



Open your mind. LUT.  
Lappeenranta University of Technology

## **AC/DC taistelu**

### **The battle of AC/DC**

Olli Laine

0452910

Kandidaatintyö

14.1.2018

LUT School of Energy Systems

Sähkötekniikka

## **TIIVISTELMÄ**

Lappeenrannan teknillinen yliopisto  
LUT School of Energy Systems  
Sähkötekniikka

Olli Laine  
**AC/DC taistelu**

2018

Kandidaatintyö.  
34 sivua ja 16 kuvaa.  
Tarkastaja: Jarmo Partanen

1900-luvulla sähkön käytön yleistyessä haluttiin sähköä myös kaupunkien ulkopuolella ole-  
viin kotitalouksiin. Ongelmaksi muodostui tasasähkön lyhyt siirtomatka, mutta vaihtosäh-  
kön idea toi tähän ratkaisun. Vaihtosähkö alkoi syrjäyttämään tasasähkön asemaa sähkön  
jakelussa, ja tästä lähtien sähkön kulutus on vain kasvanut. Jatkuva sähkön kulutuksen kasvu  
on tuonut tarpeen parantaa myös nykyistä sähkönjakelujärjestelmäämme. Olemme saavutta-  
neet vaihtosähköllä tehtävän sähkön jakelun maksimaalisen siirtomatkan, joka on vielä ta-  
loudellisesti kannattava.

Tehoelektroniikan kehitys on tuonut mahdollisuuksia käyttää vaihtosähkön sijaan tasasäh-  
köä sähkön jakelussa. Tehoelektroniikan kehityksen, tuotannon kasvun sekä käytön yleisty-  
misen myötä LVDC- sekä HVDC-tekniikat ovat tulleet mahdollisiksi vaihtoehdoiksi. Te-  
hoelektroniikan kehityksen myötä myös energiavarastot ovat kehittyneet, hajautettu ja pien-  
tuotanto yleistynyt sekä älykäs sähköverkko on tulossa osaksi arkea. Kaikki nämä yhdessä  
ovat tekemässä tasasähköstä kilpailukykyistä.

Tasasähkön kilpailukykyisyys ei tarkoita välittömiä toimia sähkönjakelujärjestelmissämme.  
Tasasähköllä tehtävää sähkönjakelua tutkitaan parantamaan tulevaisuudessa tehtävää sähkö-  
jakeluumme, ja takaamaan parempi laatuista sähköä asiakkaille. Muutokset voivat viedä  
vielä aikaa, mutta saatujen tuloksien ja tutkimusten perusteella tasasähköllä on kirkas tule-  
vaisuus sähkönjakelussa.

## **ABSTRACT**

Lappeenranta University of Technology  
LUT School of Energy Systems  
Electrical Engineering

Olli Laine  
**The battle of AC/DC**

2018

Bachelor's Thesis.  
34 pages ja 16 pictures.  
Examiner: professor Jarmo Partanen

In the 20th century, as electricity became more common, electricity was also wanted for households outside of cities. The problem was the short shift of the direct current but the idea of an alternating current brought this solution. Alternating current started to displace direct currents place in the electricity supply and from that point on the consumption of electricity has only increased. Continues growth of electricity consumption has given need to improve our electricity distribution systems. We have reached the maximum lenght of electricity distribution that is cost-effective with alternating current.

The development of power electronics has brought opportunities to use direct current instead of alternating current in our electricity distribution. Development of power electronics, growth of production and increasing use of power electronics have made LVDC and HVDC systems possible options. The development of power electronics has also build up the capacity of energy storages. Decentralized electricity production and small-scale production have become more common and smart grid is going to be part of our everyday life.

The competitiveness of direct current doesn't mean instant changes in our electricity distribution systems. Direct current has been studied to make our future electricity distribution better and to improve the quality of electricity that is delivered to customers. Changes may take some time but based on the results and studies gained, direct current has a bright future in electricity distribution.

# SISÄLLYSLUETTELO

Käytetyt merkinnät ja lyhenteet

1.	Johdanto.....	5
1.1	Työn tavoite ja rajaukset.....	5
1.2	Työn rakenne ja menetelmät.....	5
2.	Sähkönjakelun historia .....	7
3.	Kilpailukykyinen DC.....	11
3.1	Tehoelektroniikka.....	11
3.1.1	HVDC.....	12
3.1.2	LVDC .....	16
3.2	Akut .....	20
3.3	Hajautettu tuotanto ja älykäs sähköverkko.....	22
4.	Erot vaihto- ja tasasähkön välillä.....	24
4.1	Tasasähkön edut verrattuna vaihtosähköön.....	24
4.2	Vaihtosähkön edut verrattuna tasasähköön .....	25
5.	Johtopäätökset .....	27
	Lähteet .....	29

Liitteet

## KÄYTETYT MERKINNÄT JA LYHENTEET

### Lyhenteet

DC	Tasavirta
AC	Vaihtovirta
HVDC	Suurjännitetasavirta
MVDC	Keskijännitetasavirta
LVDC	Pienjännitetasavirta
LVAC	Pienjännitevaihtovirta
VAC	Voltia vaihtojännitteenä
VDC	Voltia tasajännitteenä

## **1. JOHDANTO**

Vaihtovirta on osana jokapäiväistä arkeamme. Oli kyseessä sitten puhelimen lataaminen tai pyykin peseminen, niin näihin tarvitaan sähköä. Käytämme sähkönsiirrossa vaihtovirtaa ja sitä Suomessa on saatavilla kaikkiin kotitalouksiin. Mutta miksi näin on ja miksi emme käytä tasavirtaa? Vaihtovirta on ajan funktiona vaihtelevaa sähkövirtaa. Suomessa oleva sähköverkko on Fingridin kehittämä ja hallitsema. Sähköverkon taajuus on 50 Hz eli vaihtovirta vaihtaa suuntaansa 100 kertaa sekunnissa. Tasavirta on sähkövirta, jonka suunta ei muutu.

### **1.1 Työn tavoite ja rajaukset**

Tavoitteena on selostaa miksi käytämme tällä hetkellä vaihtovirtaa, onko tasavirrasta mahdollista tulla kilpailukykyinen vaihtoehto sekä mitkä asiat vaikuttavat tasavirran kilpailukykyyn. Selvitetään sekä vaihto- että tasavirran edut ja haitat sähkön siirrossa ja tuotannossa. Selvitetään sekä vaihto- että tasavirran edut ja haitat sähkön siirrossa ja tuotannossa. Selvitetään tasavirtaverkkojen edut sekä esteet kustannusten ja häviöiden osalta Suomen sähköverkossa verrattuna vaihtovirtaverkkoihin.

Historian kuvaus on rajattu 1900-luvun vaihteesta nykyhetkeen ja lähitulevaisuuden näkemyksiä tutkitaan vertaillen vaihtovirtaa tasavirtaan. Rajaus painottuu enemmän tasavirran yleiskuvaamiseen ja uusiin mahdollisuuksiin. Sähkönsiirtoverkkojen suorituskykyä sekä suoritusvarmuutta halutaan parantaa, ja tasavirtaa pidetään tälle hetkellä potentiaalisena korvaajana.

### **1.2 Työn rakenne ja menetelmät**

Työ on kirjallisuus tutkimus. Menetelmät ovat tiedonhakeminen ja sen luotettavuuden arviointi. Tiedonlähteenä käytetään Internetiä, alan kirjallisuutta sekä LUT-organisaation asiantuntijoiden haastattelut.

Aluksi käydään läpi historiaa sähkönsiirron historiasta, miksi käytössä oli tasavirta, mitkä tasavirran hyödyt olivat ja mitkä sen heikkoudet. Seuraavaksi vaihtovirran käyttöönotami-

sen syitä tutkitaan, mitkä olivat pääsyyt ja milloin tämä tapahtui. Lopuksi kuvataan mahdollisuuksia, joiden avulla tasavirrasta on jälleen tulossa kilpailukykyinen vaihtovirran kanssa. Esimerkiksi akkujen kehitys, suuret akkukontit, jotka ovat suoraan verkkoon kytkettyjä esimerkiksi Fortumin sähkökontit tai Teslan kotiakat. Tehoelektroniikan kehitys ja uudet mahdollisuudet tehoelektroniikan saralla kuten suurjännitetasavirta eli HVDC sekä pienjännitetasavirta eli LVDC ja sähkön lähituotanto kuten aurinkopaneelit omakotitalon katolla.

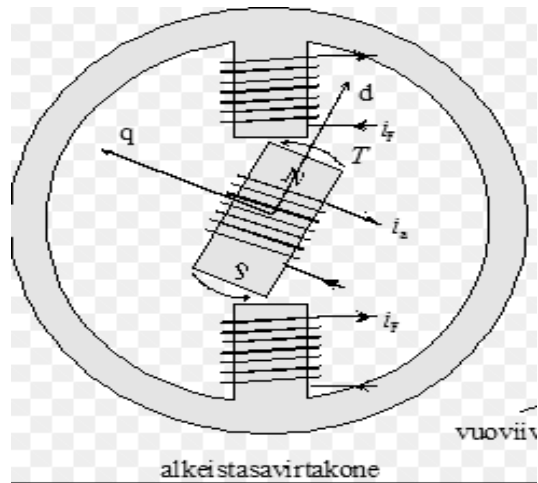
Tilastodataa käytetään voimalaitosten määrän tutkimisessa, miten voimalaitosten lukumäärä on kasvanut Suomessa ja miten siirtomatkat ovat muuttuneet. Tiedot ovat Energiaviraston sivuilta, josta löytää tiedot kaikista rekisteröityneistä voimalaitoksista Suomessa.

