



SEINÄJOEN AMMATTIKORKEAKOULU  
SEINÄJOKI UNIVERSITY OF APPLIED SCIENCES

Alexi Haapala

---

## **STATCOM – Rakentaminen työmaapäällikön näkökul- masta**

Staattisen synkronikompensaattorin lisääminen sähköasemalle

Opinnäytetyö

Kevät 2025

Insinööri (AMK), Automaatiotekniikka



SEINÄJOEN AMMATTIKORKEAKOULU

## Opinnäytetyön tiivistelmä

Tutkinto-ohjelma: Insinööri (AMK), Automaatiotekniikka

Suuntautumisvaihtoehto: Sähköautomaatio

Tekijä: Aleksi Haapala

Työn nimi alaotsikoineen: STATCOM – Rakentaminen työmaapäällikön näkökulmasta: Staattisen synkronikompensoattorin lisääminen sähköasemalle

Ohjaaja: Matti Perälä

Vuosi: 2025

Sivumäärä: 44

Liitteiden lukumäärä: 1

---

Tämä opinnäytetyö tehtiin Siemens Energy Oy:lle, joka tarjoaa energian tuotantoon ja siirtoon liittyviä ratkaisuja. Työn tavoitteena oli luoda työohje, jolla sähköasemarakentamisen työmaapäällikkö pystyy vetämään STATCOM-työmaan sujuvasti alusta loppuun. STATCOMia ei Suomessa ole ennen rakennettu, joten opinnäytetyö nähtiin hyvänä valmistavana työnä tulevalle STATCOM-työmaan työmaapäällikölle.

Tutkimus aloitettiin vertailulla, jossa mietittiin asioita STATCOM-rakentamisesta. Tarkoitus oli etsiä seikkoja, jotka voisivat erota perinteisestä kytkinasemarakentamisesta. Koska eroavaisuudet työmaapäällikön tehtävissä havaittiin vähäisiksi, päätettiin työohjeesta tehdä yleinen ohje, jonka on tarkoitus toimia jokaisella Siemens Energy Oy:n sähköasematyömaalla. Työohje ei ole julkinen. Työohjetta voidaan käyttää erityisesti muistilistana, että kaikki lain ja tilaajan vaatimat asiakirjat ovat valmiina vaadittuna ajankohtana.

<sup>1</sup> Asiasanat: kompensointi, sähköverkot, sähköasemat, loisteho, stabiilius

SEINÄJOKI UNIVERSITY OF APPLIED SCIENCES

## **Thesis abstract**

Degree programme: Bachelor of Engineering, Automation Engineering

Specialisation: Electric Automation

Author: Aleksi Haapala

Title of thesis: STATCOM – Construction from site manager’s perspective: Adding a Static Synchronous Compensator to an electrical substation

Supervisor: Matti Perälä

Year: 2025

Number of pages: 44

Number of appendices: 1

---

The thesis was written for Siemens Energy Oy, a company that provides solutions for energy production and transmission. The aim of the thesis was to create a work manual that would help the substation construction site manager to smoothly manage a STATCOM project from start to finish. At the time STATCOM had never been built in Finland before, so the thesis was seen as a good springboard for a future STATCOM site manager.

The study was started with a comparison to find differences between a traditional switchgear construction process and the STATCOM construction process. Since the differences in the tasks of the site manager were found to be minor, it was decided to make the work instruction quite general so that it could be used on every substation site of Siemens Energy Oy. In particular, the work instruction was intended to be used as a checklist to ensure that all documents that are required by law and the client are ready at the required time. The work instruction was not published.

<sup>1</sup> Keywords: compensation, electrical power networks, electric substations, reactive power, stability

## SISÄLTÖ

Opinnäytetyön tiivistelmä .....	2
Thesis abstract .....	3
SISÄLTÖ .....	4
Kuva-, kuvio- ja taulukkoluetelo .....	6
Käytetyt termit ja lyhenteet.....	8
1 JOHDANTO .....	9
1.1 Työn tausta .....	9
1.2 Työn tavoite.....	9
1.3 Työn rakenne .....	9
1.4 Siemens Energy.....	10
1.5 Tekoälyn käyttö tässä opinnäytetyössä.....	11
2 SÄHKÖVERKON STABIILIUUS.....	12
2.1 Jännitestabiilius .....	12
2.2 Kulmastabiilius .....	14
2.3 Taajuusstabiilius.....	15
3 FACTS .....	17
3.1 Laitteiden tyypit .....	18
3.1.1 Sarjasäätimet.....	19
3.1.2 Rinnakkaissäätimet.....	19
3.1.3 Sarja-sarjasäätimet .....	20
3.1.4 Rinnakkais-sarjasäätimet.....	21
3.1.5 Jännitelähdemuunnin (VSC) .....	21
4 STATCOM.....	24
4.1 Toimintaperiaate.....	24
4.2 IGBT (Insulated Gate Bipolar Transistor) .....	28
4.3 MMC (Modular Multilevel Converter).....	29
5 STATCOM-RAKENTAMISEN HAASTEET VERRATTUNA KYTKINASEMARAKENTAMISEEN.....	33

5.1	Työmaapäällikön näkökulmasta .....	33
5.1.1	Työturvallisuus .....	33
5.1.2	Toteutus .....	34
5.1.3	Materiaalin toimitus .....	35
5.1.4	Aikataulu .....	35
5.2	Projektipäällikön näkökulmasta .....	36
5.2.1	Hankintaprosessi .....	36
5.2.2	Teknisten vaatimusten täytyminen .....	36
5.2.3	Riskit .....	37
5.2.4	Viestintä .....	37
6	TYÖOHJE .....	38
7	TULOKSET .....	39
8	YHTEENVETO .....	40
	LÄHTEET .....	41
	LIITTEET .....	44

