Tampereen yliopisto

Eetu Pantti

TASASÄHKÖN KÄYTTÖMAHDOL-LISUUDET SIIRTOVERKOSSA

Kandidaatintyö
Informaatioteknologian ja viestinnän tiedekunta
Tarkastaja: Juhani Bastman
Toukokuu 2025

TIIVISTELMÄ

Eetu Pantti: Tasasähkön käyttömahdollisuudet siirtoverkossa
Kandidaatintyö
Tampereen yliopisto
Tieto- ja sähkötekniikan kandidaattiohjelma, sähkötekniikka
Toukokuu 2025

Tasasähkön käyttö osana sähköenergiajärjestelmää ei ole uusi asia, vaikka se on perinteisesti toteutettu ja edelleen perustuu pitkälti kolmivaiheisen vaihtosähköjärjestelmän hyödyntämiseen. Maailman ensimmäinen jakeluverkosto rakennettiin New Yorkiin vuonna 1882 ja se toimi tasasähköllä. Vaihtosähkön käyttöön liittyy kuitenkin tietyissä käyttökohteissa sellaisia teknisiä rajoitteita, joita tasasähköllä ei ole. Tämän takia siirtoverkoissa on myöhemmin ryhdytty käyttämään tasasähköä laajemmin. Nykyisin sitä hyödynnetään laajasti merikaapeleissa ja pitkissä siirtoyhteyksissä sekä eri vaihtosähköverkkojen yhdistämisessä. Jo vuonna 1954 on otettu käyttöön ensimmäinen kaupallinen merikaapeliyhteys Ruotsin ja Gotlannin välille ja nyt niitä on jo pelkästään Euroopan merissä kymmenittäin. Vuonna 2018 Kiinassa on otettu käyttöön yli 3000 kilometrin pituinen tasasähköyhteys, joka on tällä hetkellä maailman pisin siirtoyhteys. Tasasähköyhteyksien käyttö on lisääntynyt voimakkaasti viime vuosikymmenten aikana, sillä niissä käytettävät tehopuolijohdekomponentit ovat kehittyneet ja hinnat ovat laskeneet. Näiden komponenttien hinnat ovat kuitenkin edelleen merkittävä osuus tasasähköyhteyden kokonaiskustannuksista ja oleellinen tekijä, kun tehdään kustannusvertailua tasa- ja vaihtosähköyhteyksien välillä.

Tässä kandidaatintyössä selvitettiin, millaista hyötyä tasasähkön käytöllä voidaan saavuttaa suurjännitteisessä voimansiirrossa siirtoverkkojen jännitetasolla. Lähestymistapana on teknisten ja taloudellisten näkökulmien tarkastelu. Näiden avulla perustellaan, miksi tasasähköä tyypillisesti käytetään yllä mainittuihin käyttökohteisiin. Työ on kirjallisuuskatsaus, jossa on perehdytty aihetta käsittelevään kirjallisuuteen ja koottu yhteen sekä analysoitu tutkimuskysymyksen kannalta oleellisinta tietoa.

Työn alussa käsitellään siirtoverkkojen rakennetta ja käyttötarkoitusta, jossa on esimerkinomaisesti otettu tarkasteluun Suomen siirtoverkko. Tasasähköyhteydet toimivat osana muuta vaihtosähköverkkoa, joten ne vaativat suuntaaja-asemat yhteyden molempiin päihin, joilla vaihtosähkö muutetaan tasasähköksi ja päinvastoin. Suuntaajien toteutukseen on vakioitunut kaksi erilaista tyyppiä, joiden toiminnan pääpiirteet kuvataan työssä. Koska työ käsittelee tasasähkön käyttöä siirtoverkoissa, on välttämätöntä ymmärtää siirtoverkon tarkoitus ja periaatteet tasasähköyhteyksien toiminnasta. Näiden jälkeen työ perustuu pitkälti tasa- ja vaihtosähköyhteyksien ominaisuuksien vertailuun yllä mainituista näkökulmista, mikä on luonnollista, kun etsitään tasasähkön käytöstä saatavia hyötyjä ja perustellaan, miksi se sopii vaihtosähköä paremmin tiettyihin käyttökohteisiin. Tasasähköyhteyksien avulla pystytään myös parantamaan muun vaihtosähköverkon toimintaa monin eritavoin, joista muutamaa havainnollistetaan tässä työssä. Tämä perustuu siihen, että suuntaajien avulla tasasähköyhteyden tehon suuruutta pystytään säätämään ja suuntaa muuttamaan erittäin nopeasti. Työn lopussa on lyhyehkö katsaus tasasähkön käytön tulevaisuuden näkymiin, mikä perustuu sähkönsiirtotekniikan parissa työskentelevien organisaatioiden mielipiteisiin.

Avainsanat: tasasähkö, tasasähköyhteys, HVDC, siirtoverkko, siirtoyhteys, vaihtosähköyhteys, merikaapeli, synkroniverkko

Tämän julkaisun alkuperäisyys on tarkastettu Turnitin Originality Check -ohjelmalla.

TEKOÄLYN KÄYTTÖ OPINNÄYTTEESSÄ

Opinnäytteessäni on käytetty tekoälysovelluksia:

☐ Ei

☒ Kyllä

Ilmoitukseni mukaan olen käyttänyt opinnäytteessäni tutkielmaprosessin aikana seuraavia tekoälysovelluksia: ChatGPT ja Scopus AI

Tekoälysovellusten nimet ja versiot: ChatGBT-4 ja Scopus AI

Käyttötarkoitus: Näitä sovelluksia on käytetty työn aiheeseen liittyvien relevanttien lähdemateriaalien etsintään. Tekoäly helpottaa ja nopeuttaa tiedonhakua, koska sille voi antaa erittäin yksityiskohtaisia tehtävänantoja, joiden perusteella se ehdottaa sopivia lähteitä. Olen kuitenkin arvioinut jokaisen tekoälyn ehdottaman lähdemateriaalin osalta niiden luotettavuutta ja läheskään kaikkia ei ole käytetty. Suurin osa työssä käytetyistä lähteistä on etsitty tavanomaisesti hyödyntämällä erilaisia tietokantoja ja hakukoneita.

Osiot, joissa tekoälyä on käytetty: Luvut 3 ja 4.

Olen tietoinen siitä, että olen täysin vastuussa koko opinnäytteeni sisällöstä, mukaan lukien osat, joissa on hyödynnetty tekoälyä, ja hyväksyn vastuun mahdollisista eettisten ohjeiden rikkomuksista.

SISÄLLYSLUETTELO

1. JOHDANTO 1
2. SIIRTOVERKON RAKENNE JA TARKOITUS 3
3. TASASÄHKÖYHTEYDEN TOIMINTA 6
3.1 Verkkokommutoiva tasasähköyhteys 7
3.2 Jännitelähdesuuntaajalla varustettu tasasähköyhteys 13
4. HVAC- JA HVDC-SIIRTOYHTEYKSIEN VERTAILU 17
4.1 Tasasähkön hyödyt ja käyttökohteet 17
4.1.1 Merikaapelit 17
4.1.2 Pitkät siirtoyhteydet 20
4.1.3 Eri vaihtosähköverkkojen yhdistäminen 22
4.1.4 Tasasähköyhteydet vaihtosähköverkon toiminnan parantajina 23
4.2 Taloudelliset näkökulmat 24
5. TASASÄHKÖN KÄYTÖN TULEVAISUUDEN NÄKYMÄT SÄHKÖN SIIRROSSA 27
6. YHTEENVETO 28
LÄHTEET 30

LYHENTEET JA MERKINNÄT

HVAC	suurjännitteinen vaihtosähkösiirto (high voltage alternating current)
HVDC	suurjännitteinen tasasähkösiirto (high voltage direct current)
LCC	verkkokommutoiva suuntaaja (line commutated converter)
SVC	staattinen loistehon kompensaattori (static var compensator)
VSC	jännitelähdesuuntaaja (voltage source converter)

C	kapasitanssi
I_c	kapasitiivinen varausvirta
U_d	tyristorisillan muodostama tasajännite
U_{dr}	tyristorisillan muodostaman tasajännitteen keskiarvo
U	kolmivaihejärjestelmän pääjännite
U_o	kolmivaihejärjestelmän vaihejännite
U_1 ja U_2	vaihtosähköyhteyden päiden pääjännitteet
X	vaihtosähköjohdon reaktanssi
α	tyristorin ohjaus- eli sytytyskulma
γ	tyristorin sammutuskulma
δ_{12}	pääjännitteiden U_1 ja U_2 välinen vaihekulma
ω	kulmataajuus

1. JOHDANTO

Sähköenergiajärjestelmän toiminta perustuu pitkälti kolmivaiheisen vaihtosähköjärjestelmän hyödyntämiseen sähkön tuotannosta sen siirtoon, jakeluun ja aina loppukäyttäjille asti. Voimalaitosten generaattorit tuottavat luonnostaan vaihtojännitettä, jonka tasoa on yksinkertaista muuttaa siirtoa ja jakelua varten tarkoituksenmukaiseksi muuntajia hyödyntäen. Monet kuormat, kuten teollisuuslaitosten oikosulkumoottorit, myös vaativat vaihtosähköä toimiakseen.

Tasasähkön käyttö sähköenergiajärjestelmässä ei kuitenkaan ole uusi asia. Maailman ensimmäinen generaattori tuotti tasasähköä ja ensimmäinen jakeluverkosto rakennettiin New Yorkiin vuonna 1882, joka toimi tasasähköllä 110 V jännitetasolla. [1] Vuonna 1954 on otettu käyttöön ensimmäinen kaupallinen merikaapelilla toteutettu tasasähköyhteys Ruotsin ja Gotlannin välille. Tasasähköyhteyksien käyttö on lisääntynyt voimakkaasti viime vuosikymmenten aikana niissä tarvittavien tehopuolijohdekomponenttien merkittävän kehityksen ja hintojen laskun myötä. [2] Vakiintunut tekniikka tasasähköllä toteutettuun siirtoon on olemassa ja sitä kehitetään aktiivisesti. Uusia tasasähköyhteyksiä rakennetaan jatkuvasti ympäri maailmaa. Nykyään toteutetut tasasähköyhteydet toimivat osana muuta vaihtosähköverkkoa. Ei ole tarkoituksenmukaista toteuttaa sähkön siirtoa kokonaan tasasähkön avulla vaan se integroidaan osaksi muuta vaihtosähköjärjestelmää. Tasasähköyhteys voi toimia saman verkon sisällä muiden vaihtosähköyhteyksien rinnalla tai yhdistää kaksi eri verkkoa toisiinsa.

Tässä työssä selvitetään, minkälaisia hyötyjä tasasähkön käytöllä voidaan saavuttaa verrattuna perinteisen vaihtosähkön käyttöön suurjännitteisessä voimansiirrossa siirtoverkkojen jännitetasolla, ja mitkä ovat tasasähköyhteyksien tyypilliset käyttökohteet. Lähestymistapa on teknisten ja taloudellisten tekijöiden tarkastelu. Suurjännitteisistä tasa- ja vaihtosähköjärjestelmistä puhuttaessa käytetään usein englanninkielisiä lyhenteitä HVDC (high voltage direct current) ja HVAC (high voltage alternating current).

Alussa luvussa 2 tehdään katsaus siirtoverkon rakenteeseen ja käyttötarkoitukseen, jossa tarkastelun kohteena on esimerkinomaisesti Suomen siirtoverkko. Työn tarkoitus ei ole kuitenkaan keskittyä tietyn maan siirtoverkkoon vaan käsitellä asiaa yleisemmin. Luvussa 3 tarkastellaan tasasähköyhteyksien teknistä toimintaa ja niihin olennaisesti liittyviä komponentteja ja ilmiöitä, jotta saadaan käsitys, miten tasasähköyhteys voi toimia osana sähkön siirtoa. Luvussa 4 vertaillaan tasa- ja vaihtosähköyhteyksien ominaisuuk-

sia teknisistä ja taloudellisista näkökulmista. Vertailun avulla saadaan käsitys tasasähkön käytön tuomista hyödyistä, käyttökohteista ja siitä, missä tapauksissa sen käyttö on järkevämpää tai ainoa vaihtoehto. Lopuksi luvussa 5 on katsaus tasasähkön käytön tulevaisuuden näkymiin.