## 2. SÄHKÖNJAKELUN HISTORIA

Kun 1800-luvulla tutkimus sähkön hyödyistä alkoi, ei vielä arveltu sen tulevan jokaiseen kotiin osaksi arkeamme. Ohiossa vuonna 1847 syntynyt Thomas Edison oli yhdysvaltalainen keksijä. Hän onnistui ensimmäisissä hehkulamppukokeissaan 1870-luvun lopulla. Edison käytti englantilaisen kemistin Humphry Davyn ideaa hehkulamppusta oman lamppunsa perustana. Hehkulamppun kehityksen kautta Edison tarvitsi markkinavalttia hehkulamppujen levitystä varten. 1880-luvun loppu puolella Edison sai patentin sähkönjakelujärjestelmälle, mikä kiihdytti hehkulamppujen levikkiä. Ensimmäiset sähköjakelujärjestelmät toimivat tasasähköllä. Sähkölaitteiden yleistyminen alkoi, ja jo 1820-luvulla keksityt sähkömoottorit saatiin käyttöön. Ensimmäinen Edisonin voimalaitos kytkettiin sähköverkkoon Pearl Streetin asemalla New Yorkissa virran vuonna 1883. Ja saman vuoden lopulla Lontooseen avattiin Edisonin yhtiön Edison Illuminating Companyn höyrykäyttöinen sähkövoimala. (Lindell, 2009)

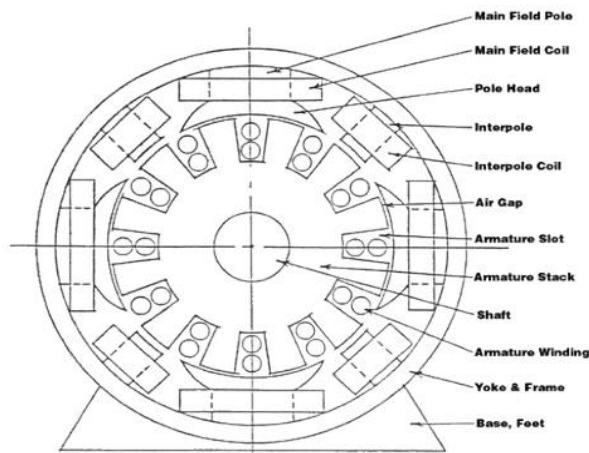
Nikolai Tesla pystyi osoittamaan keksinnöillään vaihtosähkön etuja verrattaessa tasasähköön. Hän pystyi todistamaan, että kun käytetään suuria jännitteitä vaihtosähköllä, niin sähkönsiirto häviöt ovat pienemmät kuin tasasähköllä siirrettäessä. Teslaa tuki George Westinghouse, joka oli myös yksi sähköteollisuuden edelläkävijöistä. Westinghouse oli Edison suurin kilpailija sähkönsiirrossa. Westinghouse päätti tukea Teslan ideaa, ja päätti tuoda tämän idean julki. Monopoli-asemassa olevaa Edisonia vaihtosähkön idea ei miellyttänyt, sillä hänellä oli noin sata sähkövoimalaa toiminnassa ennen 1900-lukua. Edison protestoi voimakkaasti vaihtosähköä vastaan, yrittäen jopa saada vaihtosähkön kieltävän lain voimaan. Vaihtosähkö oli Edisonin mielestä liian vaarallista käyttää, ja useat tarinat kertovat Edisonin todistaneen asiaa eläimiin. Suurimpana Edisonin esityksenä vaihtovirran vaarallisuudesta, hänen yhtiönsä työntekijät tappoivat norsun käyttämällä vaihtovirtaa. (Lindell, 2009)





Kuva 1 Alkeistasavirtakone.

### Construction of DC Motor:



Kuva 2 Tasavirtamoottorin peruskomponentit

Vaihtosähkön käytön myötä myös nykyajan yleisin sähkömoottorityyppi otettiin käyttöön. Oikosulkumoottori on Nikolai Teslan kehittämä moottorityyppi. Se on yksinkertaisen rakenteensa takia erittäin suosittu moottori. Aikaisemmin käytettyjä tasavirtamoottoreita voisi kuvailla pyöriviksi rautakappaleiksi. Yksinkertaisuudessaan tasavirtamoottoria voisi kuvailla siten, että moottorin sisällä on rautapala, johon on kierretty käämitys ympärille. Alkeistasavirtakone (Kuva 1) ei toimisi sulavasti, mutta lisäämällä useampia puolia staattorin reunoille saadaan sulavampi pyörimisliike. (Kuva 2) Tasavirtakoneiden, kuin myös tasavirtamoottorien, toiminta perustuu roottorin ympärillä oleviin virrallisiin johtimiin. Johtimia on kierretty

sekä staattoriin että roottoriin, jotka saavat staattorin pyörimään. Staattorina voi toimia sekä kestopagneetti että sähkömagneetti. Pyörimisliike perustuu muuttuvaan magneettikenttään.



Kuva 3 Oikosulkumoottorin perusrakenne. ("Oikosulkumoottori," 2017)

Tasavirtamoottori hallitsi sähkömoottoreiden markkinoita vielä 1970-luvulle saakka. Oikosulkumoottorin edullisuus nosti sen suosiota, kun tasavirtamoottori vaati säännöllisin väliajoin kallista kommutaattori- ja hiilihuoltoa. Oikosulkumoottorin nimi tulee siitä, että roottorin navat ovat oikosuljettuja keskenään. Edullisuuden ja yksinkertaisuuden lisäksi oikosulkumoottorin etuja ovat helppokäyttöisyys, vähäinen huoltotarve sekä rakenteen kestävyys. Oikosulkumoottorin rakenne perustuu häkkimäiseen roottoriin. Roottori muodostuu metallisauvoista, joihin tehdään oikosulkukäämitys. (Kuva 3) (Haring, 1989; Lappeenrannan teknillinen yliopisto, 2006; Lindell, 2009)

Oikosulkumoottorin toiminta perustuu induktiovirtaan, jota syntyy oikosuljetuissa virtapiireissä. Roottori- sekä staattorivirtojen yhteisvaikutuksesta syntyy ilmavälivuo, ja Lorentzin lain mukainen vääntömomentti vaikuttaa virrallisiin sauvoihin. (Haring, 1989; Lappeenrannan teknillinen yliopisto, 2006; Lindell, 2009)

Tasasähkön heikkoutena oli sen lyhyt siirtomatka. Tasasähköä pystyttiin siirtämään vain muutamia kilometrejä voimalasta, joten se oli hyödyllinen vain kaupunkien ydinkeskustassa. Vaihtosähkö toi mahdollisuuden siirtää voimalalta sähkö satojen kilometrien päähän, pienemmällä häviöllä ja suurella jännitteellä. Vaihtosähkön edut olivat niin huomattavat, että sähkönsiirrossa tapahtui vallanvaihto. Vaihtovirtaverkoissa pystyttiin käyttämään ohuita ja halvempia johtimia. Vaihtosähkön etuna myös oli sen säädeltävyys muuntajilla. Vaihtovirta

tarjosi mahdollisuuden laajemmalle sekä tehokkaammalle sähköverkolle, jolloin myös kaupunkien ulkopuolella oleville tarjoutui mahdollisuus saada kotitalouksiinsa sähköt. (Lindell, 2009)

Sähkötekniikka yleistyi 1900-luvulla ja siitä tuli arkipäivää ihmisille. Sähkönjakeluverkko laajentui ja sähköenergian jakelu kasvoi niin teollisuuteen kuin kotitalouksiinkin. Elektroniikka-ala alkoi kehittyä, ja vuonna 1906 elektroniputki aloitti tämän kehityksen. Elektroniputki kuitenkin korvattiin, kun 1947 keksittiin transistori. Transistori on elektroniikan yksi tärkeimpiä komponentteja. Se on puolijohdekomponentti, joka voi toimia vahvistimena tai osana laitteen muistia. Transistoria pidetään elektroniikan mullistavimpana keksintönä, sillä sen avulla ollaan pystytty tekemään yhä pienempiä ja tehokkaampia elektroniikan laitteita. Elektroniikan kehityksen myötä tuli uusia innovaatioita ja keksintöjä kuten radiot. Tietokoneet yleistyivät 1970-luvulla ja matkapuhelimet 1980-luvulla. 1960-luvulla saatiin useita transistoreja samaan mikropiiriin, mutta jo 1980-luvulla piirin saatiin mahtumaan miljoonia transistoreita. Tietokoneet yleistyivät 1970-luvulla ja matkapuhelimet 1980-luvulla. 1900-luvun alussa kodinkoneiden yleistyminen, sähkömoottori käyttöjen yleistyminen teollisuudessa ja elektroniikan yleistyminen kotitalouksissa kasvattivat sähkön kulutusta, ja siksi tarvittiinkin parempia sähkönsiirtomenetelmiä. (Lindell, 2009)

Tasasähkö ei ole kokonaan hävinnyt sähkönsiirrosta. Nykypäivänäkin maiden välistä sähkönjakelua tehdään tasasähköllä, käyttäen HVDC eli suurjännitetasavirtatekniikkaa. Tasasähköä käyttävät esimerkiksi kaupunkien metrot, raitiovaunut sekä datakeskukset. Tasasähköä tutkitaan paljon, LVDC sekä MVDC ovat kehitysasteella, mutta ovat mahdollisia sähkönsiirto vaihtoehtoja tulevaisuudessa. Tasavirtamoottorit ovat myös nykypäivänä käytössä. Täysin kompensoitu tasavirtakone on erinomainen, sillä sitä on helppo säätää. Vaikka oikosulkumoottorit ovat hyvin suosittuja edullisuutensa puolesta, tasavirtamoottoreita käytetään tietyissä sovelluksissa.