## Kuva-, kuvio- ja taulukkoluetelo

Kuva 1. SVC PLUS -konvertteri .....	27
Kuva 2. Siemens Energyn tehomoduli .....	29
Kuvio 1. Puhdas jännitestabiilius .....	13
Kuvio 2. Puhdas kulmastabiilius .....	15
Kuvio 3. Sarjasäädin .....	19
Kuvio 4. Rinnakkaissäädin .....	20
Kuvio 5. Yhtenäinen sarja-sarjasäädin .....	20
Kuvio 6. Yhtenäinen rinnakkais-sarjasäädin .....	21
Kuvio 7. Peruste jännitelähdemuuntimen venttiilille .....	22
Kuvio 8. Jännitelähdemuuntimen perustoiminta .....	23
Kuvio 9. Yleiskuva Siemens Energyn STATCOM-järjestelmästä.....	24
Kuvio 10. IGBT ja rinnankytketty diodi .....	25
Kuvio 11. Insulated Gate Bipolar Transistor.....	28
Kuvio 12. IGBT-transistoreista koostuva puolisolta .....	30
Kuvio 13. IGBT-transistoreista muodostuva täysoilta .....	30
Kuvio 14. Yhden alamoduulin tuottaman jännite a) puolisolta ja b) täysoilta .....	31
Kuvio 15. MMC-toimintaperiaate kolmivaiheisena .....	32

Taulukko 1. Siemens Energyn tarjoaminen FACTS-laitteiden ominaisuudet.....	18
--	----

## Käytetyt termit ja lyhenteet

<b>FACTS</b>	Joustavat sähkönsiirtojärjestelmät.
<b>HVAC</b>	Suurjännitteinen vaihtovirta.
<b>HVDC</b>	Suurjännitteinen tasavirta.
<b>IGBT</b>	Eristyshilainen bipolaaritransistori.
<b>Inertia</b>	Sähköjärjestelmän kyky vastustaa taajuusmuutoksia.
<b>MMC</b>	Modulaarinen monitasomuunnin.
<b>STATCOM</b>	Staattinen synkronikompensaattori.
<b>Transientti</b>	Nopea taajuuden, jännitteen tai virran muutos.

# 1 JOHDANTO

## 1.1 Työn tausta

Nopeasti lisääntyvän uusiutuvan- ja hajautetun energiantuotannon vuoksi lisääntyvät myös haasteet sähköverkon käyttövarmuudelle. Vuoden 2023 lopulla Suomen tuulivoimakapasiteetti oli 6946 megawattia (Energiateollisuus (ET), i.a.). Vuoden 2024 loppuun mennessä Suomen länsirannikolle on rakentumassa tuulivoimaa noin 5000 megawattia, josta 2000 megawattia Vaasan ja Porin välille (Fingrid, 2024). Fingrid (2022) ennustaa, että 2030-luvulla tuulivoimankapasiteetti nousisi jopa 20000 megawattiin.

Suuren tuulivoimatuotannon takia Kantaverkkoyhtiö Fingrid Oyj rakennuttaa lähitulevaisuudessa kaksi staattista synkronikompensaattoria (STATCOM) Kristinestadin ja Anttilan sähköasemille tukemaan kantaverkon stabiilia toimintaa (Fingrid, 2024). Tuulivoimaloilla ei ole kykyä vastustaa jännite- ja taajuustason muutoksia, joten STATCOM on tähän hyvä ratkaisu nopean reagointinsa ja hyvän vikatilanteiden sietokyvyn ansiosta.

Tämä opinnäytetyö käsittelee STATCOM-sähköasemarakentamista ja sen haasteita kytkinasemarakentamiseen verrattuna. Siemens Energy Oy toimii päätoteuttajana molemmissa Fingrid Oyj:n hankkeissa Kristinestadin ja Anttilan sähköasemilla.

## 1.2 Työn tavoite

Tämän työn tavoitteena on luoda Siemens Energy Oy:lle työohje, jonka avulla sähköpuolen työmaapäällikkö pystyy vetämään läpi STATCOM-työmaan sujuvasti alusta loppuun sekä vertailla STATCOM-rakentamisen haasteita kytkinasemarakentamiseen. Työohjetta tullaan hyödyntämään ensimmäisen kerran syksyllä 2025 alkavalla STATCOM-työmaalla Kristiinankaupungissa.

## 1.3 Työn rakenne

Ensimmäisessä luvussa esitellään työn tausta, tavoite ja toimeksiantaja Siemens Energy Oy, jonka jälkeen siirrytään teoriaosaan. Teoriaosa alkaa luvussa kaksi sähköverkon

stabiiliuden läpi käynnillä. Seuraavaksi työssä kerrotaan joustavista sähkönsiirtojärjestelmistä. Tämän jälkeen siirrytään STATCOMiin, tässä luvussa käsitellään STATCOMin toimintaperiaatetta sekä laitteistoa, jota se käyttää toimiakseen. STATCOMin jälkeen siirrytään työn osuuteen. Viidennessä luvussa vertaillaan STATCOM-rakentamista kytkin-asema-rakentamiseen. Kuudennessa luvussa kerrotaan työohjeen tekemisestä.

## 1.4 Siemens Energy

Siemens Energy on maailmanlaajuisesti toimiva energian siirtoon ja tuotantoon tarkoitettuja ratkaisuja tarjoava yritys (Siemens Energy, i.a.-a). Siemens Energy on yksi maailman johtavista yrityksistä energia-alalla. Noin kuudesosa koko maailman sähköntuotannosta perustuu Siemens Energyn kehittämään teknologiaan. Vuonna 2024 Siemens Energy AG toimi 90 maassa ja tarjosi työpaikan 99000 työntekijälle.

Siemens Energy muodostui vuonna 2020, kun Siemens AG päätti luopua Gas and Power -yksiköstään (Siemens Energy, 2019a). Kaikki Siemens AG:n Gas and Power -yksikön toiminta irrotettiin ja luotiin uusi yritys, jonka alle yksikön liiketoiminta siirtyi. Yrityksen nimi valittiin työntekijöiden ehdotusten perusteella, joista suosituin oli Siemens Energy (Siemens Energy, 2019b).