2. SIIRTOVERKON RAKENNE JA TARKOITUS

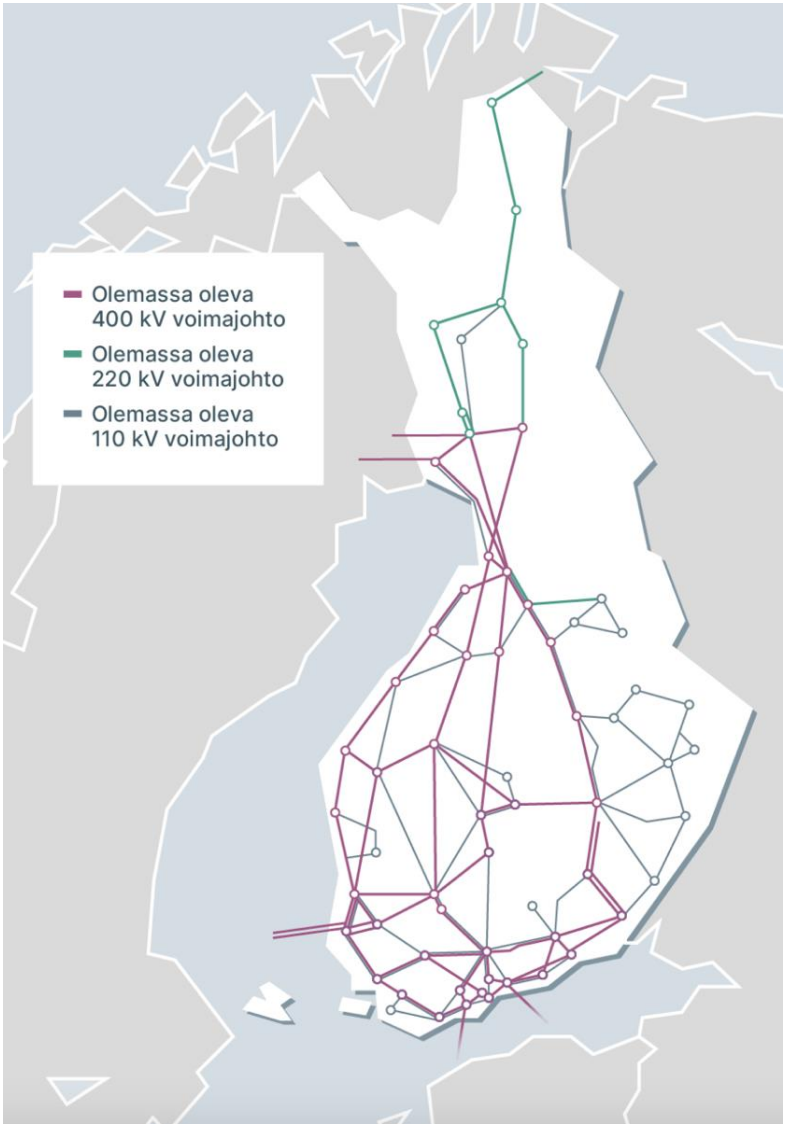
Voimalaitoksia ei tyypillisesti sijoiteta kulutuskeskittymien lähelle, joten sähköenergiaa on siirrettävä pitkien etäisyyksien päähän. Tämä tapahtuu siirtoverkon välityksellä, jonka tehtävä on mahdollistaa tuotannon sijoittaminen kauas. Syynä voimalaitosten tarkoituksenmukaiselle sijoittamiselle etäälle kulutuksen painopisteistä voidaan pitää teknisiä, taloudellisia, esteettisiä ja turvallisuuteen liittyviä tekijöitä. Esimerkiksi Suomessa ydinvoimalat on sijoitettu lähelle merta, koska ne tarvitsevat merkittävän määrän vettä jäähdytysprosessiin. Tuulivoimala pitää jonkin verran melua ja sen siivistä voi lentää jäätä talvella eivätkä tuulisuusolosuhteet ole kaikkialla samat. Vesivoimala voidaan sijoittaa vain sinne, missä virtaavaa vettä on luonnostaan tarjolla. Lisäksi on ilmeistä, että harva haluaa asua suuren voimalaitoksen vieressä.

Suomen siirtoverkko, jota myös kantaverkoksi kutsutaan, muodostaa sähkön siirron rungon. Voimalaitosten generaattorit kytketään muuntajien välityksellä siirtoverkkoon. Suomessa siirtoverkkoon kuuluu kaikki 400 kV ja 220 kV johdot sekä sähköasemat ja lisäksi osa 110 kV voimajohdoista. [3] Siirtoverkko on merkittävän kokoinen infrastruktuuri, sillä siihen kuuluu noin 14 500 kilometriä voimajohtoja ja yli 120 sähköasemaa (2023) [4].

Johdolla siirrettävä teho on suoraan verrannollinen käytettyyn jännitetasoon sekä siinä kulkevaan sähkövirtaan ja tehohäviöt taas siirrettävän virran neliöön ja impedanssiin. Tämän perusteella on selvää, että siirtohäviöiden pienentämiseksi ja siten hyötysuhteen parantamiseksi on järkevintä nostaa jännite korkeaksi. Kuitenkin jännitetasoa kasvatettaessa kasvaa myös eristysrakenteille asetetut jännitelujuusvaatimukset ja siten verkon rakentamiskustannukset. Näin ollen sopivan jännitetason valinta on teknistaloudellinen optimointitehtävä, joka perustuu siihen, paljonko johdolla on tarkoitus siirtää tehoa ja mikä on siirtoetäisyys. Tästä syystä siirtoverkoissa käytetään erilaisia jännitetasoja. [3]

Noin 75 % kaikesta Suomessa siirretystä sähköenergiasta siirretään kantaverkon kautta [4]. Täten on selvää, että käyttövarmuus on ehdoton kantaverkolle asetettu vaatimus. Käyttövarmuuden takaamiseksi siirtoverkko on rakennettu vahvasti silmukoiduksi, joka mahdollistaa sähkön siirron varayhteyden, kun vian seurauksena rinnakkainen yhteys irtoaa verkosta. [3]. Varayhteyden toteutumista kutsutaan N-1-periaatteeksi, jonka mukaan järjestelmän pitää kestää yksittäiset viat ja niiden seurauksena tapahtuva vikaantuneen komponentin irtoaminen ilman tuotannolle ja kulutukselle aiheutuvaa siirron keskeytystä [5]. Jos siirtoverkossa on tasasähköyhteyksiä, niiden siirtokapasiteetti vaikuttaa myös verkon käyttövarmuuteen, koska yhteyden irtoaminen vaikuttaa koko verkon siirtokapasiteettiin [2]. Suomen sisäisessä siirtoverkossa ei ole kuitenkaan tällä hetkellä tasasähköyhteyksiä.

Kuvasta 1 nähdään, miten kantaverkko on rakennettu Suomessa. Siinä on eritelty edellä mainitut käytetyt jännitetasot. Myös verkon silmukoitu rakenne on helppo havaita.



Kuva 1. *Suomen kantaverkon voimajohdot 2024.* [4]

Kulutuksen painopisteiden lähellä siirtoverkon jännite muutetaan alueverkkojen 110 kV jännitetasolle. Suuret teollisuuslaitokset ja kaupungit saavat sähköenergiansa tällä jännitetasolla. Alueverkoista sähkö jaetaan jakeluverkkoihin, joiden jännitetaso on tyypillisesti 20 kV. Edelleen sähkö jaetaan jakeluverkosta pienjänniteverkkoihin, joista kotitaloudet ja muut pienkuluttajat saavat sähköenergiansa. Pienjänniteverkoissa jännitetaso on 400 V, jolloin vaihejännite 230 V on sopiva kulutuskojeille. [3]

Suomen kantaverkon toiminnasta ja ylläpidosta vastaa valtakunnallinen kantaverkkoyhtiö Fingrid Oyj. Yhtiön tärkein tehtävä on huolehtia, että sähköenergian tuotanto ja kulutus ovat tasapainossa koko ajan. Kulutus vaihtelee joka hetki ja sen suuruus on sidok-

sissa vuorokauden- ja vuodenaikaan. Tämä edellyttää jatkuvaa säätöä tuotannolle. Tasapaino on tärkeää verkon taajuuden ja jännitetasojen ylläpidon kannalta. Pohjoismaissa on sovittu, että taajuus pyritään pitämään ±0.1 Hz sisällä nimellisestä 50 Hz taajuudesta ja esimerkiksi Fingridin nettisivuilta [6] voi seurata sähköjärjestelmän tilaa reaaliaikaisesti. Sivuilta näkee kokonaistuotannon ja erilaisten energiatuotantomuotojen osuuden lisäksi taajuuden vaihtelut ajan kuluessa. Järjestelmän teknisesti tarkoituksenmukainen käyttö, suunnittelu ja valvonta sekä edellä mainittu käyttövarmuus ovat myös yhtiön vastuulla.

Fingrid ei vastaa kaikista verkoista vaan jakeluverkkojen ylläpitäminen kuuluu paikallisille jakeluverkkoyhtiöille, joilla on alueellinen monopoli. [3] Kaikkia olemassa olevia 110 kV voimajohtoja ei katsota kuuluvaksi kantaverkkoon. Fingridin kantaverkon nimeämispäätöksen mukaan liittymisjohdot, säteittäiset johdot ja paikallista sähkönjakelua palvelevat 110 kV verkot eivät kuulu kantaverkkoon riippumatta siitä, ovatko ne silmukoidussa käytössä. Liittymisjohdolla tarkoitetaan johtoa, joka yhdistää voimalaitoksen tai yhden sähkönkäyttöpaikan, kuten esimerkiksi suuren teollisuuslaitoksen kantaverkkoon. Kantaverkkoon kuuluu noin 7600 km 110 kV johtoja. [7] Suomessa toimii 77 jakeluverkkoyhtiötä ja näiden omistama yhteenlaskettu 110 kV johtojen pituus on noin 7900 km eli yli puolet olemassa olevista 110 kV johdoista (2022). Suurimmat omistukset ovat Carunalla ja Elenialla. [8]

Kuvasta 1 havaitaan myös, että Suomesta on siirtoyhteydet maa- ja meriteitse Ruotsiin, Viroon ja Norjaan. Edellä mainitusta Fingridin nettisivusta pystyy myös tarkastelemaan sähkön tuonti- ja vientitehoja Suomen ja muiden maiden välillä. Suomi on osa yhteispohjoismaista synkronialuetta Ruotsin, Norjan ja Itä-Tanskan kanssa. Tämä yhteispohjoismainen järjestelmä on kytketty Keski-Euroopan järjestelmään tasasähköyhteyksin. [4] Esimerkiksi Suomesta kulkee Viroon kaksi HVDC-merikaapelia. Näihin ja yleisesti merikaapeleihin palataan tarkemmin luvussa 4. Suomesta on siirtoyhteydet myös Venäjälle mutta sähkökauppa on lopetettu Ukrainan sodan seurauksena.

3. TASASÄHKÖYHTEYDEN TOIMINTA

Tasasähköyhteyden kolme pääkomponenttia ovat tasa- ja vaihtosuuntaajat sekä itse siirtoyhteys. Suuntaajien avulla vaihtosähkö muutetaan tasasähköksi ja päinvastoin. Suuntaajia on erilaisia, mutta suuritehoisiin tarkoituksiin on vakiintunut kaksi hallitsevaa tyyppiä, joiden toimintaan keskitytään tässä työssä. Ne ovat verkkokommutoiva eli virtalähdesuuntaajalla sekä itsekommutoiva eli jännitelähdesuuntaajalla varustettu yhteys. Näistä käytetään englanninkielisiä nimityksiä line commutated converter (LCC) ja voltage source converter (VSC). Verkkokommutoivassa tasasähköyhteydessä virran suunta ei voi muuttua, mutta jännitteen napaisuus voi, kun taas jännitelähdesuuntaajaa hyödyntävässä yhteydessä tilanne on päinvastainen. [2] Nimitys virtalähdesuuntaaja viittaakin siihen, että virran suunta ei muutu ja jännitelähdesuuntaaja siihen, että jännitteen napaisuus ei muutu. Tasasähköyhteyksien määrän kasvua ja niiden kehittymistä on edesauttanut puolijohdekomponenttien ja tehoelektroniikan kehittyminen, joihin suuntaajien toiminta perustuu. Näiden komponenttien hinnat ovat myös laskeneet viime vuosikymmenten aikana merkittävästi. Puolijohdekomponentteja on käytetty tasasähkövoimansiirrossa 1970-luvulta lähtien ja niiden kehittäminen jatkuu edelleen. Syynä on se, että ne kestävät suuria virtoja ja niitä pystytään käyttämään kytkiminä suurilla tehoilla. [9]

Siirtoyhteys voidaan toteuttaa joko avojohdolla tai kaapelilla. Joskus siirtoyhteyttä ei rakenneta ollenkaan ja molemmat suuntaajat sijaitsevat samalla sähköasemalla, jolloin kyseessä on niin kutsuttu back-to-back- yhteys. Tällaista yhteyttä voidaan käyttää kahden eri synkroniverkon yhdistämiseen tai saman silmukoidun verkon sisällä, kun tehon suuruus ja suunta halutaan määrätä. [10] Näistä ominaisuuksista puhutaan tarkemmin luvussa 4.

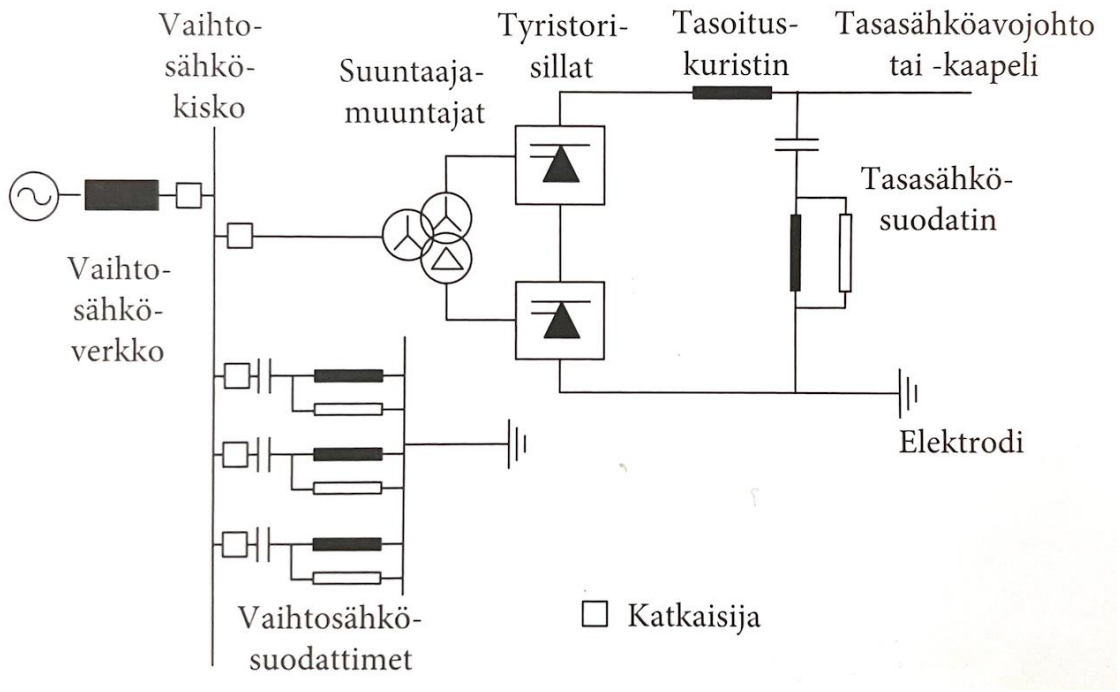
Vaihtosähköllä johdon ja kaapelin siirtämä teho määräytyy itsestään, joten erillistä säätöjärjestelmää ei tarvita. Teho jakautuu luonnostaan silmukoidun verkon rinnakkaisten johtojen kesken siten, että se on kääntäen verrannollinen johdon impedanssiin (katso kaava 2). Tasasähköyhteydellä nimensä mukaisesti teho siirtyy tasavirralla ja -jännitteellä ja näiden suureiden säätämiseen tarvitaan erillinen säätöjärjestelmä. Tehon säätö perustuu siihen, että yhteyden päiden välinen jännite-ero saa aikaan tasavirran, jonka suuruus riippuu siirtoyhteyden ominaisuuksista eli resistanssista. Jännitettä ei kuitenkaan pidetä käytännön säätösuureena, koska jänniteheilahtelut voivat vaikuttaa jännite-eroon merkittävästi ja silloin siirtotehokin muuttuu äkillisesti. Tasasähköyhteyden tärkein ominaisuus on, että suuntaajien avulla tehon suuruus ja suunta pystytään määräämään

ja se voidaan tehdä erittäin nopeasti. Lisäksi tasasähköjohdot ja –kaapelit eivät kuluta tai tuota loistehoa, eikä niillä ole stabiiliusongelmia, kuten vaihtosähköverkoilla on. [2] Myös stabiiliusongelmiin palataan tarkemmin luvussa 4.