### **3. KILPAILUKYKYINEN DC**

Tasasähköllä on huomattu olevan ominaisuuksia, joita voidaan hyödyntää sähköjakelussa ja -siirtoverkoissa. Tehoelektroniikan ja akkutekniikan kehitys, älykkään sähköverkon kehittyminen, hajautetun tuotannon kasvu sekä tulevaisuuden tarpeet sekä tekniikka mahdollistavat tasavirtaverkon käyttöönottoa. Muutoksen taustalla on pyrkimys päästöttömään hajautettuun energiantuotantoon. Tasavirta teknologian käyttöönotto vaatii suuria muutoksia sähköjakeluverkkoon ja energian tuotantoon. Tutkimukset uudesta luotettavammasta sähkönsiirrosta ovat käynnissä, esimerkiksi Suomessa Fingrid sekä ABB tutkivat tasavirralla siirtämistä.

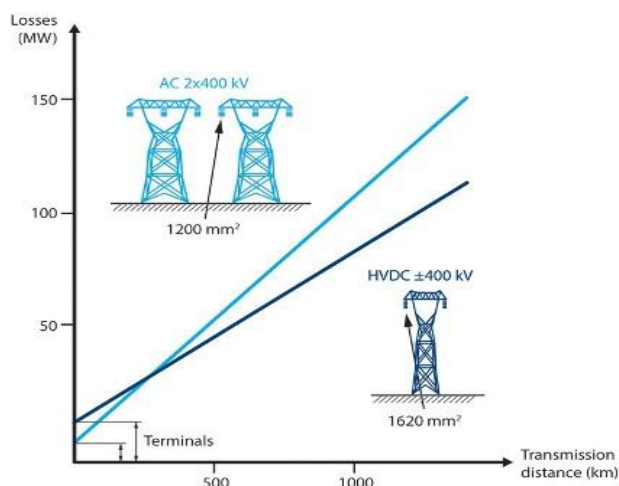
#### **3.1 Tehoelektroniikka**

Tehoelektroniikka on tuonut ratkaisun sähkönsiirron ongelmiin. Vaihtosähkön taajuuden muuntaminen ja taajuuden muutosten ehkäisy sekä tasasähkön jännitteen muuttaminen ovat olleet sähkönsiirrossa haasteita, mutta tehoelektroniikan kautta näitä on helpompi ohjailta. Tehoelektroniikkaa löytyy niin kodinkoneissa, sähköjakelussa sekä teollisuuden koneissa. Eräs tehoelektroniikan laite on konverteri, joka muokkaa taajuutta sekä jännitettä. Tehoelektroniikka toimii tulevaisuudessa älykkään sähköverkon pohjana. Älykäs sähköverkko tuo mahdollisuuden kaikille olla kuluttaja tai tuottaja sähkömarkkinoilla hajautetun tuotannon kautta. Hajautetulla tuotannolla tarkoitetaan esimerkiksi yksityisissä kotitalouksissa olevia aurinkopaneeleja, joista tuotettua sähköä myydään takaisin sähköyhtiöille.

Tehoelektroniikan tekniikan kehityksen sekä tuotannon kasvun kautta tehoelektroniikan hinta on laskenut. On siis edullisempaa ostaa tasasähkökomponentteja, kuten tasasähkökatkaisimia tai tasasähkö sulakkeita. Tehoelektroniikan kehitys ja hinnan lasku ovat mahdollistaneet tasasähkön siirron kilpailukykyisyyden. Vaihto- ja tasasuuntaajat ovat myös tuoneet uusia mahdollisuuksia tasasähkönsiirtoon.

### 3.1.1 HVDC

HVDC (High Voltage Direct Current) sähkönsiirtotekniikka, joka parantaa pitkien matkojen sähkönsiirron tehokkuutta. Sen tunnetuin kehittäjä ja valmistaja on ABB. HVDC:llä on tarkoitus siirtää suurjännitettä eli yli 1500 VDC. HVDC eli suurjännitetasavirta on testatusti luotettavampi kuin vaihtovirta. HVDC:n siirtomatkat ovat pitkiä, ja siirtomatkan häviöt pienempiä kuin vaihtovirtajohtimilla. ABB:n testausten perusteella häviöt ovat HVDC:llä käytännössä aina pienemmät pitkän matkan siirroissa kuin vaihtovirralla. Riippuen teknisestä toteutuksesta ja siirtoon käytettävästä jännitteestä, HVDC:n häviöt ovat yli 1000 km matkalla noin 3 %:a, kun taas vaihtovirralla siirrettäessä häviöt ovat kymmenkertaiset. (ABB, 2013)

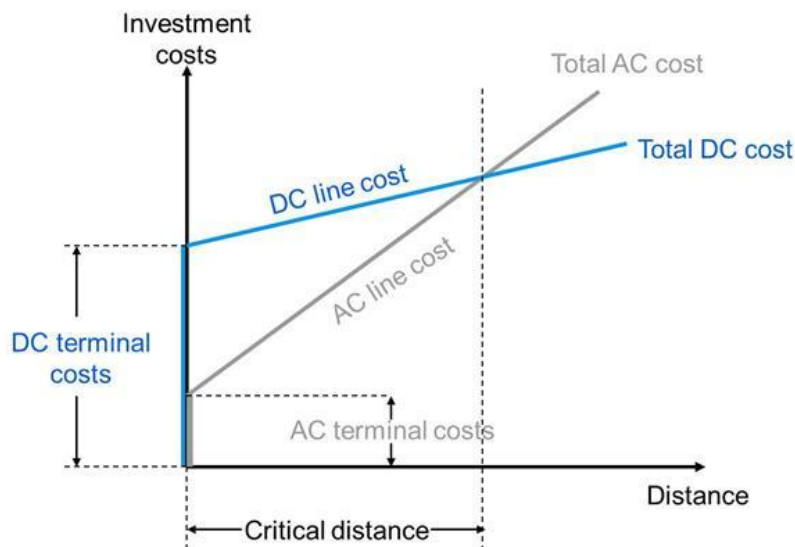


Kuva 4 AC ja DC häviöerojen vertailu saman kapasiteetin johdoilla.

HVDC:n etuna vaihtovirtajärjestelmiin on myös sen parempi hallitseminen. Kun kaksi erillistä vaihtovirtajärjestelmää liitetään samaan verkkoon, pitää verkkojen jännitteiden ja taajuuksien olla samat. Tämän saavuttaminen on hankalaa ja siksi HVDC -järjestelmät on helpompi yhdistää. HVDC on tahdistamaton järjestelmä, joka mahdollistaa verkkojen liittämisen millä tahansa jännitteellä. HVDC:tä käytetään tälläkin hetkellä ympäri maailmaa yhdistämään suuria AC-verkkoja. (ABB, 2013, 2017a, 2017b)

Yksi suurimmista HVDC:n eduista on, että sillä ei ole maksimaalista pituutta jolla se toimisi. AC-verkon kapasitanssi taas kasvaa mitä pitempi linja on. Joten AC:lle löytyy maksimi siirtomatka, jota ei kannata ylittää häviöiden ja mahdollisten häiriöiden vuoksi. HVDC:n siirtomatkan pituudesta esimerkkinä ABB:n rakentama NorNed, joka valmistui vuonna 2008. Se on 580 km pitkä ja se pystyy siirtämään DC:tä  $\pm 450$  kV. (ABB, 2017a)

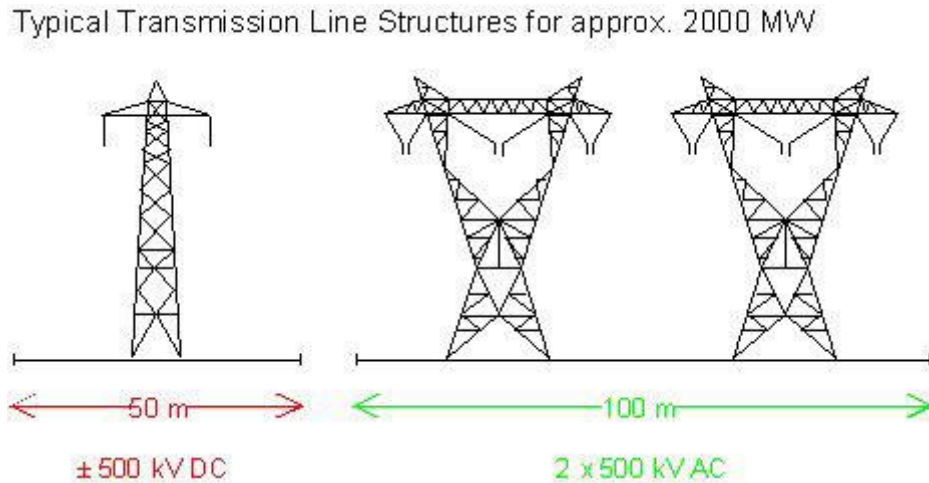
HVDC:n hallinta perustuu jatkuvaan tehon siirtoon. Tämä ominaisuus on tullut vain entistä tärkeämmäksi, koska sähkömarkkinat ovat avattu monessa maassa. HVDC-tekniikkaa parantaa usein myös AC-verkkojen toimintaa, antamalla enemmän mahdollisuuksia hallita järjestelmää. Tämän lisähallinnan avulla voidaan vaimentaa AC-verkon tehon vaihtelua. (ABB, 2017a)



Kuva 5 AC- ja DC-verkkojen kustannukset ajan funktiona.