Suomessa toimii seitsemän eri Siemens-yhtiötä (Siemens, i.a.). Ne ovat Siemens Osakeyhtiö, Siemens Financial Services, Siemens Energy, Siemens Healthineers, Siemens Industry Software, Siemens Mobility ja Siemensin tytäryhtiö VIBECO.

Siemens Energy toimii kolmella liiketoiminta-alueella (Siemens Energy, 2024). Low- or zero-emission power generation sisältää Gas Services -yksikön, joka tarjoaa ratkaisuja kaasuturbiinien ja generaattorien hyödyntämiseen. Tähän liiketoiminta-alueeseen kuuluu myös Siemens Gamesa, joka on erikoistunut tuulivoiman ratkaisuihin. Transport and storage of energy kattaa Grid Technologies -yksikön tarjoamat ratkaisut sähköasemien kehittämiseen ja sähkön varastointiin sekä maalla että merellä. Transformation of Industry keskittyy kehittämään vähäpäästöisiä ratkaisuja teollisuuden tarpeisiin, edistäen siten ympäristöystävällisempää energiankäyttöä.

Tämä opinnäytetyö on tehty Siemens Energy Oy:lle. Siemens Energy Oy toimii Suomessa sekä Baltian maissa. Vuonna 2024 yritys työllisti 94 työntekijää ja sen liikevaihto oli 81 miljoonaa euroa (Kauppalehti, i.a.). Siemens Energy Oy:n pääkonttori sijaitsee Espoossa. Yrityksellä on Suomessa myös yksi sivukonttori, joka sijaitsee Seinäjoella (Profinder, i.a.).

### **1.5 Tekoälyn käyttö tässä opinnäytetyössä**

Tässä opinnäytetyössä ei ole käytetty tekoälyä. Kaikki työssä käytetyt lähteet ovat tämän työn kirjoittajan hakemia lähteitä, eivät tekoälyn tuottamia lähteitä. Englanninkielisen tiivistelmän kirjoituksessa on käytetty apuna DeepL Translatoria kääntämiseen ja Grammarlyä kieliasun tarkistamiseen.

## 2 SÄHKÖVERKON STABIILIUUS

Viime vuosina energia-alalla on tapahtunut valtavia muutoksia ja kasvua (Siemens Energy, 2023, s. 4). Uusiutuvien energialähteiden lisääminen sähköverkkoon muuttaa järjestelmän toimintaa. Pyörivien generaattorien vaihtuminen epäsynkronisiin generaattoreihin vähentää sähköverkon inertiaa, koska verkkoon liitettyjä pyöriviä massoja on koko ajan vähemmän. Jos sähköverkosta, jossa on pieni inertia, putoaa suuri sähköntuotantoyksikkö, aiheutuu tästä suuri, hetkellinen taajuusalenema (Fingrid, i.a.-a). Sähköjärjestelmä, jossa on suuri inertia, on sietokykyisempi yksittäisen sähköntuotantoyksikön putoamiselle, joten mahdollinen taajuusalenema on huomattavasti pienempi.

Taajuuden ja jännitteen pysyminen lähellä nimellisarvoja on edellytys sähköverkon hyvälle toiminnalle (Elovaara & Haarla, 2011, s. 347). Tavanomaisessa vaihtosähkösiirtojärjestelmässä tehonsiirto on rajoittunut useiden tekijöiden vuoksi, kuten lämpö- ja jänniterajat, transientin stabiliteetin raja ja oikosulkuvirran raja (Elprocus, i.a.). Sähköverkon tehosta noin 8–9 % kuluu häviöihin (Clemens, 2023). Nämä tekijät määrittävät suurimman mahdollisen sähkötehon, mikä voidaan siirtää tehokkaasti aiheuttamatta vahinkoa sähkölaitteille tai voimalinjoille. Jatkuva hajautettujen uusiutuvien energialähteiden lisääntyminen luo hankaluuksia sähköverkon varman ja vakaan toiminnan kannalta (Siemens Energy, i.a.-b).

Sähköverkossa on jatkuvia muutoksia tuotannossa, kuormassa ja siirtolaitteissa (Elovaara & Haarla, 2011, s. 216). Stabiilissa järjestelmässä verkon vioista ja muutoksista huolimatta tahtikoneet pysyvät tahdissa, jännite ja taajuus pysyvät hyväksyttävällä tasolla. Sana stabiilius tai käyttövarmuus tarkoittaa tässä tapauksessa sähköverkon kykyä kestää komponenttien vikaantumista ja verkon äkillisiä häiriöitä (Fingrid, i.a.-b). Suomessa käytetään N-1-kriteeriä, jonka mukaan sähköverkko kestää komponenttien vikaantumisen ja yksittäisten viat aiheuttamatta keskeytyksiä sähköntuotannolle tai kulutukselle.

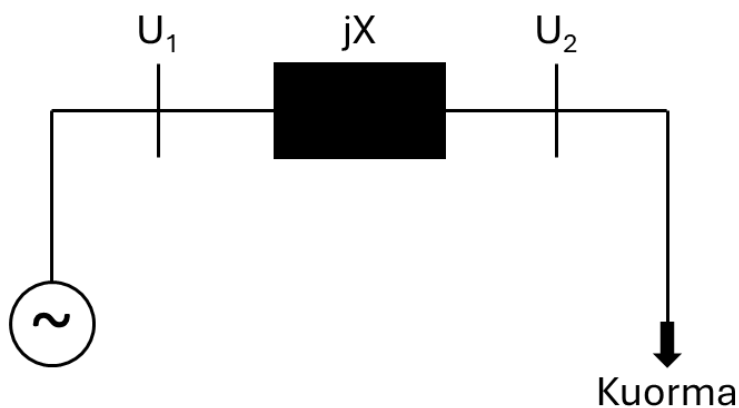
### 2.1 Jännitestabiilius

Verkon komponenttien ja johtojen tuottama loisteho kulkevat käsikädessä sähköverkon jännitteen kanssa (Elovaara & Haarla, 2011, s. 246). Jännitestabiilius tarkoittaa järjestelmän kykyä ylläpitää jännitteet vakaana jatkuvassa tilassa sekä häiriöiden jälkeen kaikissa