Seuraavaksi tarkastellaan näiden kahden yleisimmän tasasähköyhteyden toiminnan pääpiirteitä. Tarkastelu keskittyy niiden sisältämiin komponentteihin ja siihen, kuinka ne vaikuttavat tasasähköyhteyden toimintaan. Kaiken kattavaa selitystä tasasähköyhteyksien toiminnasta ja ominaisuuksista ei siis tehdä, mutta aiheesta löytyy runsaasti kirjallisuutta pääasiassa englannin kielellä.

3.1 Verkkokommutoiva tasasähköyhteys

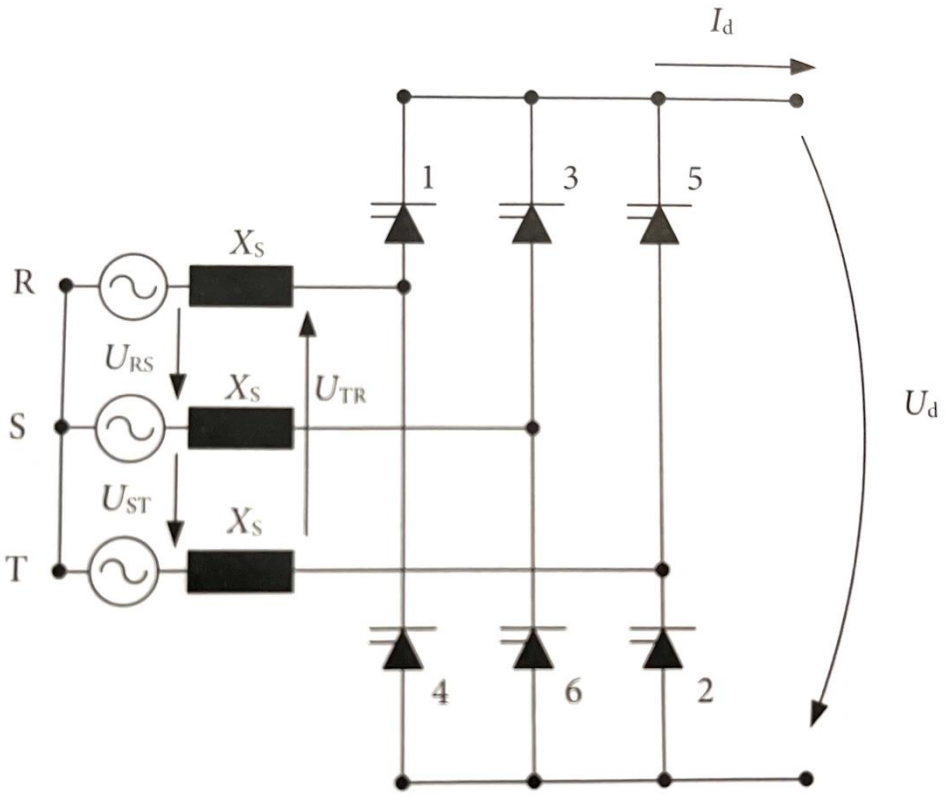
Verkkokommutoivan tasasähköyhteyden suuntaaja-aseman periaatteellinen rakenne on esitetty kuvassa 2. Oleellisimmat osat ovat tyristorisilloilla toteutetut suuntaajat, suuntaajamuuntajat, siirtojohto tai –kaapeli ja suuntaaja-aseman vaihtosähkökisko. Lisäksi erilaiset vaihtosähkösuodattimet, kompensointikondensaattorit, tasasähkösuodattimet ja tasasähköjohdon tasoituskuristimet ovat olennaisia järjestelmän toiminnan kannalta. [2] Säätöjärjestelmä kuuluu aseman laitteistoon, vaikka sitä ei kuvaan ole merkitty. Kuvassa on vain yksi suuntaaja-asema. Toinen suuntaaja-asema sijaitsee yhteyden toisessa päässä.



Kuva 2. *Verkkokommutoivan tasasähköyhteyden suuntaaja-aseman periaatteellinen rakenne.* [2]

Verkkokommutoivan suuntaajan toiminta perustuu tyristorien käyttöön. Tyristori on diodin kaltainen puolijohdekomponentti eli se johtaa virtaa vain toiseen suuntaan siinä tapauksessa, kun jännite sen yli on positiivinen. Toisin kuin diodi, tyristori vaatii vielä lisäksi erillisen ohjauspulssin syttyäkseen eli johtaakseen virtaa. Tyristoria ei kuitenkaan voi sammuttaa ohjauspulssilla, vaan se lopettaa virran johtamisen ainoastaan silloin, kun jännite sen yli kääntyy negatiiviseksi. Käytännön tyristori ei sammu välittömästi negatiivisen jännitteen vaikuttaessa sen yli, sillä kun tyristori johtaa, sen sisälle kertyy varauksia, joiden pitää ehtiä purkautumaan. Jos näin ei tapahdu, tyristori voi alkaa johtamaan myötäsuuntaisella jännitteellä ilman ohjauspulssia. Varausten purkautumiseen kuluva aika pitää huomioida tyristoreilla toteutetun suuntaajan käytössä ja kuvassa 4 tämä aika on ilmaistu sammutuskulmalla γ .[2] Verkkokommutoivassa tasasähköyhteydessä virran suunta ei voi muuttua juuri tyristorien ominaisuuksien takia. Jotta virralle on kulkureitti, toisella suuntaaja-asemalla tyristorit ovatkin siten aseteltu sähköisesti toisinpäin verrattuna kuvan 2 tyristoreihin (katso kuva 5).

Suuntaajan rakenteessa kuudesta tyristorista on rakennettu tyristorisilta siten, että kukin vaihtosähköpuolen kolmesta vaiheesta on kytketty kahden eri tyristorin väliin. Tällaisen 6-pulssisillan rakenne on esitetty kuvassa 3. Kuvan 2 yhden tyristorimerkin paikalla on siis todellisuudessa kuvan 3 mukainen rakenne. Tavallisesti kaksi 6-pulssisiltaa kytketään sarjaan siten, että ne muodostavat yhdessä 12- pulssisillan, kuten kuvasta 2 havaitaan. Tyristorisiltoihin kytketty suuntaajamuuntaja voi olla joko kuvan 2 mukainen kolmikäämitysmuuntaja, jossa on yhteinen ensiökäämi ja molemmille silloille omat toisiokäämitykset tai sitten kumpaankin tyristorisiltaan kytketään erillinen kaksikäämitysmuuntaja. Molemmille tapauksille yhteistä on se, että toinen toisiokäämi on kytketty kolmioon ja toinen tähteen. Näiden käämikytkentöjen avulla saadaan aikaan 12-pulssisillan vaatima 30 asteen vaihe-ero. [2]



Kuva 3. *Tyristoreilla toteutetun 6-pulssisillan rakenne.* [2]

Käytetty termi verkkokommutoiva liittyy juuri tyristorisillan toimintaan. Kommutointi tässä yhteydessä tarkoittaa virran siirtymistä tyristorilta toiselle samalla puolella tyristorisiltaa eli esimerkiksi tyristorilta 1 tyristorille 3 (kuva 3). Kuten mainittua tyristori sammuu vain, kun jännite sen yli on negatiivinen. Vaihtojännite vaihtelee luonnostaan positiivisen ja negatiivisten arvojen välillä ja siten 3-vaihejärjestelmän eli verkon jännitteet hoitavat tyristorin sammutuksen ja virran siirtymisen tyristorilta toiselle, kun tyristorille annetaan lisäksi sytytyspulssi. Todellisuudessa kommutointi ei tapahdu välittömästi, vaan se vie jonkin verran aikaa ja silloin tasajännite laskee. Kommutoinnin viemää aikaa vastaa tietty kulma ja sitä kutsutaan kommutointikulmaksi. Tätä vaikutusta ei kuitenkaan ole otettu huomioon tämän osion tarkasteluissa. Koska verkkokommutoiva suuntaaja tarvitsee vaihtosähköverkon jännitteitä kommutointiin, pitää vaihtosähköverkon olla suuntaajan liittymispisteessä riittävän vahva. Verkon vahvuutta kyseisessä pisteessä voidaan arvioida siinä sattuvan kolmivaiheisen oikosulkuvirran suuruuden tai verkon oikosulkutehon perusteella. Vahvan verkon ominaisuuksiin kuuluu suuri oikosulkuvirta, joka tarkoittaa sitä, että oikosulkuimpedanssi on pieni. Siten vahvan verkon jännitteet eivät heilahtele kovin paljon kuormituksen muuttuessa. Jos jänniteheilahtelut ovat suuria, kommutoinnissa saattaa tapahtua häiriöitä ja tasasähköyhteys ei toimi kunnolla. Jos verkko ei ole tarpeeksi vahva, tilannetta voidaan parantaa asentamalla synkronikompensaattori aseman vaihtosähkökiskoon. [2]

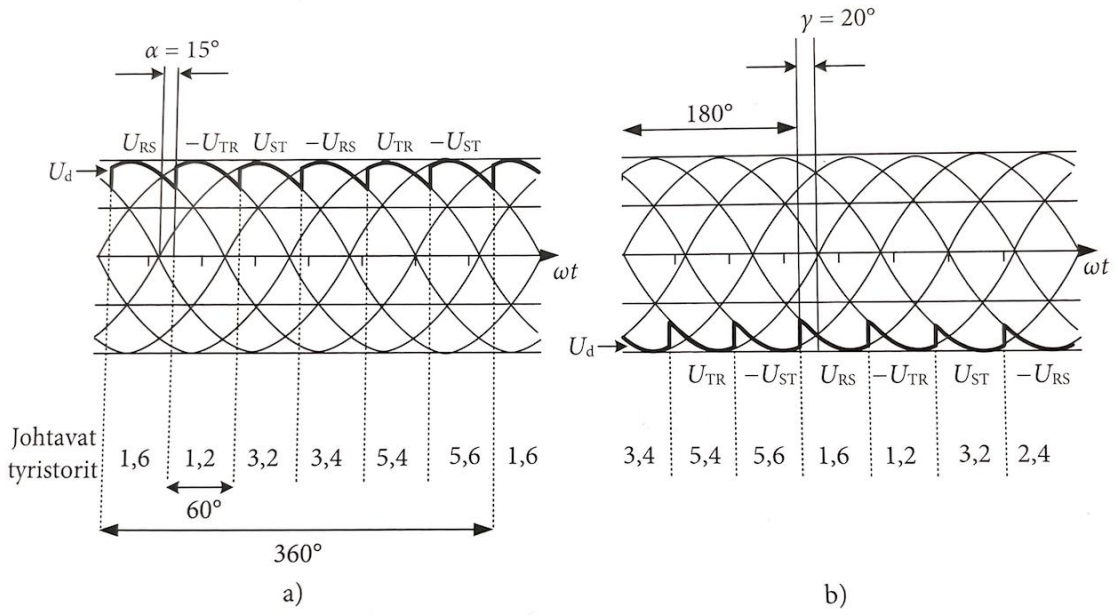
Kuvassa 3 tyristorien numerointi kuvaa missä järjestyksessä virta kulkee niiden läpi. Jotta virta voi kulkea tyristorisillan ja siten tasasähköyhteyden läpi, täytyy kahden eri tyristorin johtaa samanaikaisesti, mutta kuitenkin niin, että ne eivät ole päällekkäiset tyristorit, sillä se tarkoittaisi oikosulkua. Kuvan 4 alaosasta ilmenee paremmin mitkä tyristorit johtavat samanaikaisesti ja kuinka virta vaihtelee eri tyristoriparien välillä yhden vaihtosähköjakson aikana.