Kokonaiskustannukset verrattuna AC-verkon ja HVDC-verkon välillä muuttuvat eri tavalla mitä pidemmälle matkalle linjaa vedetään (Kuva 5). HVDC-verkolla rakennuskustannukset ovat paljon korkeammat kuin AC-verkolla, mutta HVDC-verkon hinta ei kasva huomattavasti, vaikka siirtomatka pitenisi. AC-verkolla taas rakennuskustannukset ovat aluksi pienet, mutta hinta kasvaa voimakkaasti mitä pitempi siirtomatka on. Suurjännitetasavirtaverkot ovat siis rakennuskustannuksiltaan parempi ratkaisu pitkille siirtomatoille. (ABB, 2017c)

HVDC:llä on myös ympäristön kannalta positiivisia vaikutuksia. Voimaloiden määrä voidaan laskea, koska tekniikka mahdollistaa pidemmät siirtomatkat yhdellä johtimella. Pienempien häviöiden takia HVDC-järjestelmän CO<sub>2</sub> päästöt ovat pienemmät. AC-linjoihin verrattuna HVDC-linjoilla on myös vähemmän visuaalisia haittoja. Kuten alla olevasta kuvasta (Kuva 6) voidaan nähdä, HVDC-ilmalinjat vaativat vähemmän pinta-alaa kuin AC-järjestelmät. (ABB, 2017c; Siemens, 2017)



Kuva 6 HVDC-linjojen vaatima alue verrattuna AC-linjojen vaatimaan alueeseen. (Siemens, 2017)

Suurin osa tämän päivän DC-tekniikasta perustuu HVDC-sovelluksiin, kuten esimerkiksi Ruotsista Ahvenanmaalle ylettyvä HVDC-siirtolinja. Linja on vielä testaus vaiheessa, ja sitä käytetäänkin vielä vain toisena vaihtoehtona. Linjalla testataan tällä hetkellä HVDC:n käytövarmuutta. (Fingrid, 2017)



**Main data:**

Commissioning year:	2010
Power rating:	6,400 MW (7 200 MW)
No. of poles:	2
AC voltage:	525 kV (both ends)
DC voltage:	$\pm 800$ kV
Length of overhead DC line:	1,980 km
Main reason for choosing HVDC:	Long distance
Application:	Connecting remote generation

Kuva 7 ABB:n UHVDC-linja Kiinassa ja sen tekniset tiedot. (ABB, 2010)

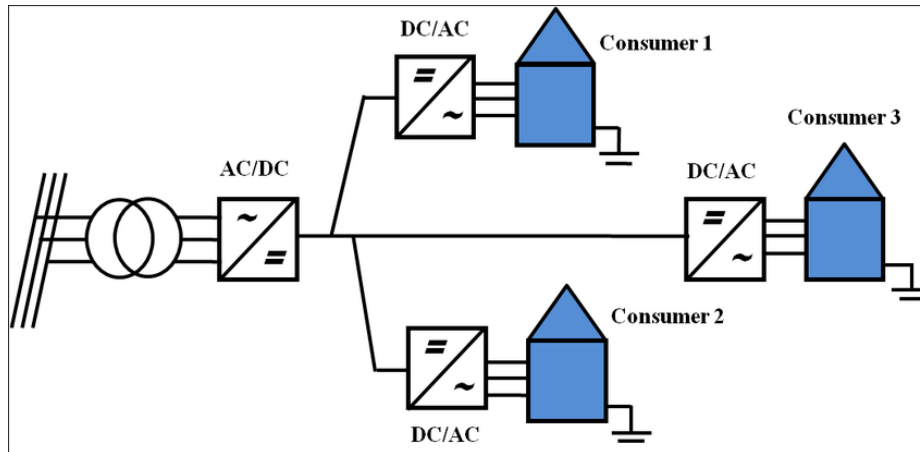
ABB on ottanut HVDC:stä seuraavan askeleen eteenpäin ja vuonna 2010 teki UHVDC linjan Kiinaan Xiangjiabasta Shanghaihin. Linjalla on pituutta lähes 2000 kilometriä. Vaihtosähköllä tämä siirtomatka olisi lähes mahdotonta toteuttaa yhtenäisellä siirtolinjalla. Linjassa käytetään  $\pm 800$  kV jännitettä (Kuva 7), mikä on yli 30 % suurempi kuin aikaisemmin Brasiiliassa tehdyssä HVDC-linjassa, jossa oli aikaisemmin suurin käytetty jännite. Häviöiden suuruuttakin pystyttiin laskemaan kymmenestä prosentista seitsemään prosenttiin. Kymmenen prosentin häviöitä on  $\pm 500$  kV linjoissa. Linjalla pystytään siirtämään jopa 7200 MW sähkötehoa, mikä on suurin nykytekniikalla saavutettu siirtoteho. (ABB, 2010)



### 3.1.2 LVDC

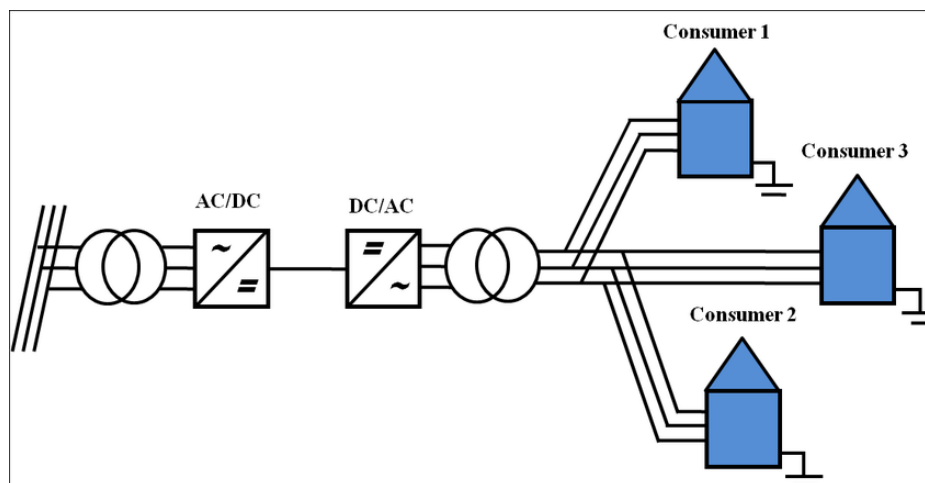
LVDC eli pienjännitetasavirta on uusi innovaatio sähkönjakelun alalla. Pienjännitedirektiivissä on määritelty LVDC-järjestelmän, pienjännitetasavirtajärjestelmän, kriteerit. LVDC-järjestelmä saa käyttää korkeintaan 1500 VDC nimellisjännitettä, kun LVAC-järjestelmät voivat käyttää korkeintaan 1000 VAC nimellisjännitettä. (EUR-Lex, 2014) LVDC-verkko koostuu tehoelektronikan komponenteista, muuntajista sekä vaihto- ja tasasuuntaajista. Periaatteena LVDC verkossa on, että käyttäjälle tulee vaihtovirtaa koteihin, mutta siirto keskijänniteverkosta kotitalouksiin tapahtuisi tasavirralla. LVDC-verkon kehittämisen idea lähti älykkäistä sähköverkoista. Älykkäillä sähköverkoilla pyritään parantamaan verkon hallintaa, sähkön laatua sekä energiatehokkuutta siirtojärjestelmissä. Etuna LVDC-jakeluverkolla on suurempi siirtokapasiteetti kuin nykyisellä AC-jakeluverkolla. Nykyinen jakeluverkko pystyy siirtämään 400 VAC. (Salonen et al., 2008; Voutilainen, 2007)

LVDC-verkko on monimutkaisempi kuin LVAC- eli pienjännitevaihtovirtaverkko. LVDC-tekniikkaa on kaksi perustyyppiä, wide LVDC sekä link LVDC. Molemmissa toteutustavoissa on yhteistä keskijänniteverkkoon liittyvä AC/DC-muuntaja eli tasasuuntaaja. Sekä wide että link LVDC-järjestelmissä voidaan käyttää kahta eri vaihtoehtoa, unipolaarista LVDC toteutusta tai bipolaarista LVDC toteutusta. (Partanen et al., 2010; Salonen et al., 2008)



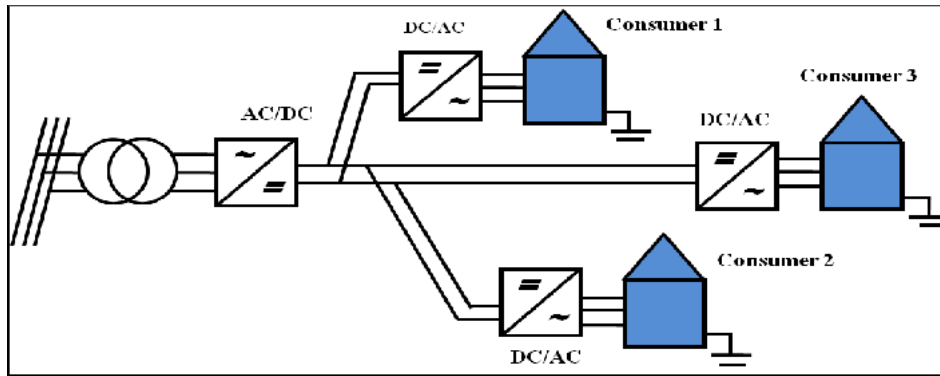
Kuva 8 Esimerkki LVDC toteutuksesta, wide LVDC toteutus. (Chauhan et al., 2012a)

Wide LVDC-toteutustapa (Kuva 8) siirtää keskijänniteverkosta muutetun vaihtovirran tasavirtana kuluttajalle. Jokaiselle kuluttajalle on asennettu oma DC/AC muuntaja eli vaihtosuuntaaja. Wide LVDC:tä voidaan verrata nykyiseen sähkönjakeluverkkoon, mutta kolmi-vaiheiset vaihtovirtajohtimet on korvattu tasavirtajohtimilla.