verkon solmuissa. Häiriöt voivat olla esimerkiksi oiko- ja maasulkuja. Jännitestabiilius on yksi siirtokapasiteettia rajoittava tekijä verkoissa, joissa on kuormitusalueita, joissa on vähän tai ei ollenkaan tahtigeneraattoreita kulutukseen verrattuna. Vikojen jälkeen tahtigeneraattorit pystyvät syöttämään loistehoa verkkoon, joten mitä vähemmän niitä on, sitä kriittisempää stabiiliuden säilyminen on verkkovikojen jälkeen.

Jänniteromahdukseksi kutsutaan tilannetta, jossa häiriön jälkeen järjestelmän jännite on laskenut huomattavasti (Elovaara & Haarla, 2011, s. 246). Jännite-epästabiilius tarkoittaa, että häiriön jälkeen jännitetasot heiluvat voimakkaasti tai ne eroavat normaalista tasosta riittävän paljon.

Kuviossa 1 havainnollistetaan puhdasta jännitestabiiliutta yksinkertaisella verkolla, jossa kuorman päässä ei ole tahtigeneraattoreita (Elovaara & Haarla, 2011, s. 217). Johdon tuotantopäässä on generaattori, keskellä johdon reaktanssi  $jX$  ja loppupäässä pätötehoa  $P$  ja loistehoa  $Q$  ottava kuorma.  $U_1$  on johdon alkupään jännite.



Kuvio 1. Puhdas jännitestabiilius (perustuu Elovaara & Haarla, 2011, s. 217).

Kaavalla (1) voidaan laskea johdon loppupään jännite  $U_2$ , kun tiedetään johdon reaktanssi, jännite  $U_1$  ja kuorman ottavat pätö- ja loistehot (Elovaara & Haarla, 2011, s. 251).

$$U_2 = \sqrt{\frac{E^2 - 2QX \pm \sqrt{(2QX - E)^2 - 4X^2(P^2 + Q^2)}}{2}} \quad (1)$$

missä

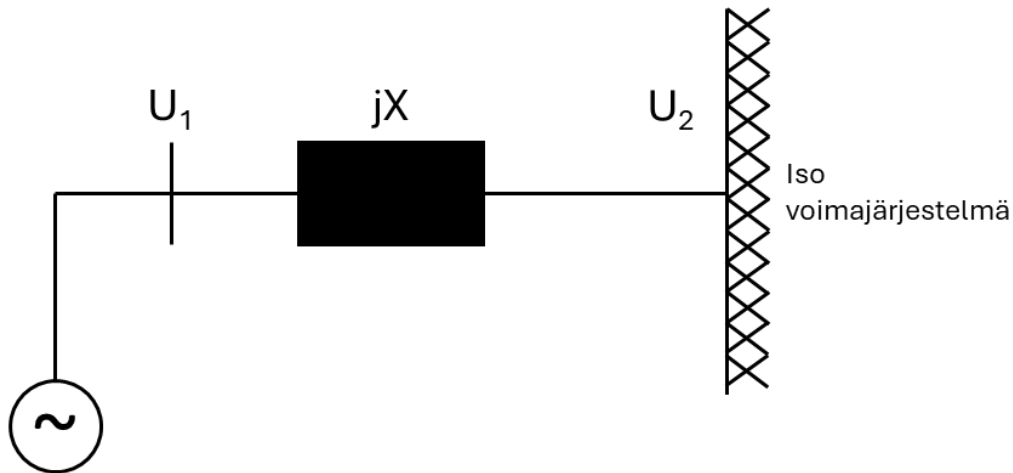
$U_2$	on johdon loppupään jännite
$E$	on johdon tuotantopään jännite ( $U_1$ )
$X$	on johdon reaktanssi
$P$	on kuorman pätöteho
$Q$	on kuorman loisteho

## 2.2 Kulmastabiilius

Sähkönverkon generaattoreista suurin osa on tahtigeneraattoreita (Elovaara & Haarla, 2011, s. 218). Tahtigeneraattoreiden tahdissa pysyminen on verkon stabiiliuden kannalta erittäin tärkeää, sillä niiden pyörimisnopeus vastaa verkon taajuutta, joten kulmastabiilius tarkoittaa tahtigeneraattoreiden kykyä pysyä tahtikäynnissä. Kulmastabiiliuden säilyminen toteutuu, kun verkon muutosten jälkeen generaattorit pystyvät palauttamaan tasapainon sähköisen ja mekaanisen tehon välille.

Jos yksittäinen kone menettää stabiilin käyntinsä, tulee se irrottaa verkosta (Elovaara & Haarla, 2011, s. 218). Muu järjestelmä voi tästä huolimatta jatkaa toimintaansa. Stabiilin käyntinsä menettävän generaattorin stabiiliuteen vaikuttaa sen verkkoon antama sähköteho sekä verkon ja generaattorin sisäisen jännitteen välinen kulmaero.

Kuviossa 2 havainnollistetaan puhdasta kulmastabiiliutta yksinkertaisella verkolla (Elovaara & Haarla, 2011, s. 217). Johdon alkupäässä on generaattori ja loppupäässä jäykkä verkko, eli sähköverkko, jossa jännite ja taajuus ovat vakioita, mikä tarkoittaa, että molemmissa päissä on tahtigeneraattoreita.



Kuvio 2. Puhdas kulmastabiilius (perustuu Elovaara & Haarla, 2011, s. 217).