Tyristorien syttymistä voidaan viivästää määrittelemällä missä kohtaa vaihtojännitteen käyrämuotoa tyristorille annetaan ohjauspulssi. Tätä viivästystä kuvataan ohjaus- eli sytytyskulmalla α. Kuvassa 4 tasasuuntauskäytössä ohjauskulma on esimerkinomaisesti asetettu arvoon 15 astetta. Kuvasta havaitaan myös, että jos ohjauskulma olisi nolla astetta, tasajännitteen käyrämuoto mukailisi kolmivaiheisten vaihtojännitteiden verhokäyrää. Sytytyskulmalla pystytään siten vaikuttamaan tuotetun tasajännitteen keskiarvoon ja tällä tavallla säätämään jännitettä. Tarkalleen tyristorisillan tuottaman tasajännitteen eli kuvassa 4 olevan jännitteen U_d keskiarvo U_{dr} saadaan integroimalla pääjännitteen arvoa U siltä ajalta, kun yksi tyristori johtaa. Tuloksena saadaan lauseke $U_{dr} = 1.35U\cos(\alpha)$, joka ilmaisee jännitteen keskiarvon pääjännitteen ja ohjauskulman avulla. Huomataan, että tyristorisillan tuottama tasajännite U_d ei ole täysin tasaista vaan sisältää pientä aaltoilua. Tyristorisilta aiheuttaa siten yliaaltoja tasasähköpuolelle. Tästä syystä tasasähköjohdon kanssa sarjassa on tasoituskuristin, joka pienentää jännitteen aaltoilun seurauksena syntyvää virran sykkeisyyttä ja siten yliaaltoja. Kuvaan 2 on merkitty myös tasasähkösuodatin, jonka tehtävä on vähentää tasajännitteen yliaaltoja. [2]

Toisen aseman tyristorisilta toimii aina tasasuuntaajana ja toisen vaihtosuuntaajana, siten että teho siirtyy tasasuuntaajalta vaihtosuuntaajalle. Ohjauskulman arvolla pystytäänkin määrittelemään se, toimiiko tyristorisilta tasa- vai vaihtosuuntaajana. Ohjauskulman ollessa välillä 0–90 astetta, suuntaaja toimii tasasuuntaajana ja tuottaa positiivisen tasajännitteen. Kun ohjauskulma on 90–180 astetta, suuntaaja toimii taas vaihtosuuntaajana ja tuottaa negatiivisen tasajännitteen. Ohjauskulman vaikutus tuotetun tasajännitteen polariteettiin pystytään näkemään myös helposti yllä esitetyllä kaavalla, sillä välillä 0–90 kosini saa positiivisia arvoja ja välillä 90–180 negatiivisia arvoja. Jotta käytännön tyristori ehtii todella sammumaan, voi ohjauskulma vaihtosuuntauskäytössä kuitenkin olla todellisuudessa enintään 180-γ astetta, missä γ on edellä kerrottu sammutuskulma. Jos sammutuskulma valitaan liian pieneksi, kommutointi voi epäonnistua ja tyristori saattaa edelleen johtaa, vaikka seuraava tyristori olisi jo sytytetty. [2]

Tehon kulkusuunta pystytään vaihtamaan juuri muuttamalla vaihtosuuntaaja tasasuuntaajaksi ja päinvastoin eli säätämällä ohjauskulman arvoja. Silloin myös edellä kuvaillun mukaan tasasähköyhteyden kummankin pään jännitteen polariteetti muuttuu päinvas-

taiseksi. Tehon suuruutta säädetään muuttamalla suuntaaja-asemien jännitettä, joka vaikuttaa suoraan yhteyden päiden väliseen jännite-eroon ja siten virtaan. Jännitteensäätö hoidetaan suuntaajamuuntajien käämikytkimien ja tyristorisillan ohjauskulman avulla. Käämikytkimellä säädetään tyristorisillalle menevää jännitettä ja tyristorisillan ohjauskulmalla säädetään itse tasajännitettä. Ohjauskulmalla pystytään tarvittaessa tekemään erittäin nopeaa jännitteen säätöä ja käämikytkimellä jännitettä säädetään jatkuvassa tilassa ja hitaissa vaihtojännitteen muutoksissa. Käämikytkimellä tapahtuva jännitteensäätö perustuu muuntajan muuntosuhteen muuttamiseen. Suuntaajamuuntaja on monimutkaisempi ja kalliimpi kuin tavanomainen muuntaja, sillä edellä mainitut käämitykset monimutkaistavat rakennetta ja käämikytkimeen tarvitaan enemmän portaita, jotta sillä voidaan säätää jännitettä tarkemmin. [2], [9]



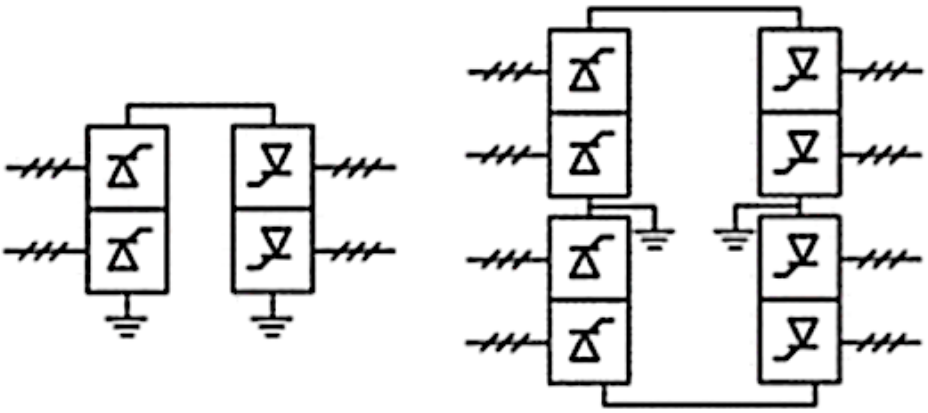
Kuva 4. *Tyristoreilla toteutetun 6-pulssisillan tuottaman sykkivän tasajännitteen käyrämuodot. Kohdassa a) suuntaaja toimii tasasuuntaajana ja tuottaa positiivisen tasajännitteen ja kohdassa b) vaihtosuuntaajana ja tuottaa negatiivisen tasajännitteen. Kolmivaiheiset vaihtojännitteet ovat suuntaajamuuntajan toision pääjännitteitä kuvan 3 mukaisesti.* [2]

Toimiessaan tyristorisilta kuluttaa loistehoa, joka kasvaa ohjaus- ja sammutuskulmien kasvaessa. Tästä syystä näiden kulmien arvot halutaan pitää pienenä ja jännitettä säädetään pääasiassa suuntaajamuuntajan käämikytkimen avulla. Lisäksi mitä isompi teho tasasähköyhteydellä siirretään, sitä isompi on loistehon kulutus, sillä pätötehon siirto lisää myös loistehon kulutusta. Tavallisilla ohjauskulman arvoilla verkkokommutoiva yhteys kuluttaa loistehoa noin 50 % siirrettävän pätötehon arvosta. Jos esimerkiksi pätötehoa siirretään 800 MW, kuluttaa tyristorisilta noin 400 MVAr loistehoa. Loistehon siirto laskee verkon jännitettä ja tämän estämiseksi loisteho on kompensoitava paikallisesti

suuntaaja-asemalla. Kompensointiin voidaan käyttää esimerkiksi synkronikompensaattoreita, staattisia loistehon kompensointilaitteita (SVC) tai rinnakkaiskondensaattoreita. Loistehon kulutuksen takia verkkokommutoivaa tasasähköyhteyttä voidaan käyttää jatkuvaan loistehon säätöön. Tällaisessa tapauksessa ohjauskulmat säädetään sellaiseen arvoon, että tyristorisilta kuluttaa juuri halutun määrän loistehoa.

Tyristorisillan toiminta aiheuttaa yliaaltovirtoja vaihtosähköverkon puolelle, sillä puolijohdekomponenttien virta-jännite-riippuvuus on epälineaarista. Siksi vaihtosähkökiskoon tarvitaan vaihtosähkösuodattimia, joita on tyypillisesti useita. Nämä yliaaltosuodattimet voivat myös tuottaa osan tyristorisillan tarvitsemasta loistehosta ja niitä kytketään tai irrotetaan verkosta tilanteen mukaan. Samoin kuin loistehon kulutus, myös yliaaltojen suodatustarve kasvaa pätötehon siirron kasvaessa. [2]

Verkkokommutoivia tasasähköyhteyksiä voidaan rakentaa eri tavoin. Kuvassa 5 on havainnollistettu kaksi erilaista rakennetta, joista vasemmanpuoleista kutsutaan monopolaariseksi ja oikeanpuoleista bipolaariseksi. Usein ensin rakennetaan yhteys monopolaariseksi ja se täydennetään myöhemmin bipolaariseksi rakentamalla toinen yhteys. Bipolaarinen yhteys onkin siten kuin kaksi monopolaariyhteyttä rinnakkain. Kuvan mukaisesti monopolaarisessa yhteydessä on yksi johdin ja virran paluutie voi olla joko maa, meri tai sitten erillinen metallijohdin. Vaikka yhdellä johtimella varustettu yhteys on taloudellisempi ja teknisesti helpompi rakentaa, suositaan nykyään erillistä paluukaapelia, sillä meren käyttö virran paluutienä voi aiheuttaa haittoja esimerkiksi kaloille tai veneille. Se voi aiheuttaa myös häiriöitä kompassien toiminnassa ja korroosiovaurioita elektrodiasemilla. [2], [11]



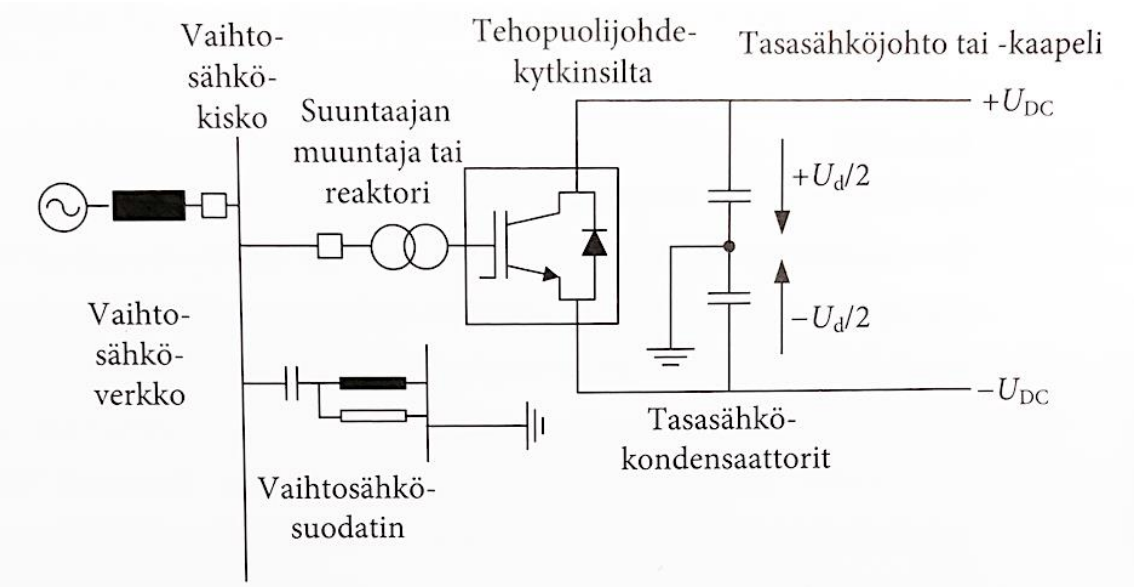
Kuva 5. *Monopolaarinen tasasähköyhteys vasemmalla ja bipolaarinen yhteys oikealla. Muokattu lähteestä.* [11]

Kaksi tasasähköjohtoa sisältävä bipolaarinen yhteys on suositumpi kuin monopolaarinen. Bipolaariselle yhteydelle tuo etua se, että sitä voidaan käyttää edelleen 50 %:lla teholla monopolaarisena, kun toisessa yhteydessä on vika tai siihen tehdään huoltotoimenpiteitä. Silloin maa toimii virran paluutienä. [11]

3.2 Jännitelähdesuuntaajalla varustettu tasasähköyhteys

Oleellinen ero verkkokommutoivan ja jännitelähdesuuntaajaa käyttävän tasasähköyhteyden välillä on se, että jännitelähdesuuntaaja ei tarvitse verkon jännitteitä kommutointiin. Siksi siitä käytetäänkin kirjallisuudessa nimitystä itsekommutoiva. Itsekommutoivan suuntaajan kommutointi tapahtuu paljon nopeammin kuin verkkokommutoivan suuntaajan. Myös jännitelähdesuuntaajaa hyödyntävässä yhteydessä käytetään puolijohdekomponenteista koottuja siltoja, mutta tyristorien sijaan ne ovat tyypillisesti IGB-transistoreja (insulated gate bibolar transistor). Transistorit voidaan kytkeä päälle tai pois eli sytyttää ja sammuttaa vaihtosähköverkon jännitteistä riippumatta ja siksi ne ovat itsekommutoivia. Vaihtosähköverkon vahvuus ei ole samalla tavalla oleellinen asia kuin verkkokommutoivan yhteyden toiminnassa, koska verkon jännitteet eivät vaikuta kommutointiin. [2]

Kuvassa 6 on jännitelähdesuuntaajaa hyödyntävän tasasähköyhteyden suuntaaja-aseman periaatteellinen rakenne. Jännitelähdesuuntaajaa hyödyntävässä yhteydessä jännitteen polariteetti ei muutu, mutta tehon suunta voidaan muuttaa kääntämällä virran suunta. Jotta virralle on kulkureitti molempiin suuntiin, jokaisen transistorin rinnalle on kytketty diodi, joka voi olla osa transistorin rakennetta tai sitten kokonaan erillinen laite.