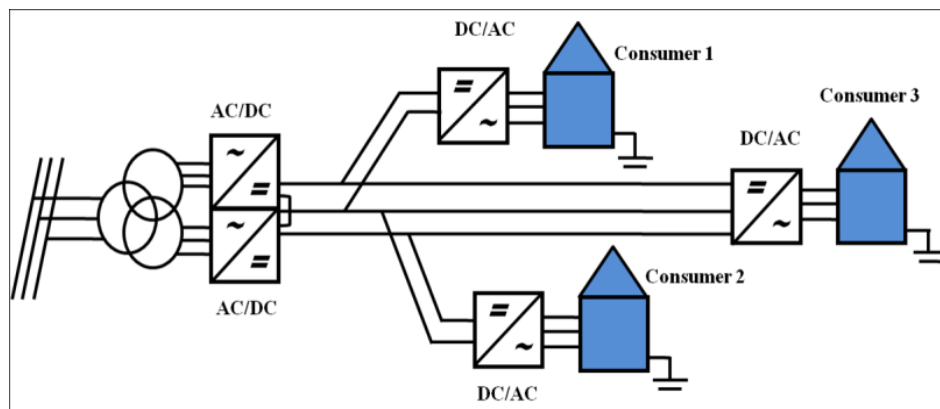
Kuva 9 Link LVDC toteutus. (Chauhan et al., 2012b)

Link LVDC-toteutus (Kuva 9) taas siirtää keskijänniteverkosta muutetun vaihtovirran tasavirtana yhdelle vaihtosuuntaajalle. Vaihtosuuntaajalta vaihtovirta siirretään jokaiselle kuluttajalle tällä alueella. Link LVDC-malli siis yhdistää kaksi vaihtovirtajärjestelmää tasavirtajohtimella. Tällä voidaan hyödyntää jo olemassa olevia vaihtovirtalinjoja.



Kuva 10 Unipolar LVDC toteutus. (Hadpe, 2015)

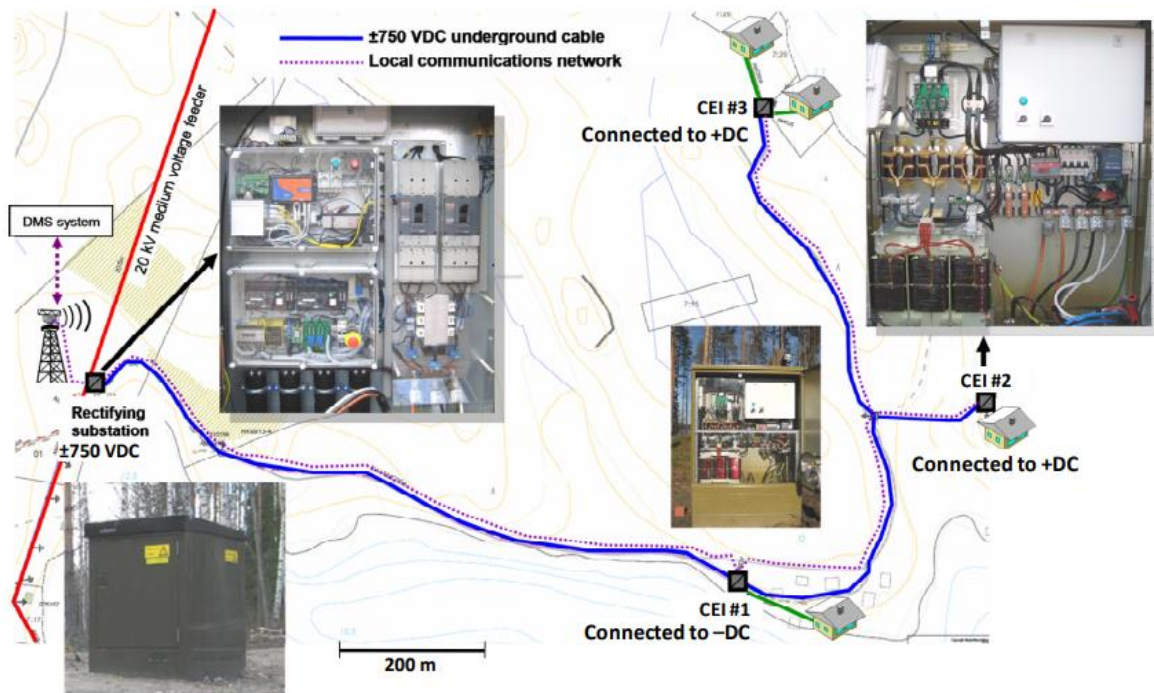
Unipolar järjestelmä (Kuva 10) on kaksijohtiminen tasasähköyhteys. Unipolaarisessa LVDC-järjestelmässä on yksi linja, jolla siirretään energiaa asiakkaalle. Toinen johdin on niin sanotusti nollajohdin, eli se on nollapotentialissa. Nollajohdin toimii virran paluujohdina. Eli kaikki unipolaarisessa rakenteessa olevat hajautetut tuotantomuodot, kuormat sekä energiavarastot ovat yhdistetty samalla linjalla. Kaikki asiakkaat ovat yhdistetty samaan jännitetasoon, jolloin jännite muutetaan sopivaksi asiakkaan päässä olevalla DC/AC muuntajalla. (Voutilainen, 2007)



Kuva 11 Bipolaarinen LVDC toteutus. (Chauhan et al., 2012c)

Bipolaarinen LVDC järjestelmää (Kuva 11) on kaksi unipolar järjestelmää yhdistettynä. Bipolaarinen järjestelmä on siis kolmijohtiminen, joista yksi johdin muodostaa nollatason. Kaksi muuta johdinta omaavat saman suuruiset mutta vastakkaismerkkiset jännitetasot, esim. +750 VDC ja -750 VDC. Asiakkaan yhdistäminen LVDC-verkkoon voidaan tehdä neljällä tavalla. Yhdistäminen voidaan tehdä positiivisesta navasta neutraaliin, positiivisen

ja negatiivisen navan välillä, negatiivisesta navasta neutraaliin tai positiivisen sekä negatiivisen navan välillä kytkettynä neutraaliin. Vikatilanteessa bipolaarijärjestelmää ei tarvitse sulkea kokonaan, koska järjestelmässä on kaksi johdinta, joissa kulkee virta sekä nollassa. Vikatilanteessa toinen johtimista voidaan sulkea, mutta sähkönsiirto onnistuu edelleen. (Voutilainen, 2007)



Kuva 12 Suomenniemen LVDC-asennus. (Nuutinen et al., 2012)

LVDC-jakelun tutkimuksessa Suomi on ollut ensimmäisten joukossa rakentamassa koeverkkoa. Lappeenrannan teknillinen yliopisto on tehnyt Suur-Savon sähkön kanssa yhteistyössä pienjännitteisen sähköjakelujärjestelmän Suomenniemelle (Kuva 12). Järjestelmä on tehty tutkimusta varten, mutta on toiminnassa ympäri vuorokauden, kuten normaali sähköverkko. Verkko otettiin käyttöön vuonna 2012, ja sen tärkeimpänä tehtävänä on antaa tutkimustuloksia LVDC-tekniikasta, kun verkkoon on liitetty neljä asiakasta. Suomenniemen LVDC-verkko koostuu tasasuuntaajasta, tasavirtajohtimesta sekä kolmesta asiakkaan päin vaihtosuuntaajasta. Vaihtosuuntaajat ovat kolmivaiheisia ja niiden nimellisteho on 16 kVA. Vaihtosuuntaajat ovat Lappeenrannan teknillisessä yliopistossa tehtyjä. Pilottiverkossa ei ole ollut suuria ongelmia, ainoastaan kolme sensorivikaa, jotka aiheuttivat yhdelle asiakkaalle lyhytaikaisia katkoksia. Tuloksia verkosta on saatu verkon hallitsemisesta, komponenttien