Kun tiedetään johdon päiden lois-, pätö- ja näennäisteho, voidaan muodostaa kaavan (2) mukainen tehokulmayhtälö, joka ilmaisee johdolla siirtyvän pätötehon (Elovaara & Haarla, 2011, s. 220).

$$P = \frac{U_1 U_2}{X} \sin \delta \quad (2)$$

missä

- P on pätöteho
- $U_1$  on johdon vasemman pään jännite
- $U_2$  on johdon oikean pään jännite
- X on johdon reaktanssi
- $\delta$  on jännitteiden välinen kulma

### 2.3 Taajuusstabiilius

Järjestelmän kyky ylläpitää vakaata taajuutta kuorman ja kulutuksen välisen epätasapainon jälkeen kutsutaan taajuusstabiiliudeksi (Elovaara & Haarla, 2011, s. 254). Epätasapainotilanne syntyy kuormituksen liiallisesta noususta tai tuotannon vähäisyydestä kulutuksen suhteen. Kun taajuutta ei saada palautettua, on vaarana sähköverkon romahtaminen. Jos verkossa on liian vähän generaattoreita tai verkon kuormitusta ei voida vähentää, syntyy

kriittinen tilanne taajuusstabiiliuden suhteen. Yleensä taajuuden noustessa yli nimellisarvon ei synny ongelmaa, koska taajuutta voidaan laskea vähentämällä generaattoreiden luomaa tehoa tai kytkemällä ne irti kokonaan.

Taajuusromahdukseksi kutsutaan tilannetta, jossa verkon taajuus on laskenut häiriön aikana, eikä taajuusalenamaa saada estettyä (Elovaara & Haarla, 2011, s. 256). Taajuuden laskiessa liikaa, syntyy tilanne, jossa turbogeneraattorit tulee irrottaa verkosta, etteivät niiden siivekkeet vaurioidu. Siivekkeiden vaurioituminen tapahtuu, jos turbogeneraattorit syöttävät tehoa verkkoon ja verkon taajuus laskee alle 47 Hz. Tästä syystä esimerkiksi lämpövoimalaitokset irrotetaan verkosta, kun 47,5 Hz raja alittuu. Tällaisissa tilanteissa taajuusromahduksen mahdollisuus kasvaa, kun jo valmiiksi liian vähäistä verkon tehonsyöttöä vähennetään entisestään.

### 3 FACTS

FACTS tulee sanoista flexible AC transmission systems ja sen voi suomentaa joustaviksi sähkösiirtojärjestelmiksi (Elovaara & Haarla, 2011, s. 335). Nämä laitteet sisältävät säätäjiä ja tehoelektroniikkaa, joita hyödyntäen voidaan parantaa sähköverkon siirtokapasiteettia ja säädettävyyttä. IEEE (Institute of Electrical and Electronics Engineers) määrittelee FACTSit vaihtovirtajärjestelmiksi, jotka sisältävät tehoelektroniikkaan perustuvia ja muita staattisia ohjaimia, joilla parannetaan sähköverkon säädettävyyttä ja tehonsiirtokykyä (Electrical 4 U, 2024).

FACTS käsittää monia eri laitteistoja, joilla pystytään estämään esimerkiksi suuria jännitevaihteluita ja sähkökatkoja, sekä lisäämään verkon kuormitettavuutta mahdollistaen stabiilimman AC-verkon ja parantaen sähkönsiirron hyötysuhdetta (Siemens Energy, i.a.-b). Siemens Energyn tarjoamia FACTS-järjestelmiä ovat muun muassa staattinen synkronikompensoattori (STATCOM, SVC PLUS), synkronikompensoattori (SynCon) ja kiinteä sarjakondensaattori (FSC). Taulukossa 1 on esitetty Siemens Energyn tarjoamien FACTS-järjestelmien eri ominaisuudet.

Taulukko 1. Siemens Energyn tarjoaminen FACTS-laitteiden ominaisuudet (Siemens Energy, 2023).

Järjestelmän palvelu	SVC PLUS (STAT-COM)	SVC PLUS FS (E-STATCOM)	SynCon	FSC
Dynaaminen jännitteen-säätö	Kyllä	Kyllä	Kyllä	Ei
Kiinteä jännitteensäätö	Kyllä	Kyllä	Kyllä	Ei
Aktiivinen suodatus	Kyllä	Ei	Ei	Ei
Verkon muodostaminen	Kyllä	Kyllä	Ei	Ei
Nopea taajuus reagointi	Ei	Kyllä	Ei	Ei
Inertiavaikutus	Ei	Kyllä	Kyllä	Ei
Oikosulkuvaikutus	Ei	Ei	Kyllä	Ei
Dynaaminen kuormavirran säätö	Ei	Ei	Ei	Ei
Kiinteä kuormavirran säätö	Ei	Ei	Ei	Kyllä
Verkkojen yhdistäminen	Ei	Ei	Ei	Ei
SSR vaimennus	Kyllä	Kyllä	Ei	Ei

### 3.1 Laitteiden tyypit

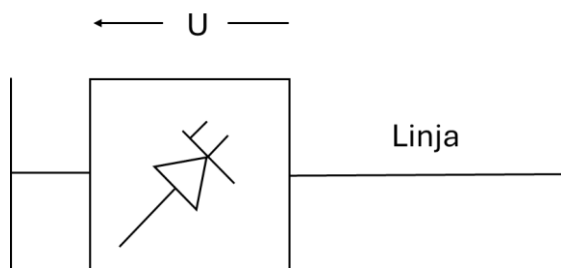
FACTS-säätimet edistävät järjestelmän optimaalista toimintaa vähentämällä tehohäviöitä ja parantamalla jänniteprofiilia (Padiyar, 2007, s. 15). Jännitteen säädössä FACTS-säädin syöttää verkkoon induktiivista tai kapasitiivista loistehoa mahdollisimman nopeasti riippuen verkon vaatimuksista ja samalla parantaa sähkönlaatua ja sähkösiirron tehokkuutta (Elovaara & Haarla, 2011, s. 347). Laitteiden pätehoa muuttamalla voidaan säätää verkon taajuutta. Pääsääntöisesti rinnankytketty FACTS-säädin tarjoaa jännitetukea verkkoon (Padiyar, 2007, s. 14). Sarjaan kytketty säädin säätelee virran kulkua. Yhdistelmäsaati-mellä voidaan ohjata jännitteen lisäksi myös virran kulkua.