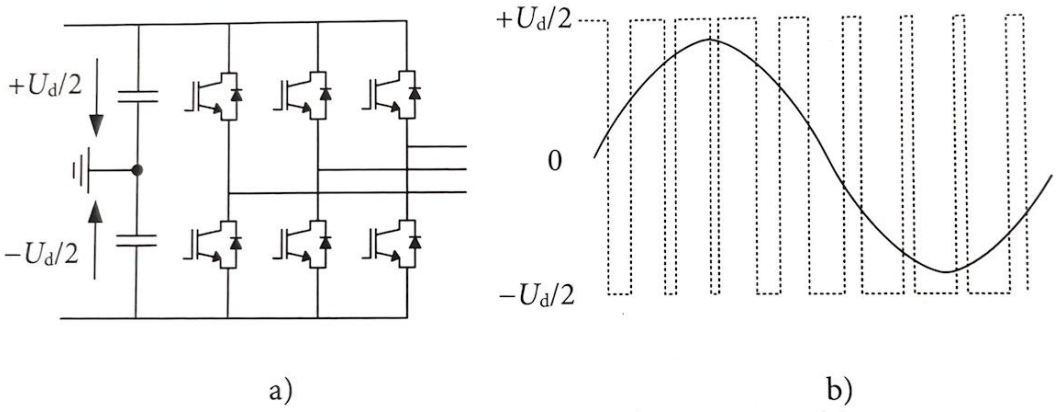


Kuva 6. *Jännitelähdesuuntaajaa käyttävän tasasähköyhteyden suuntaaja-aseman periaatteellinen rakenne.* [2]

Yhteyden toiminta perustuu siihen, että tasasuuntauspäässä oleva tehopuolijohdesilta varaa kondensaattorin tiettyyn tasajännitteeseen ja vaihtosuuntauspäässä samanlainen silta muodostaa kondensaattorin tasajännitteestä vaihtojännitteen. Yhteys vaatii aina vähintään kaksi jännitteistä johdinta tai kaapelia. Suuntaajien toiminta tuottaa yliaaltojännitteitä vaihtosähköverkkoon ja yliaaltovirtoja tasasähköpuolelle. Tasasähköpiirin kon-

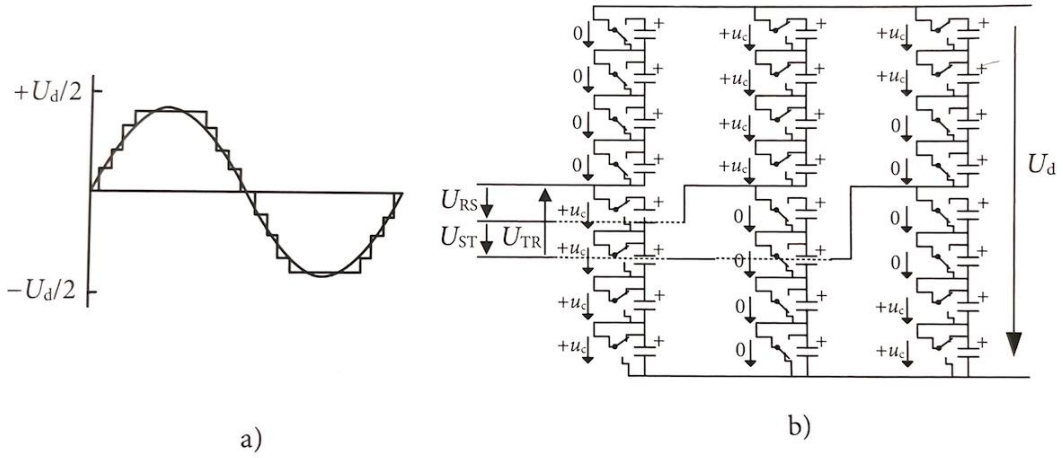
densaattori toimii näiden yliaaltovirtojen suodattimena ja vaihtosähkökiskon vaihtosähkösuodattimet suodattavat yliaaltojännitteitä. Yliaallot ovat kuitenkin vähäisempiä verrattuna verkkokommutoivan yhteyden toimintaan.

Vaihtojännite voidaan muodostaa eri tavoin kuten käyttämällä 2-tasoista pulssinleveysmodulointia tai modulaarista monitasosuuntaajaa, joka sekin käyttää pulssinleveysmodulointia. 2-tasoista pulssinleveysmodulointia käyttävän suuntaajan tarkempi rakenne on esitetty kuvan 7 a-kohdassa ja modulaarinen monitasosuuntaaja on kuvan 8 b-kohdassa, jonka rakenteessa on transistoreja ja kondensaattoreita. Siinä transistorit on esitetty yksinkertaisemmin kaksiasentoisina kytkiminä. Huomiona todettakoon, että kuvan 6 rakenteessa on käytetty juuri 2-tasoista pulssinleveysmodulointia käyttävää suuntaajaa, vaikka sillan rakenne on kuvattu vain yhdellä transistorisymbolilla. 2-tasoista pulssinleveysmodulointia käyttävän sillan tuottama vaihtojännite on esitetty kuvan 7 b-kohdassa. Todellinen vaihtojännite on katkoviivalla esitetyn mukainen ja yhtenäisellä viivalla on esitetty haluttu vaihejännitteen sinimuotoinen perusaalto. Pulssinleveysmoduloinnilla pyritään siihen, että tuotetun signaalin keskiarvo on sama kuin haluttu signaali eli tässä tapauksessa siniaalto. Vaihtojännitteen tuottaminen tällä tavalla vaatii suurta kytkentätaajuutta, joka aiheuttaa suuria häviöitä. [2]



***Kuva 7**. Kohdassa a) on IGB-transistoreista muodostettu silta, joka käyttää 2-tasoista pulssinleveysmodulointia. Kohdassa b) on katkoviivalla pulssinleveysmoduloinnilla tuotettu vaihtojännite sekä yhtenäisellä viivalla haluttu vaihejännite.* [2]

Modulaarisen monitasosuuntaajan tuottama yhden vaiheen vaihejännite on esitetty kuvan 8 a-kohdassa. Huomataan, että tuotettu portaittainen vaihtojännite on paljon lähempänä todellista siniaaltoa kuin aiemmin esitetyssä ja siten se sisältää myös vähemmän yliaaltoja. Kuvia 7 ja 8 vertailemalla havaitaan myös, että modulaarisen monitasosuuntaajan rakenne on paljon monimutkaisempi ja siten kalliimpi.



Kuva 8. *Kohdassa a) on monitasosuuntaajan tuottama kulmikas yhden vaiheen vaihtojännite ja kohdassa b) on monitasosuuntaajan rakenne.* [2]

Jännitelähdesuuntaajalla pätö- ja loistehoa voidaan säätää kumpaakin erikseen säätämällä itsekommutoivaa siltaa. Verkkokommutoivaa suuntaajaa käyttävässä yhteydessä näin ei voida tehdä, koska sillan toiminta perustuu ohjauskulman käyttöön ja sen säätäminen vaikuttaa aina sekä pätö-, että loistehoon. Jännitelähdesuuntaajassa pätötehon suuruus ja suunta riippuu siitä, millainen on sen suuntaajan tuottaman vaihtojännitteen kulmaero suhteessa vaihtosähköverkon jännitteen kulmaan. Suuntaaja toimii vaihtosuuntaajana syöttäen tehoa vaihtosähköverkkoon silloin, kun suuntaajan jännitteen kulma on vaihtosähköverkon kulmaan nähden edellä. Loistehon suunta taas riippuu suuntaajan jännitteen ja verkon jännitteen itseisarvojen erosta. Tehon suunnan muuttuessa myös virran suunta vaihtuu. [2]

Esiteltyjä tasasähköyhteyksiä voidaan käyttää samoihin tarkoituksiin, kuten erittäin pitkän matkan sähkön siirtoon, meren alitukseen tai kahden eri vaihtosähköverkon yhdistämiseen. Verkkokommutoivaa suuntaajaa hyödyntävää yhteyttä suositaan enemmän pitkän matkan siirrossa ja jännitelähdesuuntaajaa merenalaisissa kaapeliprojekteissa [12]. Jännitelähdesuuntaajalla varustetulla yhteydellä suurin mahdollinen teho on pienempi ja asemahäviöt ovat suuremmat, mutta samalla sen suuntaaja-asema vaatii vähemmän tilaa [2]. Verkkokommutoiva suuntaaja tuottaa enemmän yliaaltoja ja siksi erilaiset yliaaltosuodattimet vievät huomattavasti tilaa asemalta [9].

Tyristoreita hyödyntävä verkkokommutoiva yhteys on paljon vanhempi ratkaisu tasasähkövoimansiirrossa, sillä tyristorit kehitettiin 1960-luvulla. IGB-transistorit taas on kehitetty muutama vuosikymmen myöhemmin 1980-luvulla. Ennen tyristorin ja IGB-transistorin kehittämistä suuntaajissa on käytetty elohopeaventtiilejä (mercury-arc valve). Johdannossa mainittu ensimmäinen kaupallinen Ruotsin mantereen ja Gotlannin välille rakennettu tasasähköyhteys vuonna 1954 perustui niiden käyttöön. Myös tyristoreita hyödyn-

nettiin ensimmäisen kerran tässä samassa yhteydessä, kun niitä kytkettiin elohopeaventtiilien kanssa sarjaan vuonna 1970. Ensimmäinen kaupalliseen käyttöön tarkoitettu jännitelähdesuuntaajaa hyödyntävä yhteys on rakennettu vuonna 1997, joka sekin rakennettiin Gotlannin ja Ruotsin mantereen välille. Tämän jälkeen tekniikka on kehittynyt paljon ja jännitelähdesuuntaajaan perustuvat yhteydet ovat korvanneet verkkokommutoivaa suuntaajaa käyttäviä yhteyksiä erityisesti merikaapeleissa ja siirtoyhteyksissä, joiden teho on alle 2000 MW. [2], [12]

4. HVAC- JA HVDC-SIIRTOYHTEYKSIEN VERTAILU

Sopivimman siirtoyhteyden valitseminen ei ole yksinkertaista, vaan vaatii hyvin monen eri tekijän ja näkökulman huomioimista. Erilaisten teknisten vaihtoehtojen ominaisuuksia on vertailtava keskenään samalla huomioiden, miten ne vaikuttavat muun verkon toimintaan ja ympäristöön. Sähköenergiajärjestelmä ja sen perustana toimiva siirtoverkko on äärimmäisen merkittävä infrastruktuuri modernin yhteiskunnan toiminnan kannalta, joten teknisten valintojen tekemisessä tärkeimpänä lähtökohtana ovat järjestelmän käyttövarmuus ja suorituskyky. Päätöksiä ohjaa merkittävästi myös taloudelliset tekijät, kuten se mitä järjestelmän rakentaminen kokonaisuudessaan kustantaa ja paljonko ovat tehohäviöistä koituvat kustannukset järjestelmän käytön aikana. Tässä kappaleessa keskitytään edellä esitettyjä näkökulmia tarkastelemalla siihen, millaisia hyötyjä tasasähköyhteyden käytöllä voidaan saavuttaa ja missä tapauksissa sen toteuttaminen on järkevintä tai tulee ainoaksi vaihtoehdoksi.

4.1 Tasasähkön hyödyt ja käyttökohteet

4.1.1 Merikaapelit

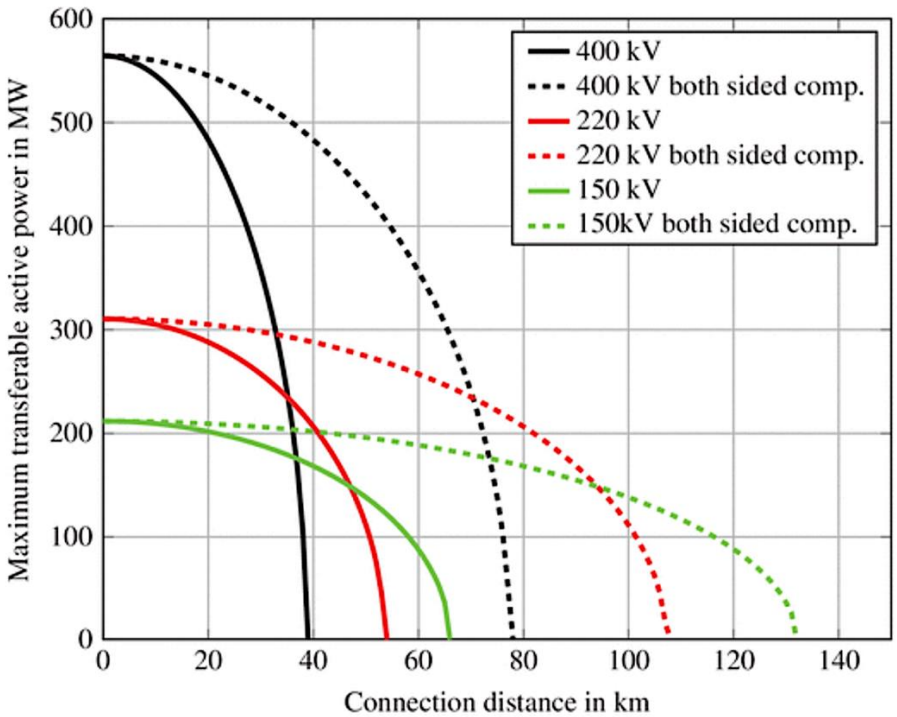
Pitkät merikaapeliyhteydet ovat yleisiä tasasähkön sovelluskohteita, sillä vaihtosähköllä niitä ei käytännöllisesti katsoen voida tehdä. Vaihtosähkökaapeleilla esiintyy merkittävästi kapasitiivista varausvirtaa, joka rajoittaa siirrettävän pätötehon eli todellisen kuorman hyödyntävän tehon suuruutta [13]. Varausvirta voidaan laskea seuraavasti

$$I_c = U_o \omega C l \,, \tag{1}$$

missä U_o on vaihejännite, ω on kulmataajuus, C on kaapelin kapasitanssi pituusyksikköä kohden ja l on kaapelin pituus. Kapasitanssi on tyypillisesti arvoltaan 160–600 nF/km ja se riippuu kaapelin eristysmateriaaleista ja paksuudesta sekä johtimien poikkipintaalasta. Kapasitanssi kasvaa siirtoetäisyyden myötä ja kaapelin ollessa tarpeeksi pitkä, koko siirtokapasiteetti joudutaan käyttämään varausvirran kuljettamiseen. Varausvirtaa syntyy myös ilmajohdoilla, mutta niiden kapasitanssi on noin 20-kertaa pienempi, joten siirtokapasiteetti ei pienene niin nopeasti kuin kaapelilla. [11] Tasasähköllä kulmataajuus on nolla ja siten varausvarausvirta ei ole ongelma ja se ei rajoita siirtoetäisyyttä.

400 kV jännitetasolla noin 70–80 km etäisyydellä kaapelin varausvirta on tyypillisesti jo niin suuri, että koko siirtokapasiteetti menee sen kuljettamiseen. Kaavasta 1 huomataan,

että varausvirta vähenee jännitteen laskiessa, joten pienemmillä jännitteillä voidaan toteuttaa pidempiä yhteyksiä. Suurempijännitteisellä kaapelilla on myös isompi kapasitanssi kuin pienempijännitteisellä. Jotta vaihtosähkökaapelin siirtokyky voidaan säilyttää pitkillä etäisyyksillä, täytyy kapasitiivista varausvirtaa kompensoida määrävälein, joten väliasemia tarvitaan yhteyden varrelle. [2] Mitä suurempi jännitetaso, sitä aikaisemmin kompensointia tarvitaan. Esimerkiksi 400 kV jännitteellä kompensointi on tarpeen noin 24 km ja 220 kV:lla 40 km pituudesta alkaen [14]. 400 kV:lla asemia pitää sijoittaa tyypillisesti noin 20–40 km välein. Kompensointia voidaan tehdä esimerkiksi kuristimella (reactor) tai staattisella loistehon kompensaattorilla (SVC). [11] Mereen ei voida tällaisia laitteistoja asentaa eli kompensointia on mahdollista tehdä vain yhteyden päissä mantereella. Merikaapelit ovat yleensä pitkiä ja silloin tasasähkön käyttämisestä tulee ainoa vaihtoehto. [2] Kuvassa 9 on esitetty erään vaihtosähkökaapelin pätötehon siirtokapasiteetti etäisyyden kasvaessa kolmella tyypillisellä jännitetasolla. Havaitaan, että pienemmällä jännitteellä siirtoetäisyyttä voidaan kasvattaa, mutta suurin mahdollinen pätötehon siirtokapasiteetti on jo lähtökohtaisesti pienempi. Katkoviivoilla on esitetty kompensoinnin siirtoetäisyyttä kasvattava vaikutus, kun kompensointiasemat on sijoitettu yhteyden molempiin päihin. Etäisyydet jäävät silti pienemmiksi kuin 140 kilometriä. Siirtoetäisyys kasvaisi kuvan 9 tilanteeseen verrattuna, jos kompensointia voitaisiin tehdä muuallakin kuin yhteyden päissä.



