2004. KESKEYTYSTILASTO-OHJE, LUONNOS v0.19. Keskeytystilastointityöryhmä www.energia.fi/keskeytystilastointi. 11.10.2004. Internet: <http://www.energia.fi/attachment.asp?Section=2584&Item=11050>. Viitattu 11.11.2004.
20. Energiamarkkinavirasto. 1995. KTMp 1637-1995, liitteet. Liite 1. JAKELUVERKKOTOIMINTAA KOSKEVAT TUNNUSLUVUT, NIIDEN LASKENTAKAAVAT JA -OHJEET. Internet: http://www.energiamarkkinavirasto.fi/files/KTMp1637-95_liitteet.pdf. Viitattu 14.11.2004.
21. ABB:n teknisiä tietoja ja taulukoita – käsikirja. 9. painos. Internet: [http://www.abb.fi/global/fiabb/fiabb255.nsf/viewunid/C46D5509D325D21AC225695B002FB07B/\\$file/040_0007.pdf](http://www.abb.fi/global/fiabb/fiabb255.nsf/viewunid/C46D5509D325D21AC225695B002FB07B/$file/040_0007.pdf). Viitattu 12.10.04]
22. Sähköenergialiitto ry: Tilastosarja: Keskeytystilasto 2002.
23. Sähköenergialiitto ry: Tilastosarja: Keskeytystilasto 1998.
24. Korpinen, L., Mikkola, M., Keikko, T. & Flack, E. 2004. Yliaalto-opus. Internet: <http://leeh.ee.tut.fi/ylialto/>. Viitattu 11.10.2004.
25. Mäkinen, A., Rissanen, J. & Järventausta, P. 2001. Sähköjakeluverkon jännitekuoppien seuranta osana sähkön laadun hallintaa. Tesla-raportti nro 45/2001.
26. Sähköenergialiitto ry SENER. 1996. Jakeluverkon sähkön laadun arviointi. Helsinki. 29 s.
27. EONin vakiokorvausohje. Internet: <http://www.eon.fi/suomi/tilanteesi/jakelukeskeytykset/vakiokorvaus/ohjeet/>. Viitattu 18.10.2004

28. Suomen säädöskokoelma nro 444/2003. Internet:
<http://www.finlex.fi/pdf/sk/03/vihko075.pdf>. Viitattu 18.10.2004.
29. Energiamarkkinaviraston keskustelupäivä 30.1.2002: Sähkön laadun hallinta sähkönjakeluverkkotoiminnassa. Internet:
http://www.energiamarkkinavirasto.fi/files/Pertti_Jarventausta_2002.ppt. Viitattu 18.10.2004.
30. Pohjanheimo, P. 2003. A Probabilistic Method for Comprehensive Voltage Sag Management in Power Distribution Systems. TKK-SVL-7. Espoo: Teknillinen korkeakoulu. Internet: <http://lib.hut.fi/Diss/2003/isbn9512263998/isbn9512263998.pdf>. Viitattu 19.10.2004.
31. Lemström, B. & Lehtonen, M. 1994. Kostnader för elavbrott. TemaNord 1994:627, Nordisk Ministerråd, Copenhagen. 165 s. (Ruotsiksi, tiivistelmä myös englanniksi.)
32. Partanen, J. & Viljanen, S. LTKK:n suurjännitetekniikan luentokalvot, ylijännitesuojaus. Internet: <http://www.ee.lut.fi/fi/opi/kurssit/Sa2710300/HV-yljannitesuojaus.pdf>. Viitattu 10.3.2006.
33. Heine, P., Lehtonen, M. & Lakervi, E. 2001. Voltage Sag Analysis Taken Into Account in Distribution Network Design. IEEE Porto PowerTech 2001. 11.–13.9.2001, Porto, Portugal. Volume III, Paper PSP-222. 6 s.
34. Heine, P. & Lehtonen, M. 2002. Voltage Sags Caused by Faults at Different Power System Levels and Experienced by Low Voltage Customers. The 7th International Conference of Probabilistic Methods Applied to Power Systems, PMAPS 2002. 22.–26.9.2002, Naples, Italy. S. 563–568.
35. Pohjanheimo, P., Heine, P. & Lehtonen, M. 2001. Jännitekuoppien aiheuttamat kustannukset. Jännitekuoppien vaikutus asiakkaiden laitteisiin. Luentokalvot. Espoo: Teknillinen korkeakoulu.
36. Sähköenergialiitto ry. 1998. Tutkimus jakeluverkkojen sähkön laadusta Suomessa. Julkaisusarja. Helsinki.
37. Lehtonen, M. & Lemström, B. 1995. Comparison of the Methods for Assessing the Customers' Outage Costs. Espoo: VTT Energy. Internet:
<http://ieeexplore.ieee.org/iel3/3588/10701/00500691.pdf?tp=&arnumber=500691&isnumber=10701&arSt=1&ared=6%20vol.1&arAuthor=Lehtonen%2C+M.%3B+Lemstrom%2C+B.%3B>. Viitattu 8.11.2004.