FACTS-laitteet voidaan jakaa neljään eri kategoriaan: sarjasäätimiin, rinnakkaissäätimiin sekä yhdistettyihin rinnakkais-sarjasäätimiin ja sarja-sarjasäätimiin (Hingorani & Gyugyi, 2000, s. 13). Riippuen käytetystä tehoelektroniikasta, FACTS-säätimet voidaan jakaa

myös muuttuvan impedanssin tyyppisiin ja virta- ja jännitelähdemuunnin perusteisiin säätimiin (Padiyar, 2007, s. 8).

### 3.1.1 Sarjasäätimet

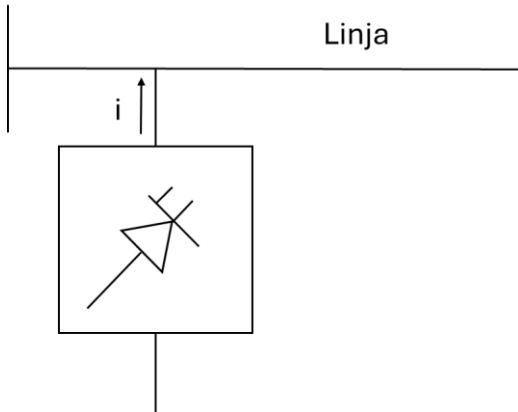
Sarjasäätimet koostuvat linjan kanssa sarjaan kytkettävistä muuttuvan impedanssin laitteista, kuten kondensaattoreista, reaktoreista tai tehoelektroniikkaan pohjautuvasta muuttuvasta lähteestä, joka tuottaa päätaajuuksia, alisykronisia ja harmonisia taajuuksia (Hingorani & Gyugyi, 2000, s. 13). Jännitteen ollessa vaiheistettu linjan virran kanssa laite syöttää tai kuluttaa loistehoa. Kuviossa 3 havainnollistetaan sarjasäätimen kytkentä linjaan.



Kuvio 3. Sarjasäädin (perustuu Hingorani & Gyugyi, 2000, s. 15).

### 3.1.2 Rinnakkaissäätimet

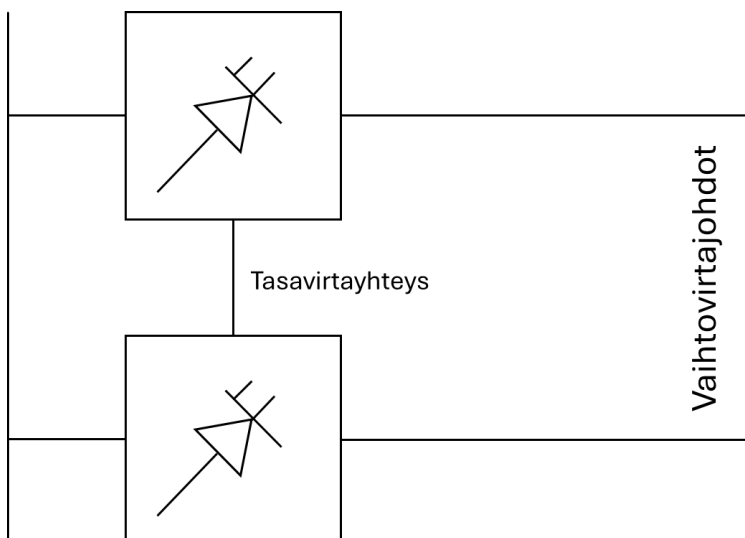
Rinnakkaissäätimet voivat koostua sarjasäätimien tapaan muuttuvan impedanssin laitteista tai näiden yhdistelmästä, jotka on kytketty rinnan voimalinjan kanssa (Hingorani & Gyugyi, 2000, s. 13). Säätimien syöttämän virran ollessa vaiheistettu linjan jännitteen kanssa säädin syöttää tai kuluttaa loistehoa. Kuviossa 4 havainnollistetaan rinnakkaissäätimen kytkentä linjaan.



Kuvio 4. Rinnakkaissäädin (perustuu Hingorani & Gyugyi, 2000, s. 15).

### 3.1.3 Sarja-sarjasäätimet

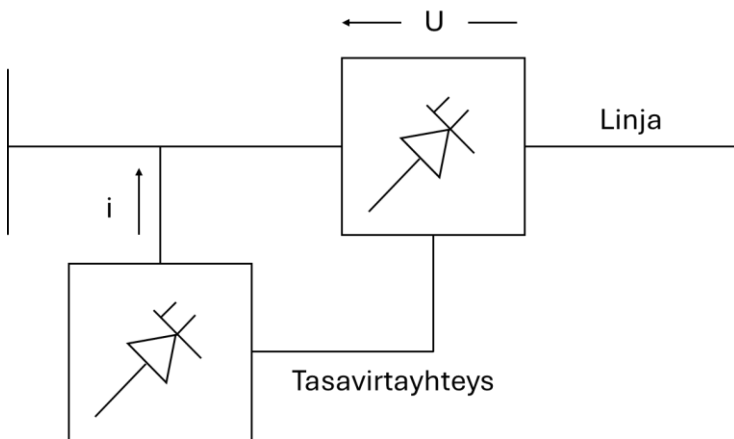
Sarja-sarjasäätimet voivat olla yhdistelmä erillisistä sarjasäätimistä, joita ohjataan koordinoitusti monilinjaisessa järjestelmässä (Hingorani & Gyugyi, 2000, s. 13). Sarja-sarjasäädin voi olla myös yhtenäinen säädin, joka tarjoaa jokaiselle linjalle oman loistehon kompensoinnin, mutta siirtää myös tehoa linjojen välillä. Kuviossa 5 havainnollistetaan sarja-sarjasäätimen kytkentä linjaan.