Kuva 9. *Poikkipinnaltaan 1000 mm^2 olevan XLPE-eristeisen vaihtosähkökaapelin pätötehon siirtokapasiteetti etäisyyden funktiona kolmella eri jännitetasolla.* [11]

Merkittävästi pienemmän kapasitanssin takia vaihtosähköilmajohdoilla pystytään toteuttamaan paljon pidempiä yhteyksiä ennen kuin varausvirrasta tulee ongelma ja kompensoinnin avulla pituutta voidaan entisestään kasvattaa. Kapasitanssien suuruuseroista voidaan tehdä johtopäätös, että ilmajohdon tapauksessa puhutaan useista sadoista kilometreistä. Näin suuret etäisyydet eivät todellisuudessa pidä paikkaansa, sillä seuraavassa alaluvussa 4.1.2 esitettävät stabiiliusongelmat rajoittavat siirtokykyä pitkillä etäisyyksillä.

Ympäri maailmaa löytyy lukuisia merikaapeliyhteyksiä ja kuvassa 10 on esimerkkinä Euroopan tasasähköyhteydet, joista suurin osa on merikaapeleita.

Kuva 10. *Euroopan tasasähköyhteydet. Punaiset ovat jo toteutettuja yhteyksiä ja vihreät ovat rakenteilla.* [15]

Maailman pisin merikaapeliyhteys tällä hetkellä on Iso-Britannian ja Tanskan välinen Viking Link. Pituudeltaan se on 765 kilometriä ja sillä voidaan siirtää 1.4 GW tehoa. [16] Suomesta kulkee yhteensä 4 HVDC-merikaapelia Ruotsiin ja Viroon. Fenno-Skan 1 ja 2 yhteydet kulkevat Ruotsiin ja Estlink 1 ja 2 yhteydet Viroon. Ruotsin yhteyksien teho on 1200 MW ja Viron yhteyksien 1000 MW. [17] Kuvassa 10 Fennos-Skan yhteydet eivät erotu toisistaan, sillä ne kulkevat hyvin lähekkäin. Kuvassa 1 ne ovat eroteltu selkeästi. Suomen ja Ahvenanmaan välillä kulkee myös merikaapeli nimeltä Ål-Link, jonka teho on 100 MW.

4.1.2 Pitkät siirtoyhteydet

Varausvirran lisäksi vaihtosähköllä esiintyy stabiiliusongelmia, jotka etenkin pitkillä etäisyyksillä rajoittavat siirrettävän pätötehon suuruutta. Tämä on merkittävä asia myös ilmajohtojen tapauksessa. Sähköenergiajärjestelmien stabiilius ei ole niin yksiselitteinen ja suppea aihe kuin se tässä osiossa tuodaan esille vaan pikemminkin erittäin laaja kokonaisuus. Stabiilius voidaan jakaa kulma-, taajuus- ja jännitestabiiliuuteen. Edelliset voidaan jakaa vielä alaluokkiin riippuen järjestelmässä tapahtuvan ja stabiiliutta horjuttavan häiriön luonteesta. [18] Esimerkiksi kulmastabiilius voidaan jakaa vakaan tilan stabiiliuteen (steady state stability), joka liittyy järjestelmän vakauteen sen normaalissa toimintatilassa ja hitaissa kuormitusten muutoksissa sekä isompiin häiriöihin ja vikoihin liittyvään stabiiliuuteen (transient state stability). [14] Tässä osiossa keskitytään stabiiliuteen vain siitä näkökulmasta, miten se rajoittaa vaihtosähköjohtojen siirtokapasiteettia. Vaihtosähköjohdon yksinkertaistettu tehonsiirtoyhtälö on seuraava

$$P = \frac{U_1 U_2}{X} \sin(\delta_{12}), \tag{2}$$

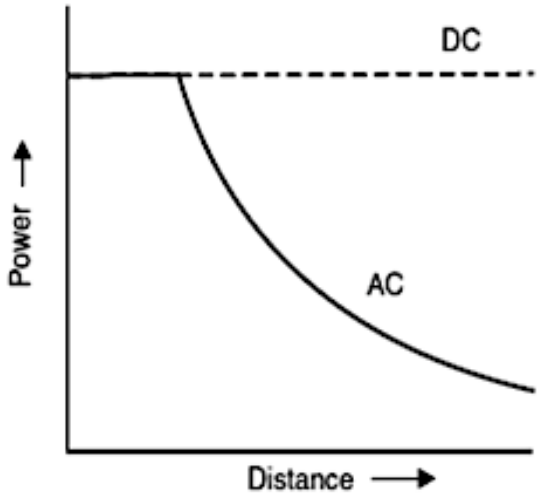
missä U_1 ja U_2 ovat yhteyden päiden pääjännitteiden itseisarvot, X on johdon reaktanssi ja δ_{12} on jännitteiden U_1 ja U_2 välinen vaihekulma [11]. Huomionarvoista on, että tämä kaava on täysin teoreettinen. Siinä on oletettu, että johdolla ei ole resistanssia eikä kapasitanssia ja siten reaktanssi X on oletettu puhtaasti induktiiviseksi. Tällainen tilanne ei ole koskaan mahdollinen, sillä johdolla on induktanssin lisäksi aina sekä resistanssia että kapasitanssia. [14] Tätä yksinkertaistettua mallia käytetään kuitenkin usein stabiilliusongelmia havainnollistettaessa. Edellinen kaava kuvaa kulmastabiiliutta ja juuri vakaassa tilassa, eikä siten huomioi mitään muuta yllä mainittua stabiiliuden osa-aluetta. Kulmastabiiliudella tarkoitetaan verkon tahtigeneraattoreiden kykyä pysyä tahtikäynnissä [2].

Kaavan 2 mukaisesti johdolla ei siirry tehoa, jos vaihekulma on nolla ja maksimoituu sen ollessa 90 astetta. Tällöin sin-termin edessä oleva kerroin on teoreettinen maksimiteho, joka johdolla voidaan siirtää ilman stabiiliusongelmia ja se pienenee etäisyyden kasvaessa, kun johdon reaktanssi kasvaa. Tämä maksimiteho on vakaan tilan pysymisen stabiililiusraja (steady state stability limit) ja käytännössä lähellekkään tälläistä tehoa ei pystytä siirtämään, koska mainittu nopeisiin häiriöihin liittyvä stabiiliusraja (transient state stability limit) tulee vastaan jo pienemmillä siirtotehoilla. Käytännössä vaihekulma voi olla korkeintaan noin 30–40 astetta. Tämä tarkoittaa, että todellisuudessa siirtokapasiteetti on kaukana teoreettisesta maksimista. Kulmatabiiliusongelmia saattaa esiintyä, jos siirtoyhteyttä kuormitetaan sille määriteltyä maksimitehoa enemmän, eli esimerkiksi verkon kuormitustilanne muuttuu äkillisesti liian suureksi. Kaavan 2 mukaisesti tehon kasvami-

nen näkyy yhteyden päiden välisen vaihekulman suurenemisena. Jos vaihekulma kasvaa yli sallitun rajan, järjestelmä toimii kriittisellä alueella ja silloin tapahtuvan vian tai häiriön seurauksena verkko saattaa romahtaa. Tällaisessa tapauksessa synkroninen toiminta menetetään, joka johtaa koko järjestelmän epävakauteen. Epäsynkroninen toiminta tarkoittaa, että verkon tahtigeneraattorit eivät pysy enää tahdissa. [14]

Stabiiliuden määräämää pätötehon siirtokapasiteettia voidaan kasvattaa sellaisilla keinoilla, jotka pienentävät siirtojohdon reaktanssia. Silloin kaavan 2 mukainen maksimiteho kasvaa ja tehokas siirtoetäisyys suurenee. Reaktanssia voidaan pienentää esimerkiksi sarjakompensoinnilla, jolloin johdon kanssa sarjaan lisätään kondensaattori tai rakentamalla rinnakkaisia johtoja alkuperäisten johtojen rinnalle. [2] Kaavasta 2 nähdään myös, että jännitteen nostaminen parantaa siirtokykyä.

Stabiiliusongelmat rajoittavat vaihtosähköjohdolla siirrettävän tehon suuruutta erityisesti pitkillä etäisyyksillä, sillä lyhyemmillä etäisyyksillä johtojen terminen kapasiteetti on määräävämpi tekijä. Tasasähköyhteyksillä teho siirtyy tasavirralla ja -jännitteellä, joten vaihekulman käsitettä ei ole. Näin ollen tasasähköyhteyksillä ei ole stabiiliuden määräämiä rajoituksia siirrettävän maksimitehon suuruudessa eikä siirrettävä maksimiteho pienene johtopituuden kasvaessa, joten hyvän siirtokapasiteetin omaavien pitkien yhteyksien toteuttaminen on mahdollista. Tasasähköllä tehorajoitukset tulevat käytettävien komponenttien termisistä kestoisuuksista ja eristysmitoituksesta eli valitusta jännitetasosta. [2] Siten tasasähköyhteydellä voidaan siirtää tehoa niin paljon kuin siinä käytetyt komponentit kestävät, eikä siirtokapasiteetin kasvattamiseksi tarvita lisäksi mitään erillisiä toimenpiteitä, toisin kuin vaihtosähköyhteydessä, jossa tarvitaan yllä kuvattuja ratkaisuja. Kuvassa 11 on havainnollistettu tasa- ja vaihtosähköyhteyksien siirtokapasiteetteja etäisyyden kasvaessa. Siinä voidaan ajatella, että molempien yhteyksien termiset kapasiteetit ovat samat, mutta kun etäisyys kasvaa, stabiilius alkaa rajoittamaan vaihtosähköjohdon siirtokapasiteettia ja tasasähköjohdolla se pysyy muuttumattomana riippumatta siirtoetäisyydestä. Tyypillisesti 400 kV jännitetasolla stabiilius alkaa rajoittamaan vaihtosähköjohdon siirtokapasiteettia noin 150 kilometrin jälkeen [19]. Tämä olisi kuvassa 11 etäisyys, jossa AC ja DC käyrät erkanevat toisistaan.



Kuva 11. *Havainnekuva tasa- ja vaihtosähköyhteyksien siirtokapasiteetista etäisyyden funktiona* [18].

Maailman pisin siirtoyhteys on Kiinassa vuonna 2018 valmistunut 3293 kilometrin pituinen yhteys ja se on luonnollisesti toteutettu tasasähköllä. Jännitetaso on 1100 kV ja sen avulla pystytään siirtämään 12 GW tehoa, joka on kaikkein isoin yksittäisen yhteyden siirtokapasiteetti maailmassa. [20]

4.1.3 Eri vaihtosähköverkkojen yhdistäminen

Kahta eri vaihtosähköverkkoa ei voida yhdistää vaihtosähköyhteyksillä, jos niiden nimellistaajuudet eroavat toisistaan. Esimerkiksi 50 ja 60 Hz taajuuksilla toimivat verkot on teknisesti mahdotonta yhdistää toisiinsa pelkillä vaihtosähköyhteyksillä. Tällöin tasasähköyhteyden käyttäminen verkkojen välisenä siirtoyhteytenä on ainoa vaihtoehto. Tasasähköyhteydessä teho siirtyy verkkojen välillä tasavirralla ja -jännitteellä, joten taajuuden ja vaihekulman käsitteitä ei ole ja niistä ei tarvitse huolehtia. Ero suuntaajien vaihtosähköpuolen nimellistaajuuksissa ei aiheuta ongelmia tehon siirtymiselle verkosta toiseen. Tällaisessa tapauksessa tasasähköyhteys voidaan toteuttaa esimerkiksi back-to-back -yhteytenä, jossa suuntaajat sijaitsevat samalla asemalla ja erillistä siirtoyhteyttä ei rakenneta. Eri verkot yhdistävästä tasasähköyhteydestä käytetään myös usein nimitystä tasasähkö-linkki (DC-link). [2]

Samalla nimellistaajuudella toimivat verkot voidaan yhdistää toisiinsa vaihtosähköyhteyksin, mutta tällaisessa tapauksessa verkot täytyy synkronoida. Kuten luvussa 2 todettiin, siirtoverkot ovat rakenteeltaan silmukoituja ja useat generaattorit syöttävät verkkoa eri pisteistä. Synkroninen toiminta tarkoittaa, että kaikkien verkon generaattorien tuottaman jännitteen taajuus ja vaihekulma sekä vaihejärjestys täsmäävät muun verkon kanssa. Synkroninen toiminta on edellytys verkon vakaalle toiminnalle. [21] Eri verkot

on kuitenkin järkevä synkronoida ja yhdistää vain, jos niiden käyttötavat ja käyttövarmuus ovat suunnilleen samat. Jos nämä ehdot eivät täyty, verkkoja ei kannata yhdistää, sillä muodostetun yhteiskäyttöverkon käyttövarmuus olisi periaatteessa yhtä kuin heikomman verkon käyttövarmuus, sillä vikojen vaikutukset leviävät verkosta toiseen erittäin nopeasti. Tällöin käyttövarmuudeltaan parempi verkko kärsisi toisen yhdistettävän verkon heikommasta käyttövarmuudesta. Toki verkkoja yhdistävät yhdysjohdot voidaan aina vikojen sattuessa laukaista irti sähköasemilla. Käyttövarmuuden takaaminen on erityisen tärkeä osa siirtoverkkojen suunnittelua ja edellä kuvaillun tilanteen kaltaisissa tapauksissa ainoaksi järkeväksi vaihtoehdoksi tulee tasasähköyhteyden käyttäminen. Etua tasasähköyhteyden käyttämiselle tuo se, että verkkoja ei tarvitse synkronoida keskenään eivätkä erot niiden käyttövarmuuksissa ja käyttötavoissa vaikuta heikentävästi toisiinsa.