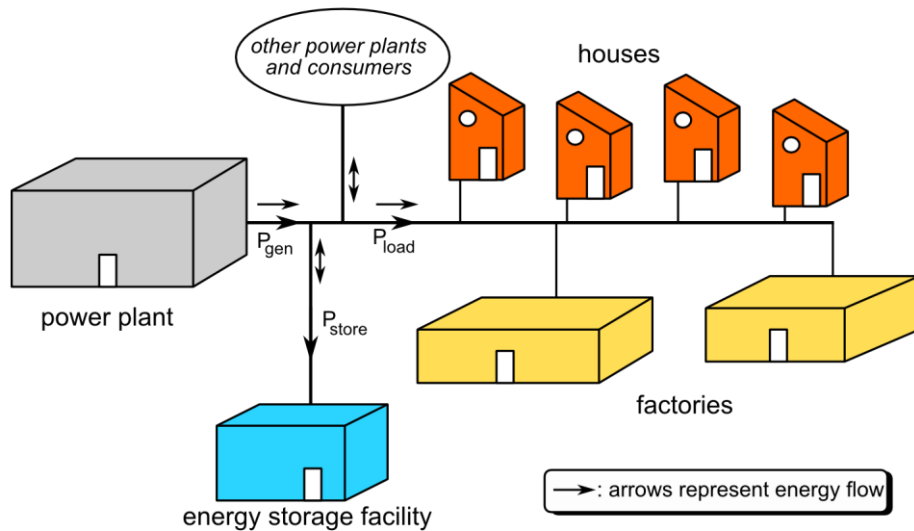
kestävyydestä, toimintavarmuudesta sekä käytännön kokemusta, jotka tukevat LVDC-verkkojen yleistymistä. (Nuutinen et al., 2012; Tani, 2017)

### 3.2 Akut



Kuva 13 Fortumin Batcave-akkukontti projekti. (Fortum, 2017a)

Akkujen kehitys on luonut mahdollisuuksia ottaa talteen uusiutuvalla energialla tuotettua sähköä. Tarkemmin sanottuna energianlähteitä, joiden tuotantoa emme voi säädellä, kuten aurinkovoima. Vaikka kulutus olisi vähäistä, mutta aurinko- tai tuulienergiaa saatavilla, olisi kannattavaa saada talteen tämä energia. Akkuihin varastoitu sähköenergia voitaisiin syöttää verkkoon suuren kulutuksen aikana laskemaan tuotannon rasitusta tai vikatilanteissa. Akkuvarastoilla tarkoitetaan energiavarastoasemia. Esimerkiksi Suomessa on käytössä Fortumin Batcave-akkuprojekti (Kuva 13). Batcave on pohjoismaiden suurin energiavarasto, sen kapasiteetti on 1 MWh ja nimellisteho 2 MW. Akkukontti koostuu 6600 litium-ioni-kennosta. (Fortum, 2017b)



Kuva 14 Energianvarastointi sähköverkossa. ("Grid energy storage," 2017)

Suurilla akkuvarastoilla pystyttäisiin kompensoimaan kulutuksen ja tuotannon muutoksia. Suuren kulutuksen aikana energiavarastosta syötettäisiin verkkoon virtaa, jolloin tuotantoa ei tarvitsisi lisätä niin paljoa. Lisäksi pienen kulutuksen aikana tuotettua energiaa saataisiin talteen juuri suuren kulutuksen aikaa varten (Kuva 14). Esimerkiksi uusiutuvan energian talteen ottaminen olisi tärkeää, että fossiilisten polttoaineiden käyttöä pystyttäisiin rajoittamaan. Uusiutuvalla energialla tarkoitetaan esimerkiksi vesi-, aurinko- ja tuulivoimaa, eli energianlähteitä, jotka ovat inhimillisestä näkökulmasta loputtomia tai hyvin nopeasti uusiutuvia. Tesla Inc. on kehittänyt uusia uusiutuvalla energialla toimivia sovelluksia, kuten sähköautoja. Teslalla ollaan myös kehitetty PowerWall, joka on kodin oma akku. Se on litiumioniakku ja sen käyttö vähentää fossiilisten polttoaineiden kulutusta. PowerWall on tarkoitus asentaa kotitalouksiin, jossa on aurinkopaneeleita, varastoimaan uusiutuvaa energiaa. (Tesla Inc., 2017)

Akkujen kapasiteetti on kehittynyt ja Japanissa onkin liitetty 2016 maailman tähän asti suurin energiavarasto sähköverkkoon. Mitsubishi Electric on valmistanut Kyushu Electric Powerin Buzen asemalla käytettävät energiavarastot ja suunnitellut aseman. Energiavarasto on Japanin lounaisosassa noin 150 kilometriä Hiroshimasta etelään. Energiavaraston kapasiteetti on 300 MWh ja nimellisteho 50 MW. Varasto koostuu 252 akkukontista, joista jokai-

nen pystyy tarjoamaan verkkoon 200 kW tehoa (Kuva 15). Konteissa olevat akut ovat so-  
dium-sulfaatti akkuja. Toinen suuri energiavarasto löytyy myös Japanista Tohokusta. Toho-  
kun energiayhtiön ja Toshiba yhteistyönä tehty energiavaraston kapasiteetti on 40 MWh,  
eli huomattavasti pienempi kuin Mitsubishi Electricin tekemä, ja nimellisteho 40 MW. To-  
shiba käytti litium-ioni akkuja (Mitsubishi Electric, 2016; Toshiba, 2016)



Kuva 15 Kyushu electric Powerin Buzen aseman ilmakuva vasemmalla. Oikealla kuva kahdesta akkukontista  
sijoitettuna päällekkäin. (Mitsubishi Electric, 2016)

Tesla Inc. rakentaa tällä hetkellä GigaFactoryä. Se on valmistuttuaan maailman suurin ra-  
kennus ja sen olisi tarkoitus tuottaa 2020 jälkeen enemmän litiumioni akkuja vuodessa kuin  
koko maailmaan on tuotettu vuoteen 2013 mennessä. Tämä tulee laskemaan akkujen hintaa  
entisestään ja edesauttaa Tesla Inc:n tavoitetta maailmasta, joka olisi riippumaton fossiili-  
sista polttoaineista. (Tesla Inc., 2017)

### 3.3 Hajautettu tuotanto ja älykäs sähköverkko

Hajautetulla tuotannolla tarkoitetaan sähkön- ja lämmöntuotannon levittämistä ympäri jake-  
luverkkoa. Tuotantolaitokset voivat olla myös pieniä, kuten kotitalouksien omat aurinkopa-  
neelit. Voimalaitosten määrä on kasvanut Suomessa ajan myötä ja laitokset ovat hajautuneet  
ympäri Suomea. Tällä hetkellä Suomessa on rekisteröityneitä voimalaitoksia 428 kappaletta,  
mutta kotitalouksissa olevien aurinkopaneelien määrää ei oteta huomioon rekisteröidyissä  
voimalaitoksissa. Rekisteröidyiksi voimalaitoksiksi lasketaan tässä tilastossa vain voittoa ta-

voittelevat voimalaitokset. (Energiavirasto, 2017a) Voimalaitoksia on lähellä kulutusta, joten siirtomatkat ovat lyhyitä. Hajautetussa tuotannossa usein suositaan uusiutuvia energian lähteitä kuten tuuli- ja aurinkovoimaa. Kun tuotanto on lähellä, on siis mahdollista siirtää tuulivoimalasta saatu sähköenergia tasavirtana suoraan kuluttajalle. Koska uusiutuvan energian tuotannossa tuotanto tapahtuu tasavirtana, voidaan se suoraan varastoida akkuihin. Kuluttajien kautta lisääntynyt hajautettu tuotanto on tapahtunut lähinnä aurinkosähkön kautta. Aurinkosähkö on yleisin, todennäköisesti suuressa mittakaavassa ainut, kodeissa käytettävä energiantuotanto menetelmä. Energiaviraston mukaan aurinkosähkön kapasiteetti on kasvanut vuodessa noin 300 prosenttia. Vuonna 2015 Suomen kapasiteetti on ollut noin 8 MW, ja 31.12.2017 mennessä kapasiteetti on kasvanut 27 MW:n lukemiin. Pientuotanto on kasvanut Suomessa myös muiden uusiutuvien energianlähteiden osalta. Pientuotanto on jaoteltu tuotantomuodoittain aurinko-, tuuli-, bio-, vesi- ja dieselenergiaan sekä muihin energianlähteisiin. Suomen kolme johtavaa energiantuotantomenetelmää ovat diesel, vesi ja aurinko. Eniten on dieselenergian tuotantoa, jota on noin 59,3 MW, sitten on vesivoima, jolla tuotetaan 34,2 MW, ja kolmantena aurinko, 27 MW. (Energiavirasto, 2017b)

Älykäs sähköverkko muodostuu älyä sisältävistä toiminnallisuuksista sekä integroiduista palveluista. Nämä helpottavat verkon hallintaa sekä antavat mahdollisuuden kuluttajalle toimia sähkömarkkinoilla. Vasta kun älykäs sähköverkko on laajalti käytössä, hajautettu tuotanto saa suuren markkinaraon. Älykäs sähköverkko on joustavampi kuin nykyinen, ja täten pienimuotoisemmat sähkön tuotantomenetelmät pystyisivät toimimaan paremmin verkossa. Hajautetussa tuotannossa haasteena on sähkön laadun ja määrän hallinta. Lämmöntuotanto onkin jo suurelta osin hajautettua. (Partanen et al., 2010; Seppänen, 2014)

Älykäs sähköverkkoverkko syntyy dataverkkojen ja energiaverkkojen yhdistymisestä. Lisäämällä hallintatekniikkaa ja digitaalisen informaation käyttöä, voidaan sähköverkon luotettavuutta, tehokkuutta sekä turvallisuutta parantaa. Tämä mahdollistaisi laajemman hajautettujen tuotantoresurssien käytön. Lisäksi ”älykkään” teknologian käyttöönotto mahdollistaa käyttäjien kulutuksen paremman mittauksen sekä verkon toimintojen tilan seurannan. (Seppänen, 2014)



## 4. EROT VAIHTO- JA TASASÄHKÖN VÄLILLÄ

### 4.1 Tasasähkön edut verrattuna vaihtosähköön

Osa sähköstä tuotetaan tasavirtana, sillä uusiutuvan energian käyttö on lisääntynyt huomattavasti. DC:nä tuotettu sähkö voidaan varastoida sellaisenaan, kun taas vaihtovirta on tasasuunnattava varastointia varten. Myös valtaosa laitteista ja koneista käyttää tasavirtaa, joten tasavirtaverkkoja käytettäessä muuntajien käyttäminen vähenisi huomattavasti. Tasasähkö on kuitenkin muutettava oikealle jännitteelle riippuen laitteen jännitekestoisuudesta.