38. Pohjanheimo, P. & Lehtonen, M. Jännitekuoppien vaikutukset sähköverkon kuormiin. Kalvosarja. Espoo: Teknillinen korkeakoulu, sähköverkkolaboratorio. Internet: <http://www.vtt.fi/pro/tutkimus/tesla/loppusem/pohjanheimo.pdf>. Viitattu 16.11.2004.
39. Milanović, J. V. & Djokić, S. Ž. 2003. EQUIPMENT SENSITIVITY TO DISTURBANCES IN VOLTAGE SUPPLY. Improvement of the quality of supply in Distributed Generation networks through the integrated application of power electronic techniques. DGFACTS. EESD Subprogramme Area: Key action Cleaner Energy Systems, including Renewable Energies. Internet: <http://dgfacts.labein.es/dgfacts/index.jsp>. Viitattu 18.11.2004.
40. DGFACTS, WP1, D1: Report on "Evaluation of the quality of supply requirements specified by existing standards, National legislation and relevant technical reports inside and outside EU". 7.4.2004. Internet: <http://dgfacts.labein.es/dgfacts/index.jsp>. Viitattu 18.11.2004.
41. Habur, K. & O'Leary, D. FACTS – Flexible alternating current transmission systems. For Cost Effective and Reliable Transmission of Electrical Energy. Internet: http://www.worldbank.org/html/fpd/em/transmission/facts_siemens.pdf. Viitattu 22.11.2004.
42. Wei, X., Chow, J. H., Fardanesh, B. & Edris, A. 2004. A Common Modeling Framework of Voltage-Sourced Converters for Load Flow, Sensitivity, and Dispatch Analysis. IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 19, No. 2, s. 934–941. Internet: <http://www.ecse.rpi.edu/homepages/chowj/2004-TPS-FACTS01295002.pdf>. Viitattu 21.11.2004.
43. TVA. 2002. Transmission Ultra CAPsitor Energy Storage System (TUCAP). A Multi-level Inverter Based Flexible AC Transmission Systems (FACTS) Controller using Emitter Turn Off (ETO) and Ultracapacitor Energy Storage. 15.11.2002. Internet: <http://www.capes.us/presentations/1>. Viitattu 21.11.2004.
44. Massoud Amin. Modernizing The National Electric Power Grid. WORKSHOP ON MODERNIZING THE NATIONAL ELECTRIC POWER GRID. Co-sponsored by NSF, Entergy, EPRI, and DOE. 18.–19.11.2002, New Orleans, LA. Internet: http://eent1.tamu.edu/nsfw/documents/Presentation_MA1.pdf. Viitattu 22.11.2004.
45. Report IEA-PVPS T3-18:2004. Evaluation of Energy Storage Devices in Stand-Alone PV Power Systems. Internet:

<http://141.51.158.34/iea/Publications/Evaluation%20of%20energy%20storage%20devices.pdf>. Viitattu 23.11.2004.

46. Schoenung, S. M. & Hassenzahl, W. V. 2003. Long- vs. Short-Term Energy Storage Technologies Analysis. A Life-Cycle Cost Study. A Study for the DOE Energy Storage Systems Program. SANDIA REPORT, SAND2003-2783, Unlimited Release. Internet: <http://www.prod.sandia.gov/cgi-bin/techlib/access-control.pl/2003/032783.pdf>. Viitattu 23.11.2004.
47. Chattopadhyay, A. 2003. Power electronics – past, present & future. Internet: http://alpha400.ee.unsw.edu.au/elec9223/2003/Chattopadhyay_PESlides2R_ppt.pdf. Viitattu 30.11.2004.
48. Majumdar, G. 2004. Future of Power Semiconductors. 35th Annual IEEE Power Electronics Specialists Conference. Aachen, Germany. Internet: <http://ieeexplore.ieee.org/iel5/9371/29757/01355704.pdf?tp=&arnumber=1355704&isnumber=29757&arSt=10&ared=15%20Vol.1&arAuthor=Majumdar%2C+G.%3B>. Viitattu 30.11.2004.
49. Sanchez, J.-L. 1999. State of the art and trends in power integration. Internet: <http://www.comppub.com/publications/MSM/99/pdf/W102.pdf>. Viitattu 30.11.2004.