Samantaajuisia verkkoja ei aina voida yhdistää vaihtosähköjohdolla, vaikka ne toimisivatkin synkronisesti ja niiden käyttövarmuus sekä käyttötapa olisivat samaa luokkaa. Tällainen tapaus on, jos verkoissa on erilainen taajuudensäätö, ne ovat isoja tai hyvin erikokoisia keskenään. Verkkojen kuormitusten satunnainen vaihtelu saattaisi kuormittaa vaihtosähköyhdysjohtoa liikaa, joten tasasähköjohdon rakentaminen tällaisessa tapauksessa on järkevämpää. Kuten aiemmin luvussa 3 mainittiin, tasasähköyhteyden tehoa voidaan säätää ja hallita, mutta vaihtosähköverkossa teho kullakin johdolla, eli myös yhdysjohdolla, määräytyy itsestään verkon kuormitustilanteen mukaan. [2]

4.1.4 Tasasähköyhteydet vaihtosähköverkon toiminnan parantajina

Merenalaisten kaapelien, erittäin pitkien yhteyksien ja erilaisten vaihtosähköverkkojen yhdistämisen mahdollistaminen ovat oleellisimmat tasasähköyhteyksillä saavutettavat hyödyt. Nämä tyypilliset käyttökohteet nousevat eniten esille myös aihetta käsittelevässä kirjallisuudessa. Näiden lisäksi tasasähköyhteyksien olemassaolo kahden eri vaihtosähköverkon välillä tai saman verkon sisällä muiden vaihtosähköyhteyksien rinnalla voi parantaa muun verkon toimintaa ja käyttövarmuutta hyvin monella eri tavalla. Hyöty perustuu pääasiassa siihen, että tasasähköyhteyden tehon suuruutta ja suuntaa voidaan säätää ja se voidaan tehdä erittäin nopeasti, kuten luvussa 3 todettiin. Toisaalta tasasähköyhteyksien tuomat hyödyt voivat olla toisiaan poissulkevia eli niitä ei voida välttämättä hyödyntää samanaikaisesti. Seuraavaksi tarkastellaan muutamia hyötyjä ja Euroopan kantaverkkoyhtiöiden yhteistyöjärjestö ENTSO-E on esimerkiksi koonnut kattavan raportin [22] aiheesta.

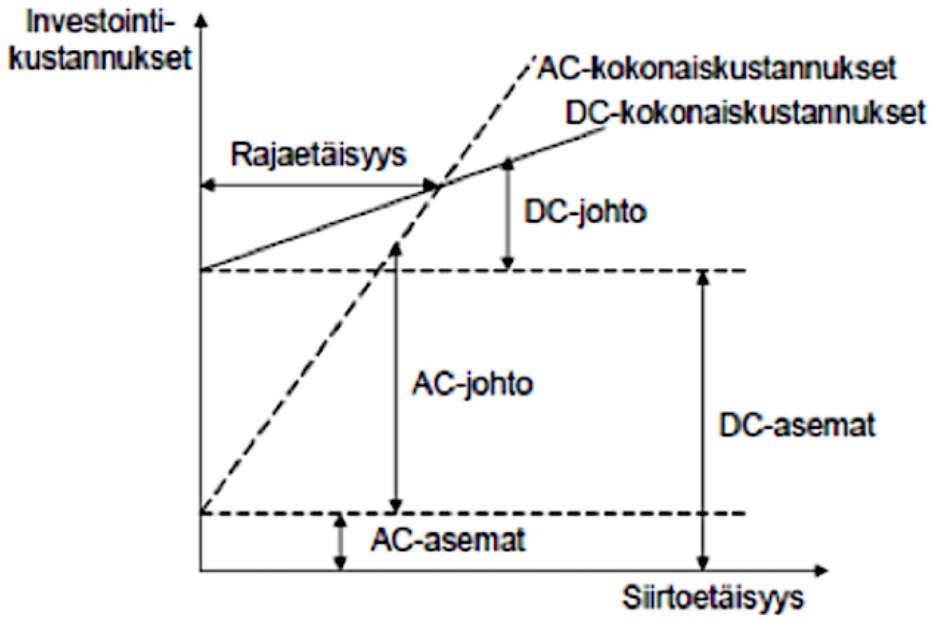
Kun yhteys toimii kahden eri synkroniverkon välillä ja toisessa verkossa on tuotannon ja kulutuksen välillä epätasapainoa, voi tasasähköyhteys parantaa tilannetta säädetysti lainaamalla toisen verkon valmiudessa olevaa tehoreserviä. Samanlainen säätö ei ole mahdollista, jos yhteys on saman verkon sisällä. [23] Vaikka epätasapainosta kärsivällä verkolla olisi tehoreserviä jäljellä, pystyy tasasähköyhteys reagoimaan ja säätämään tehoa nopeammin. Tätä ominaisuutta voidaan käyttää kuitenkin vain, jos tasasähköyhteys ei häiriön sattuessa toimi jo valmiiksi täydellä teholla. [2] Sähköenergiajärjestelmässä tuotannon ja kulutuksen on oltava tasapainossa joka hetki. Epätasapaino johtaa verkon taajuuden heilahteluihin ja siten tasasähköyhteys parantaa taajuusstabiiliuutta. [23]

Tasasähköyhteys pystyy vaikuttamaan verkon jännitestabiiliuuteen. Loistehon määrä on merkittävä tekijä verkon jännitetasojen ylläpitämisen kannalta. Erityisesti jännitelähdesuuntajaa käyttävällä tasasähköyhteydellä pätö- ja loistehoa voidaan säätää toisistaan riippumatta. Yhteys pystyy tarvittaessa säätämään loistehon tasoa nopeasti, jos verkon generaattorit eivät pysty syöttämään tarpeeksi loistehoa tai verkon muut komponentit, kuten kaapelit tuottavat sitä liikaa. [22]

Suurten verkkojen välillä voi häiriöiden yhteydessä esiintyä sähkömekaanisia heilahteluja, kun ne on yhdistetty vaihtosähköjohdoilla toisiinsa [22]. Sähkömekaaniset heilahtelut tarkoittavat, että eri verkkojen generaattorit heilahtelevat toisiaan vasten tietyllä taajuudella. Tämä johtaa myös siihen, että verkkoja yhdistävien vaihtosähköjohtojen teho heilahtelee. Heilahtelu rajoittaa näiden johtojen siirtokapasiteetin suuruutta, koska aiemmin esitetyt stabiiliusrajat tulevat vastaan. Tasasähköyhteyttä voidaan käyttää vaihtosähköyhteyksien rinnalla, jotta heilahtelut vaimenevat paremmin. [2] Vaimennus tapahtuu moduloimalla tasasähköyhteyden pätö- tai loistehoa sopivasti oikealla taajuudella [22]. Tätä ominaisuutta hyödynnetään esimerkiksi Suomen ja Ruotsin verkkojen välillä, missä Fenno-Skan yhteyksien tehoa ohjaamalla pystytään vaimentamaan pohjoisten vaihtosähköyhteyksien tehon heilahteluja (kuva 1). [2]

4.2 Taloudelliset näkökulmat

Investointi- ja häviökustannukset ovat tärkeässä roolissa eri siirtojärjestelmien kustannusvertailussa ja lopulta järkevimmän järjestelmän valinnassa. Kuvassa 12 on havainnollistettu tasa- ja vaihtosähköyhteyksien investointikustannuksia siirtoetäisyyden kasvaessa. Tasasähköasemien kustannukset ovat huomattavasti suuremmat verrattuna vastaaviin vaihtosähköasemiin. Johtojen kustannukset kasvavat luonnollisesti siirtoetäisyyden kasvaessa ja vaihtosähköjohdoilla kasvu on jyrkempää. Tästä syystä tietyn rajaetäisyyden jälkeen tasasähköyhteyden rakentaminen tulee kokonaiskustannuksiltaan edullisemmaksi.



Kuva 12. *Tasa- ja vaihtosähköyhteyksien investointikustannukset siirtoetäisyyden kasvaessa.* [24]

Rajaetäisyys ei ole vakio vaan riippuu monesta eri tekijästä. Ensinnäkin siihen vaikuttaa tasasähköyhteyden tyyppi eli se, rakennetaanko suuntaaja-asemat virta- vai jännitelähdesuuntaajaa käyttävällä tekniikalla ja onko yhteys mono- vai bipolaarinen. Oleellinen vaikutus on myös käytetyllä johtolajilla eli käytetäänkö avojohtoa vai kaapelia. Jälkimmäisen käyttö on huomattavasti kalliimpaa. Haluttu tehotaso vaikuttaa suoraan sähköasemien komponenttien ja johtojen mitoitukseen ja siten hintaan. Arviona rajaetäisyyden suuruusluokasta voidaan pitää noin 600–800 kilometrin matkaa, kun siirtoyhteys on toteutettu ilmajohdoilla. [2] Kaapelien tapauksessa puhutaan noin 40–70 kilometrin etäisyyksistä [25].

Luvussa 3 esitetyt tasasähköyhteyksissä käytettävät suuntaaja-asemat ovat kummatkin kalliimpia kuin vastaavat vaihtosähköasemat, koska niissä tarvittavien suuntaajamuuntajien ja suuntaajien tehoelektroniikkalaitteiden hinnat ovat huomattavasti vaihtosähköaseman komponentteja suurempia [2]. Ylipäätään tasasähköasemalla on paljon enemmän komponentteja kuin vaihtosähköasemalla ja suuntaajat tyypillisesti sijaitsevat erillisten rakennusten sisällä. Kun vertaillaan tasasähköyhteyksien asemia keskenään, jännitelähdesuuntaajaa käyttävän yhteyden suuntaajat ovat tyypillisesti kalliimpia kuin verkkokommutoivan. Yksi merkittävä syy liittyy käytettäviin puolijohdekomponentteihin. Verkkokommutoivassa yhteydessä käytettävien tyristorien virta- ja jännitekestoisuudet ovat paremmalla tasolla kuin jännitelähdesuuntaajassa käytettyjen IGB-transistorien. Näin ollen IGB-transistoreja tarvitaan enemmän, kun vertaillaan yhteyksiä, joilla on sama jännitetaso. [12] Suuntaajan hinta voi olla jopa yli 50 % koko tasasähköyhteyden hinnasta.

Koska hinta on näin merkittävän suuri osuus kokonaiskustannuksista, on se avainasemassa, kun vertaillaan tasa- ja vaihtosähköyhteyksien investointikustannuksia keskenään. [1]

Vaihtosähköjohtojen kustannukset kasvavat nopeammin kuin tasasähköjohtojen, koska vaihtosähköjohdolla tarvitaan jokaiselle kolmelle vaiheelle vähintään yksi johdin, kun taas tasasähköyhteydellä joko yksi tai kaksi riippuen yhteyden tyypistä [2]. Vaihtosähköllä esiintyy myös tunkeutumisilmiö (skin-effect) eli virran taipumus kulkea johtimen pinnalla. Tämä lisää johtimen resistanssia ja pakottaa käyttämään enemmän johdinmateriaalia. Todellisuudessa johtimet eivät ole paksumpia, sillä tunkeutumisilmiö kasvaa johtimen säteen kasvaessa. Tämän sijaan siirtojohdoilla käytetään nippujohtimia (bundled conductors), jossa jokaisen vaiheen johdin koostuu kahdesta tai usemmasta toisiinsa siteillä yhdistetystä osajohtimesta. Siirtoverkon jännitetasolla reaktanssi on paljon resistanssia suurempi ja johtimien niputtaminen pienentää myös johtimien reaktanssia. [14] Näiden perusteella vaihtosähkösiirtojohto vaatii huomattavasti enemmän johdinmateriaalia ja siten lisää kustannuksia. Hintaa kasvattaa myös se, että vaihtosähköavojohdolla pylväät ovat kookkaampia ja rakenteeltaan vahvempia johtimien määrän ja eristysvaatimusten vuoksi. Tästä syystä myös johtokadun eli johdon lähistöllä olevan esteettömän alueen on oltava leveämpi, joten asennus- ja maanrakennustyöt ovat vaihtosähköjohdolla suuremmat. [1], [2]

Siirtoyhteyksien häviöt voidaan jakaa asema- ja siirtohäviöihin. Yleisesti voidaan todeta, että tasasähköaseman häviöt ovat paljon suuremmat verrattuna vastaavan vaihtosähköaseman häviöihin. Sähkön muuttaminen vaihtosähköstä tasasähköksi ja päinvastoin aiheuttaa suuntaajien puolijohdekytkimisissä huomattavia kytkentä- ja sammutushäviöitä. Kun vertaillaan käsiteltyjä suuntaajatekniikoita keskenään, jännitelähdesuuntaajan häviöt ovat suuremmat kuin verkkokommutoivaa suuntaajaa käytettäessä. Jännitelähdesuuntaajassa kytkentätaajuus on huomattavasti isompi ja se kasvattaa kytkentähäviöitä. Vaihtosähköllä taas siirtohäviöt ovat suuremmat. Johtimien suurempi määrä lisää resistiivisiä häviöitä ja yhden johtimen resistanssi on suurempi johtuen edellä mainitusta tunkeutumisilmiöstä. Vaihtosähköllä on myös loistehohäviöitä ja dielektriset häviöt ovat suuremmat. [2]

Koska tasasähköaseman häviöt ovat suuremmat mutta tasasähköjohdon siirtohäviöt ovat pienemmät, tulevat tasasähköyhteyden kokonaishäviöt jollain siirtoetäisyydellä pienemmiksi vaihtosähköyhteyteen verrattuna. Häviöitä voisi havainnollistaa samalla tavalla kuin kuvassa 12 investointikustannuksia. Investointikustannusten ja häviöiden suuruuden perusteella tasasähköyhteyden rakentaminen on taloudellisesta näkökulmasta järkevin vaihtoehto, kun puhutaan erittäin pitkistä siirtoetäisyyksistä.