Kuvio 5. Yhtenäinen sarja-sarjasäädin (perustuu Hingorani & Gyugyi, 2000, s. 15).

### 3.1.4 Rinnakkais-sarjasäätimet

Rinnakkais-sarjasäätimet voivat olla yhdistelmä erillisistä rinnakkais- ja sarjasäätimistä, joita ohjataan koordinoitusti (Hingorani & Gyugyi, 2000, s. 13). Pääasiassa tällaisen yhdistelmäsäätimen rinnakkaisosa syöttää järjestelmään virtaa ja sarjaosa syöttää jännitettä sarjassa linjaan nähden. Yhtenäinen rinnakkais-sarjasäädin voi vaihtaa tehoa rinnakkais- ja sarjaosan välillä. Kuviossa 6 havainnollistetaan rinnakkais-sarjasäätimen kytkentä linjaan.



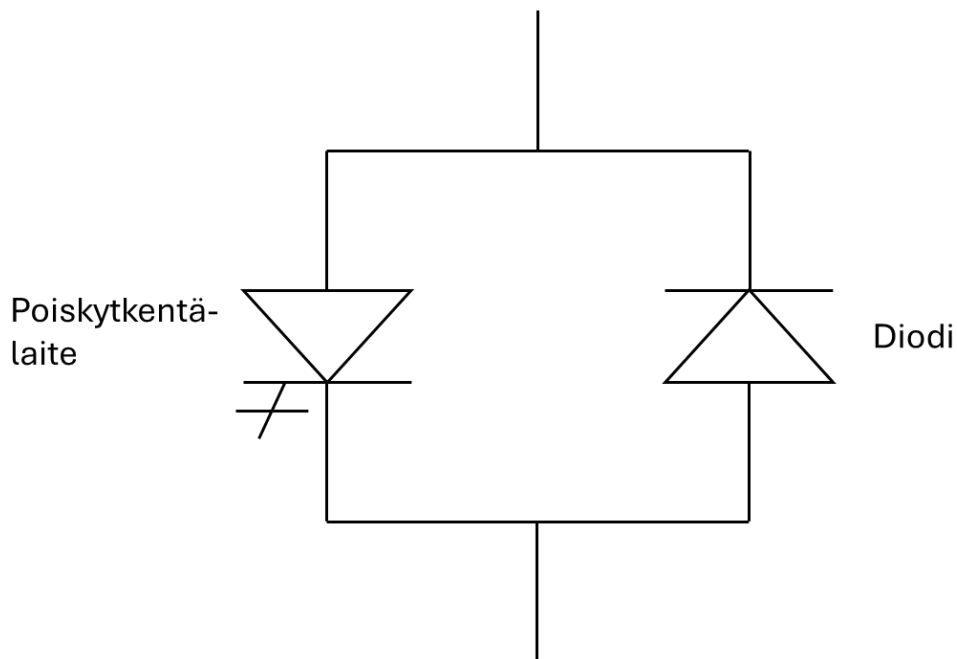
Kuvio 6. Yhtenäinen rinnakkais-sarjasäädin (perustuu Hingorani & Gyugyi, 2000, s. 15).

### 3.1.5 Jännitelähdemuunnin (VSC)

Voltage source converter tai suomeksi jännitelähdemuunninta käytetään yhdistämään HVAC- ja HVDC-järjestelmiä (ENTSO-E, i.a.-b). Ne käyttävät tehoelektroniikkaan sopivia komponentteja, kuten IGBT-transistoreja (Insulated Gate Bipolar Transistor). Jännitelähdemuuntimet ovat itsekommutoivia laitteita. Tasajännite on aina saman napainen ja tehonvaihto tapahtuu vaihtamalla tasavirran napaisuutta (Hingorani & Gyugyi, 2000, s. 67–68). Jännitelähdemuuntimessa tasavirta virtaa kumpaankin suuntaan, joten muuntimen venttiilien tulee olla kaksisuuntaisia. Koska tasajännitteen napaisuus ei vaihdu, kytkinlaitteiden jännitteenkääntökykyä ei tarvita. Jännitelähdemuunnin ei tarvitse ulkoista vaihtosähköverkkoa virran kulkusuunnan määrittelyyn (ENTSO-E, i.a.-b).

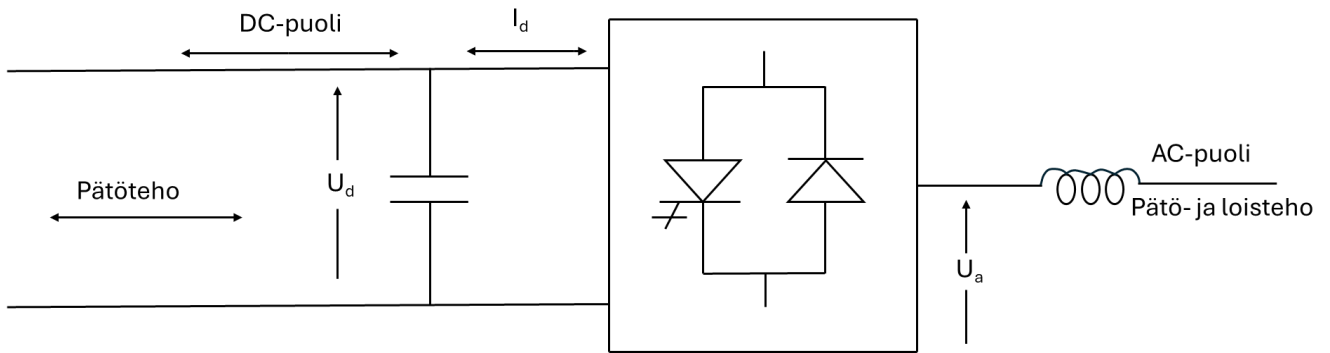
Laitteilla, kuten IGBT-transistorilla (Insulated Gate Bipolar Transistor), GTO-tyristorilla (Gate Turn-Off Thyristor) ja MTO-tyristorilla (MOS Turn-Off Thyristor) sekä vastaavilla

laitteilla on sekä päälle- että poiskytkentäominaisuudet (Hingorani & Gyugyi, 2000, s. 67). Tyristoripohjaiset muuntimet, joilla ei ole poiskytkentäominaisuutta voivat olla vain virtalähdemuuntimia, kun taas laitteet, joilla on poiskytkentäominaisuus voivat olla molempia, jännite- tai virtalähdemuuntimia. Kuvio 7 voidaan havaita jännitelähdemuuntimen venttiiliin olevan epäsymmetrinen.