Suurin etu tasavirran käytössä on sähköverkkojen parantaminen. DC-verkkoa käytettäessä ei olisi tarvetta huomioida värähtelyjä, joita AC-verkko tuottaa. DC-verkko on myös energiatehokkaampi kuin AC lähes jokaisella sovellusalueella. DC-verkon energiatehokkuus johtuu nykyisten johtojen tehokkaammasta pinta-alan käytöstä. Tasajännitettä käytettäessä virta jakautuu tasaisesti koko johtimen pinta-alalle, kun taas vaihtojännitettä käytettäessä virta pakkautuu johtimen reunoille.

Vaihtosähkön siirrossa on otettava huomioon, että siirrettävän jännitteen määrä on sen tehollisarvo eikä huippuarvo. Jos vaihto- ja tasajännitteellä siirrettäessä molempien huippuarvot ovat 800 V, niin tasajännitteellä siirto tapahtuu huippuarvollaan 800 V:lla kun taas vaihtojännitteellä se on 566 V:a. (Kaava 1)

$$U = \frac{\hat{U}}{\sqrt{2}} \quad (1)$$

Vaihtosähköllä siirrettäessä pitää siis syöttää 1,4 kertaa enemmän jännitettä, että saadaan siirrettyä samalla jännitteellä kuin tasasähköllä. Tasasähkön tehollisarvo on yhtä suuri kuin huippuarvo.

Vaihto- ja tasasähkön turvallisuudessa on eroja. Tasasähköstä aiheutuva magneettikenttä on vähemmän haitallista ihmisille sekä muille eliöille kuin vaihtosähköstä aiheutuva magneettikenttä. Tasasähköstä muodostuva magneettikenttä on staattinen, eli muuttumaton tai se muuttuu erittäin hitaasti. Maapallon oma magneettikenttä on myös staattinen, mutta eriarvoinen eri puolilla maapalloa. Suomessa maan magneettikentän suuruus on noin 50  $\mu\text{T}$ , jolle

altistumme koko ajan. Vaihtosähköstä muodostuva magneettikenttä on taas muuttuva, ja niille altistumiselle on annettu ohjearvoja pitämään terveysvaikutukset mahdollisimman vähäisinä. Vaihtosähkön magneettikentän ohjearvot sähkönsiirto johdoille 20  $\mu\text{T}$ :a, 10  $\mu\text{T}$ :a sekä 3  $\mu\text{T}$ :a. 20  $\mu\text{T}$ :a on 400 kVAC johtimien ohjearvo, 10  $\mu\text{T}$ :a on 110 kVAC:n ohjearvo ja 3  $\mu\text{T}$ :a on 20 kVAC:n ohjearvo, ja ohjearvoja ei saisi ylittää. Kuten huomataan, maapallon oma magneettikenttä on noin viisinkertainen verrattuna 400 kVAC:n ohjearvoon verrattuna. Staattinen magneettikenttä aiheuttaa vähemmän syöpäriskiä sekä muita fysiologisia vaikutuksia ihmiskehoon. Vaihtuvalla magneettikentällä on todettu suurempi riski vaikutuksille. (EUR-Lex, 2011; Jokela et al., 2006)

Vaihtosähkön taajuuden muutos on myös yksi turvallisuusriski, sillä se aiheuttaa helpommin hengenvaarallista kammioväriä, kun ihminen joutuu kosketuksiin vaihtosähkön kanssa. Vaihtosähkön tehollisarvon ja huippuarvon suuruusero on myös yksi turvallisuustekijä. Kun verrataan vaihto- ja tasasähköä kosketustilanteessa, tasasähköstä on helpompi irrottautua itse. Tämä johtuu aiheutuvasta ärsytyksestä elimistössä, joka aiheutuu sähköstä. Jotta saadaan sama ärsytys tasasähköllä kuin vaihtosähköllä, tarvitaan noin 2-3 kertainen jännite tasasähköä. (Mäkinen, 2017)

## **4.2 Vaihtosähkön edut verrattuna tasasähköön**

Pitkien matkojen siirron ainut mahdollisuus nykytekniikalla on ollut AC-verkot, jotka ovat tänä päivänäkin käytössä olevat ratkaisumme sähkön siirtoon. HVDC on haastamassa suurjännitesiirossa jo vaihtosähkön asemaa, mutta pienjännitesiirossa käytetään pääsääntöisesti vaihtosähköä. LVDC ovat haastamassa LVAC-verkkojen asemaa, mutta LVDC on vasta tutkimus vaiheessa, joten mahdollinen muutos vie aikaa. AC-verkkojen etuna on siirtää pitempiä matkoja suurella jännitteellä nykytekniikalla. Vaihtosähköllä tehtävässä sähkönjakelussa etuna on sen olemassaolo. Sähkönsiirtojärjestelmäämme ei tarvitsisi tehdä suuria muutoksia, jos jatkamme vaihtosähköllä sähkönjakeluumme.

Vaihtosähkön suurimpana etuna on sen edullisuus verrattuna tasasähköön. Vaikka tasasähköstä on tulossa sähkönsiirrossa vielä kilpailukykyinen, vaihtosähkön rakennuskustannukset ovat tällä hetkellä vielä huomattavasti pienemmät. Poikkeuksena toimii pitkien matkojen

siirrot, esimerkiksi maiden väliset sähkönsiirrot. Tällä hetkellä lyhyellä matkalla vaihtosähkö on siis edullisempi siirtomuoto.

Vaihtosähkön etuna on sen yksinkertaisuus verrattuna tasasähkön jakeluun. Kuluttajalle on vielä tällä hetkellä saatava sähkö vaihtovirtana, jotta kaikki laitteet toimivat. Siksi tasavirta pitää muuttaa vaihtovirraksi ennen kotitalouksia. Muunto voi tapahtua joko ennen jokaista kotitaloutta erikseen tai yhdessä paikassa ennen asuinalueita, josta sähkö siirretään kotitalouksiin vaihtosähköä.

## 5. JOHTOPÄÄTÖKSET

Tasasähkön ja vaihtosähkön kilpailuun on tulossa käänne tasasähkön eduksi lähitulevaisuudessa. Elektroniikka, teknologia ja ennen kaikkea tehoelektroniikka kehittyvät koko ajan antaen parempia mahdollisuuksia luoda tasasähkönjakeluverkkoja. Jatkuva sähkön käytön kasvu vääjäämättä pakottaa kehittämään sähkönjakelujärjestelmiä kehittymään paremmiksi sähkön laadun sekä käyttövarmuuden suhteen.

Tasasähkönjakelun monimutkaisuudesta huolimatta, sähkönjakelumuotona LVDC ja HVDC ovat lupaavia mahdollisuuksia. Monimutkaisuudesta huolimatta järjestelmä antaa paremmat hallintamahdollisuudet jakeluverkossa kuin nykyinen AC -verkko. Älykkään sähköverkon myötä tasasähköverkot olisivat optimaalinen vaihtoehto. Jatkuva tiedonsiirto asiakkaiden käytöstä ja verkon tilasta takaisi paremman sähkönjakelun laadun, kun verkontilasta olisi jatkuvaa tietoa. Mahdollisia vikatilanteita voitaisiin ennakoida, ja suunnitella huoltoa tehtäväksi ennaltaehkäisemään käyttökatkoja.

Tasasähköverkkojen rakennuskustannukset ovat tällä hetkellä vielä liian korkeat laajamittaista käyttöönottoa ajatellen. Loppupään sähkönjakelun toteutus LVDC-tekniikalla vaatisi suuria investointeja, vaikka nykyisiä vaihtosähköjohtimia voitaisiinkin käyttää LVDC-jakeluverkossa. Vaihto- ja tasasuuntaajia tarvitaan LVDC-verkossa paljon, joten näiden komponenttien hintatason tulisi olla alhainen. Vaihto- ja tasasuuntaajien hinnat ovat laskeneet lähivuosina huomattavasti, ja tulevat todennäköisesti laskemaan vielä lisää tulevien vuosien aikana, mutta ovat silti hintavia vielä tällä hetkellä. Vaihto- ja tasasuuntaajien käyttövarmuutta tulee myös tutkia ja parantaa korkealaatuisemman sähkönjakelun saavuttamiseksi.