5. TASASÄHKÖN KÄYTÖN TULEVAISUUDEN NÄKYMÄT SÄHKÖN SIIRROSSA

Tulevaisuuden näkymien tarkastelu sisältää paljon epävarmuuksia. Näkökulmat vaihtelevat riippuen siitä, keneltä asiaa kysytään. Luotettavimmat näkemykset ajankohtaisesta kehityksestä saadaan sellaisilta yrityksiltä, järjestöiltä ja asiantuntijoilta, jotka työskentelevät sähkönsiirtotekniikan parissa. Toisaalta komponentteja valmistavat ja asiantuntijapalveluita tarjoavat yritykset voivat olla vastauksissaan puolueellisia, pyrkien ajamaan omaa etuaan. Yhteneviä näkemyksiä kuitenkin löytyy tasasähkön tärkeästä roolista osana tulevaisuuden siirtoverkkoa.

On selvää, että tulevaisuudessa maailman energiantarve kasvaa sähköistymisen, digitalisaation ja väestön kasvun myötä ja samalla kasvaa myös vaatimukset luotettavalle energiansaannille. ABB:n mukaan tämä saavutetaan paremmin säädettävissä olevilla ja älykkäämmillä energiajärjestelmillä, joissa tasasähköllä on iso rooli. Tällaisten energiajärjestelmien toteutus perustuu entistä enemmän tasa- ja vaihtosähköyhteyksien yhdistämiseen, hyödyntäen molempien parhaat puolet. Tasasähköyhteydet tulevat toimimaan vaihtosähköverkkojen sisällä vahvistaen kokonaisuuden toimintaa nopeutensa, säädettävyytensä ja pienten häviöidensä ansiosta. [23]

Entso-E:n mukaan uudet HVDC-yhteydet ovat jo olemassa olevien lisäksi tärkeässä roolissa Euroopan tulevaisuuden siirtoverkoston kehittämissuunnitelmissa ja yhtenäisten sähkömarkkinoiden toteutumisessa. Tasasähköyhteyksien muun siirtoverkoston toimintaa parantavat vaikutukset ovat välttämättömiä sen tehokkaan ja turvallisen toiminnan kannalta. Ilmastonmuutoksen ja vihreän siirtymän myötä uusiutuvien energiateknologioiden osuus kasvaa ja se tuo jo nyt ja jatkossa uusia haasteita siirtoverkon toiminnalle. Esimerkiksi tuuli- ja aurinkovoima kytketään tehoelektroniikan avulla verkkoon. Tämä muuttaa verkon rakenteellisia ja dynaamisia ominaisuuksia, kun samalla perinteisten verkkoon kytkettyjen voimalaitosten pyörivien generaattorien osuus ja niiden tuottama inertia vähenee. Tasasähköyhteydet ja niiden verkon toimintaa parantavat ominaisuudet auttavat selvittämään näitä tulevaisuuden haasteita. [22]

HVDC-teknologiaa hyödynnetään laajasti ympäri maailmaa sekä maalla, että merellä. Teknologia kehittyy jatkuvasti ja tällä hetkellä suurimmat haasteet liittyvät tasavirtakatkaisijoihin, joiden kehittäminen varsinkin suurille tehoille on osoittautunut hankalaksi. Haasteet liittyvät siihen, että tasavirralla ei ole luonnollista nollakohtaa samalla tavalla kuin vaihtovirralla on. [22]

6. YHTEENVETO

Tässä työssä tarkasteltiin tasasähkön käyttöä suurjännitteisessä voimansiirrossa siirtoverkkojen jännitetasolla. Vaikka koko sähköenergiajärjestelmän toiminta perustuukin pitkälti kolmivaiheisen vaihtosähköjärjestelmän hyödyntämiseen, on tasasähköllä siinä nykyään merkittävä rooli. Todettiin, että tasasähkön käyttö osana sähköenergiajärjestelmää ja siirtoverkkoja ei ole mitenkään uusi asia, sillä jo vuonna 1954 on otettu käyttöön ensimmäinen kaupallinen tasasähköllä toteutettu merikaapeliyhteys Ruotsin ja Gotlannin välille ja maailman ensimmäinen jakeluverkosto rakennettiin New Yorkiin vuonna 1882, joka toimi tasasähköllä. Tasasähköyhteydet ovat lisääntyneet merkittävästi viime vuosikymmenten aikana, sillä niissä tarvittavat tehopuolijohdekomponentit ovat kehittyneet ja hinnat laskeneet.

Työn tutkimuskysymys oli se, että millaista teknistä ja taloudellista hyötyä tasasähkön käytöllä voidaan saavuttaa ja millaisissa käyttökohteissa sen hyödyntäminen tulee järkevämmäksi tai ainoaksi vaihtoehdoksi. Näiden asioiden selvittäminen johti luonnostaan tasa- ja vaihtosähköjärjestelmien ominaisuuksien vertailuun, mihin työ pitkälti perustuu. Tietyissä käyttökohteissa vaihtosähkön käyttöön liittyy sellaisia rajoituksia, jotka ovat johtaneet tasasähkön hyödyntämiseen. Nämä tyypilliset tasasähkön käyttökohteet ovat merikaapelit, pitkät siirtoyhteydet ja eri vaihtosähköverkkojen yhdistäminen. Tasasähköyhteys on ainoa vaihtoehto, kun eri nimellistaajuudella toimivat vaihtosähköverkot halutaan yhdistää. Samantaajuiset verkot voidaan synkronoida ja yhdistää vaihtosähköyhteyksin, mutta tällöin verkkojen käyttövarmuus ja käyttötapa täytyy olla samaa luokkaa. Tasasähköyhteyttä käytettäessä tätä vaatimusta ei ole. Vaihtosähköverkon luonteesta johtuvat stabiiliusongelmat ja kaapelien merkittävät varausvirrat suurillla jännitteillä rajoittavat siirtokapasiteettia, joka pienenee siirtoetäisyyden kasvaessa. Pitkät siirtoyhteydet ja merikaapelit toteutetaan tasasähköä hyödyntäen, koska silloin siirtokapasiteettia rajoittaa vain käytettyjen komponenttien termiset kapasiteetit, eikä yllä mainitut rajoitteet ole tasasähkön ongelma.

Työssä käsiteltiin myös tasasähköyhteyksien teknisen toiminnan pääpiirteitä. Yllä esitettyihin tyypillisiin käyttökohteisiin rakennetut tasasähköyhteydet toimivat osana muuta vaihtosähköverkkoa joko yhdistäen eri verkkoja toisiinsa tai toimien saman silmukoidun verkon sisällä muiden vaihtosähköyhteyksien rinnalla. Tämä edellyttää suuntaajien rakentamista yhteyden molempiin päihin, joiden toiminta perustuu nykyään tyristoreista tai IGB-transistoreista rakennettuihin siltoihin. Suuntaajien ansiosta tasasähköyhteyden tehon suuruutta ja suuntaa voidaan säätää ja se voidaan tehdä erittäin nopeasti. Tämä

onkin tasasähköyhteyden tärkein ominaisuus ja sen avulla voidaan parantaa muun vaihtosähköverkon toimintaa monella eri tavalla.

Vaikka suuntaaja-asemien hinnat ovat laskeneet, muodostavat ne silti merkittävän osuuden tasasähköyhteyksien kokonaiskustannuksista ja ovat paljon kalliimpia verrattuna vastaaviin vaihtosähköasemiin. Täten asemat ovat merkittävässä roolissa, kun vertaillaan tasa- ja vaihtosähköyhteyksien investointikustannuksia keskenään. Vaihtosähköjohtojen kustannukset kasvavat kuitenkin nopeammin siirtoetäisyyden kasvaessa, joten tasasähköyhteyden rakentaminen tulee maksamaan vähemmän, kun siirtoetäisyys kasvaa tarpeeksi. Suuntaajien toiminta aiheuttaa merkittäviä häviöitä, mutta vaihtosähköjohdon siirtohäviöt ovat suuremmat, joten kokonaishäviöidenkin osalta tasasähköyhteys on parempi vaihtoehto, kun etäisyys on tarpeeksi iso.

Tasasähköyhteyksien katsotaan olevan tärkeä osa tulevaisuuden siirtoverkostoa. Sähköverkon ominaisuudet muuttuvat, kun ilmastonmuutoksen myötä uusiutuvan energian osuus lisääntyy. Samalla ihmiskunta on koko ajan riippuvaisempi luotettavan sähköenergian saannista ja siirtoverkon käyttövarmuus sekä suorituskyky korostuu entisestään. Tasasähköyhteyksien muun vaihtosähköverkon toimintaa parantavat vaikutukset, pitkien siirtoyhteyksien, merikaapelien sekä eri verkkojen yhdistämisen mahdollistaminen auttavat tulevaisuuden haasteissa ja yhtenäisten sähkömarkkinoiden toteuttamisessa.

LÄHTEET

[1] K. Meah, S. Ula, Comparative Evaluation of HVDC and HVAC Transmission Systems, 2007, IEEE Power Engineering Society General Meeting, Tampa, FL, USA, 2007, s. 1-5, doi: 10.1109/PES.2007.385993.

[2] J. Elovaara, L. Haarla, Sähköverkot 1: järjestelmätekniikka ja sähköverkon laskenta, Otatieto, 2011.

[3] K. Nousiainen, Sähköenergiajärjestelmät opetusmoniste, Tampereen yliopisto 2019.

[4] Fingrid, Fingridin sähkönsiirtoverkko, Saatavissa: fingridin-sahkonsiirtoverkko

[5] Fingrid, Käyttövarmuuden ylläpito, Saatavissa: kayttovarmuuden-yllapito

[6] Fingrid, Sähköjärjestelmän tila, Saatavissa: sahkojarjestelman-tila

[7] Fingrid, Kantaverkon nimeäminen, 1.1.2024, Saatavissa: kantaverkon-nimeaminen-paatos-1.1.2024.pdf

[8] Energiavirasto, Sähköverkkotoiminnan tekniset tunnusluvut, 2022. Saatavissa: Sähköverkkotoiminnan tekniset tunnusluvut 2022 (excel)

[9] O. E. Oni, I. E. Davidson, K. N. I. Mbangula, A review of LCC-HVDC and VSC-HVDC technologies and applications, 2016, IEEE 16th International Conference on Environment and Electrical Engineering (EEEIC), Florence, Italy, 2016, s. 1-7, Saatavissa doi: 10.1109/EEEIC.2016.7555677.

[10] Siemens, High Voltage Direct Current Transmission: Proven Technology for Power Exchange, 2011, Siemens AG, Saatavissa: HVDC_Proven_Technology-Siemens.pdf

[11] D.V. Hertem, O. Gomis-Bellmunt, J. Liang, HVDC Grids - For Offshore and Supergrid of the Future, 2016, John Wiley & Sons. Saatavissa: https://app.knovel.com/hotlink/toc/id:kpHVDCGFO1/hvdc-grids-offshore-supergrid/hvdc-grids-offshore-supergrid

[12] A. Alassi, S.Bañales, O. Ellabban, G. Adam, C. MacIver, HVDC Transmission: Technology Review, Market Trends and Future Outlook, Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2019, s. 530-554, Saatavissa: https://doi.org/10.1016/j.rser.2019.04.062

[13] U. Karki, F. Z. Peng, Using AC Underground Cable for long distance power transmission, 2016, IEEE Power and Energy Society General Meeting (PESGM), Boston, MA, USA, 2016, s. 1-5, Saatavissa doi: 10.1109/PESGM.2016.7742053.

[14] C.L Wadhwa, Electrical Power Systems, New Academic Science, 2009, ProQuest Ebook Central, Saatavissa: https://ebookcentral.proquest.com/lib/tampere/detail.action?docID=3382455#

[15] Wikipedia, List of HVDC projects, Saatavissa: https://en.wikipedia.org/wiki/List_of_HVDC_projects#/map/2.%C2%A7

[16] Electrek, The world's longest subsea power cable is now complete, 4.9.2023, Saatavissa: https://electrek.co/2023/09/04/worlds-longest-subsea-power-cable/

[17] Fingrid, Kantaverkon kehittämissuunnitelma 2024–2033, Saatavissa: fingrid_kehittamissuunnitelma_2024-2033.pdf

[18] K.R. Padiyar, HVDC Power Transmission Systems, New Academic Science, 2011. ProQuest Ebook Central, Saatavissa: https://ebookcentral.proquest.com/lib/tampere/reader.action?docID=3440198&ppg=1#.

[19] S. Quaia, Critical analysis of line loadability constraints, Wiley, 2017, Saatavissa: https://doi.org/10.1002/etep.2552

[20] Hitachi, The world's most powerful transmission system facilitated by Hitachi ABB Power Grids Technologies, 12.7.2020, Saatavissa: https://www.hitachienergy.com/br/pt/news-and-events/features/2020/07/the-world-s-most-powerful-transmis-sion-system-facilitated-by-hi

[21] Electrical & Instrumentation Blog, Generator Synchronization, Saatavissa: https://www.electricneutron.com/generator-synchronization/

[22] ENTSO-E, HVDC Links in System Operations; Technical paper, 2019, Saatavissa:https://eepublicdownloads.entsoe.eu/clean-documents/SOC%20documents/20191203_HVDC%20links%20in%20system%20operations.pdf.

[23] ABB, Special Report; 60 years of HVDC, 2014, Saatavissa: https://library.e.abb.com/public/aff841e25d8986b5c1257d380045703f/140818%20ABB%20SR%2060%20years%20of%20HVDC_72dpi.pdf

[24] J. Partanen, Sähkönsiirtotekniikka, Tasasähkövoimansiirto, Lappeenrannan yliopisto, 2011

[25] PSMA consulting , HVDC vs HVAC Power Transmission, Saatavissa:https://www.psmaconsulting.com/power-system-studies/hvdc/hvdc-vs-hvac-transmission