Suurimpana etuna tasasähköllä on sähkönsiirron pienet häviöt ja suurempi sallittu jännite. Tämä huomataan etenkin HVDC-sovelluksessa, jossa häviöt ovat noin 3-7 %:n luokkaa, riippuen käytetyn jännitteen suuruudesta. Hyvin pitkän matkan siirtäminen yhdellä siirtolinjalla on huomattavasti edullisempaa, varsinkin kun häviöt ovat pienemmät johtuen erittäin korkeasta siirtojännitteestä. Erityisiin sovelluksiin, kuten maiden tai merien yli tapahtuvaan sähkönsiirtoon, kehitetty HVDC on kuitenkin yleistymässä myös maiden sisäisessä sähkönsiirrossa. Suurissa maissa, joissa kaupunkien välimatkat ovat suuret, HVDC-tekniikalla voitaisiin korvata nykyinen vaihtosähköön perustuva sähkön siirtojärjestelmämme. HVDC:n

rakennuskustannukset ovat korkeammat kuin vaihtosähköllä, mutta mitä pidempää matkaa siirretään, sitä edullisemmaksi HVDC tulee verrattuna vaihtosähköllä tehtävään sähköjake-  
keluun.

Ympäristöystävällisempi sähköjake-  
kelu on aina suotavaa, ja siksi tasasähköllä on etuja ver-  
rattuna vaihtosähköön. Tasasähköllä tehtävässä sähköjake-  
kelussa häviöt ovat monin kertai-  
sesti pienemmät kuin vaihtosähkössä, eli vähemmän energiaa menee hukkaan sähköjake-  
kelussa. Myös energiavarastot toisivat

Vaihto- ja tasasähköstä molemmista syntyy magneettikenttä, mutta vaihtosähkö tuottaa vaih-  
tuvaa magneettikenttää. Vaihtuva magneettikenttä on tutkitusti vaarallisempi ihmiselle, luo-  
den suuremman syöpäriskin ja aiheuttaa kammiovärinän riskiä. Tasasähkön muodostama  
magneettikenttä on staattinen, eli se on muuttumaton tai se muuttuu erittäin hitaasti. Kysei-  
nen magneettikenttä on vaarattomampaa ihmiselle, ja esimerkiksi maapallon oma magneet-  
tikenttä on staattinen. Suorassa kosketuksessa oleminen vaihto- tai tasasähköön on vaaral-  
lista, mutta tasasähköstä on ihmisen helpompi irrottautua. Tasasähkö on turvallisempaa sillä  
se ei ole jatkuvasti muuttuva kuten vaihtosähkö. Pienillä virroilla ärsytyksiä testatessa vaih-  
tosähkön tuntee kulkevan kehossa koko kosketuksen ajan, mutta tasasähköllä sähkövirran  
huomaa vain kosketushetkellä. Tämän jälkeen keho tottuu sähkövirtaan.

Tasasähköjake-  
kelu tulee varmasti yleistymään tulevaisuudessa. Kuinka nopeasti tämä tapah-  
tuu, riippuu LVDC-järjestelmien kokeilujen tuloksista sekä tehoelektroniikan kehityksestä.  
HVDC on jo toimivaksi todettu tekniikka, vaikka edelleen jatketaan sen käyttövarmuu-  
den tutkimista. LVDC:n toimivuudesta kertoo Suomenniemellä oleva LVDC-järjestelmä,  
joka on antanut lupaavia ja positiivisia tuloksia.

## LÄHTEET

- ABB, 2017a. Technical advantages - Why choose HVDC over HVAC | ABB [WWW Document]. URL <http://new.abb.com/systems/hvdc/why-hvdc/technical-advantages> (accessed 11.27.17).
- ABB, 2017b. Why choose HVDC over HVAC | ABB [WWW Document]. URL <http://new.abb.com/systems/hvdc/why-hvdc> (accessed 11.27.17).
- ABB, 2017c. Why HVDC Economic and environmental advantages - Why choose HVDC over HVAC | ABB [WWW Document]. URL <http://new.abb.com/systems/hvdc/why-hvdc/economic-and-environmental-advantages> (accessed 11.27.17).
- ABB, 2013. Mikä HVDC on? [WWW Document]. URL <http://www.abb.fi/cawp/db0003db002698/edde51566582e2dbc1257291003ef780.aspx> (accessed 11.27.17).
- ABB, 2010. UHVDC project by ABB in China [WWW Document]. URL <http://search-ext.abb.com/library/Download.aspx?DocumentID=POW0056&LanguageCode=en&DocumentPartId=&Action=Launch> (accessed 11.30.17).
- Chauhan, R.K., Singh, B., Pindoriya, N., 2012a. Wide LVDC.
- Chauhan, R.K., Singh, B., Pindoriya, N., 2012b. Link LVDC.
- Chauhan, R.K., Singh, B., Pindoriya, N., 2012c. Bipolar LVDC.
- Energiavirasto, 2017a. Voimalaitosrekisteri.
- Energiavirasto, 2017b. Sähköverkkoon kytketty aurinkosähkökapasiteetti yli kolminkertainen vuodessa - Media - Energiavirasto [WWW Document]. URL <https://www.energiavirasto.fi/-/sahkoverkkoon-kytketty-aurinkosahkokapasiteetti-yli-kolminkertainen-vuodessa> (accessed 12.18.17).
- EUR-Lex, 2014. Pienjännite direktiivi LVD 2014/35/EU.

- EUR-Lex, 2011. Euroopan parlamentin ja neuvoston direktiivi 2011/0152 (COD).
- Fingrid, 2017. Kantaverkon kehityssuunnitelma 2017-2027.
- Fortum, 2017a. Batcave kuvat.
- Fortum, 2017b. Pohjoismaiden suurin akku otettiin käyttöön Järvenpäässä | Fortum [WWW Document]. URL <https://www.fortum.com/fi/media/Pages/pohjoismaiden-suurin-akku-otettiin-kayttoon-jarvenpaassa.aspx> (accessed 12.11.17).
- Grid energy storage, 2017. . Wikipedia.
- Hadpe, S., 2015. An unipolar LVDC distribution system.
- Haring, T., 1989. Oikosulkumoottorin hyötysuhde määrää käyttökustannukset. Konepajamies Met. Keskusliitto 1989.
- Jokela, K., Korpinen, L., Hietanen, M., Puranen, L., Huurto, L., Pättikangas, H., Toivo, T., Sihvonen, A.-P., Nyberg, H., 2006. Säteilylähteet ja altistuminen.
- Lappeenrannan teknillinen yliopisto, S. osasto, 2006. Sähkömoottori [WWW Document]. archive.li. URL <http://archive.li/MVqNw> (accessed 12.4.17).
- Lindell, I., 2009. Sähkön pitkä historia, Otavatieto. Otava.
- Mäkinen, P., 2017. SFS 6002 käytännössä, 28. ed. Sähkö- ja teleurakoitsijaliitto STUL.
- Mitsubishi Electric, 2016. Mitsubishi Electric Delivers High-capacity Energy-storage System to Kyushu Electric Power's Buzen Substation.
- Nuutinen, P., Kaipia, T., Peltoniemi, P., Lohjala, J., Salonen, P., Lana, A., Pinomaa, A., Partanen, J., Matikainen, M., Nieminen, A., Karhinen, M., 2012. Field Test Platform for LVDC Distribution.
- Oikosulkumoottori, 2017. . Wikipedia.

- Partanen, J., Lassila, J., Pyrhönen, J., Niemelä, M., Silventoinen, P., Kaipia, T., Salonen, P., Peltoniemi, P., Nuutinen, P., Lana, A., Haakana, J., Pinomaa, A., Makkonen, H., Voutilainen, V., Paajanen, P., Järventausta, P., Tuusa, H., Suntio, T., Kannus, K., Lahti, K., Nikander, A., Mäkinen, A., Alahuhtala, J., Suntala, T., Nousiainen, L., Rekola, J., Vornanen, T., 2010. Tehoelektroniikka sähkönjakelussa - Pienjännitteinen tasasähköjakelu.
- Salonen, P., Kaipia, T., Nuutinen, P., Peltoniemi, P., Partanen, J., 2008. An LVDC Distribution System Concept.
- Seppänen, J., 2014. Sähköenergian varastointitekniikat älykkäässä sähköverkossa.
- Siemens, 2017. HVDC Benefits [WWW Document]. URL <https://www.energy.siemens.com/ru/en/power-transmission/hvdc/applications-benefits/hvdc-benefits.htm#content=Environmental%20Benefits> (accessed 12.4.17).
- Tani, J., 2017. Pienjännitteisen tasasähkönjakelun liiketaloudellinen kannattavuus jakeluverkkoyhtiöille.
- Tesla Inc., 2017. Tesla Gigafactory [WWW Document]. URL [https://www.tesla.com/fi\\_FI/gigafactory](https://www.tesla.com/fi_FI/gigafactory) (accessed 11.30.17).
- Toshiba, 2016. Toshiba Completes Delivery of World's largest Lithium-ion Battery Energy Storage System in Operation --BESS for Tohoku Electric Power Company Begins Operation--.
- Voutilainen, V., 2007. Tasasähkönjakelun käyttöpotentiaalin määrittäminen.



## **LITTEET**