Kuvio 7. Peruste jännitelähdemuuntimen venttiilille (perustuu Hingorani & Gyugyi, 2000, s. 68).

Kuviossa 8 on kuvattu jännitelähdemuuntimen perustoiminta (Hingorani & Gyugyi, 2000, s. 69). Tasavirtapuolen jännite on yksisuuntainen ja tuettu kondensaattorilla. Pystyäkseen käsittelemään jatkuvaa lataus- tai purkausvirtaa ilman että tasajännitteessä ilmenee suuria muutoksia, on kondensaattorin oltava riittävän suuri.



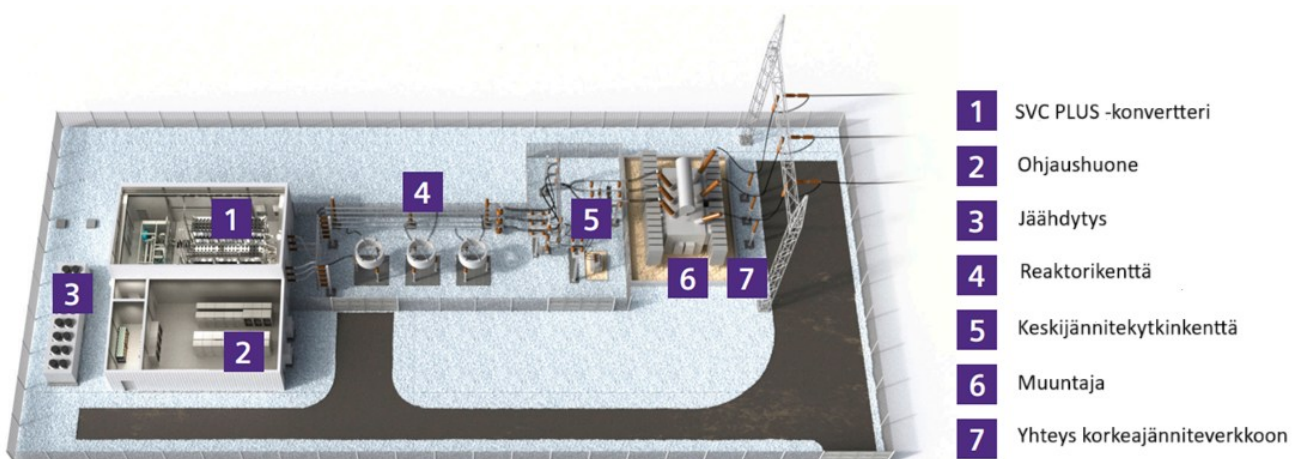
Kuvio 8. Jännitelähdemuuntimen perustoiminta (perustuu Hingorani & Gyugyi, 2000, s. 68).

Tasavirta voi kulkea kumpaankin suuntaan ja se voi vaihtaa tasasähkötehoa tasasähköjärjestelmän kanssa molempiin suuntiin (Hingorani & Gyugyi, 2000, s. 69). Kuviossa 8 vaihtovirtapuolella kuvataan tuotettua vaihtojännitettä, joka kytketään vaihtovirtajärjestelmään. Vaihtojännitelähteen sisäinen impedanssi on alhainen, joten sarjainduktiivinen liitäntä on erittäin tärkeä, ettei tasavirtapuolen kondensaattori oikosulkeudu ja purkaudu nopeasti esimerkiksi siirtojohtoon. Tässä tapauksessa on käytetty kelaa, mutta myös muuntajan käyttö on mahdollista.

Periaatteessa jännitelähdemuunnin muuttaa tasavirran vaihtovirraksi ja sillä voidaan ohjata lähtöjännitteen vaihekulmaa ja taajuutta (Hingorani & Gyugyi, 2000, s. 67, 69). Jännitelähdemuuntimiin perustuviin säätimiin kuuluu esimerkiksi staattinen synkronikompensaattori (STATCOM) ja staattinen synkronisarjakompensaattori (SSSC).

## 4 STATCOM

STATCOM eli Static synchronous compensator, tai suomeksi staattinen synkronikompensointilaite, on yksi tärkeimmistä FACTS-säätimistä (Hingorani & Gyugyi, 2000, s. 18). Sana ”staattinen” tarkoittaa laitetta, joka ei pyöri tai tuota pyörimisen aiheuttamaa mekaanista ääntä toimiessaan (ScienceDirect, i.a.). STATCOM tarjoaa verkkoon muun muassa loistehokompensointia, parempaa jännitestabiiliutta, aktiivista harmonista suodatusta ja sähkönlaadun parantamista. Sen tyypillisiä käyttökohteita ovat sähkönsiirto ja -jakelu, teollisuuden sähköverkot, valokaariuunit ja muut järjestelmät, joissa hyvä jännitestabiilius ja sähkönlaatu ovat tärkeitä (ENTSO-E, i.a.-a). STATCOMin kyky ylläpitää loisvirtaa tekee siitä ylivoimaisen alijännitetilanteissa (Padiyar, 2007, s. 173). Kuviossa 9 voidaan havaita, että STATCOMin ja verkon välillä on useita laitteita.



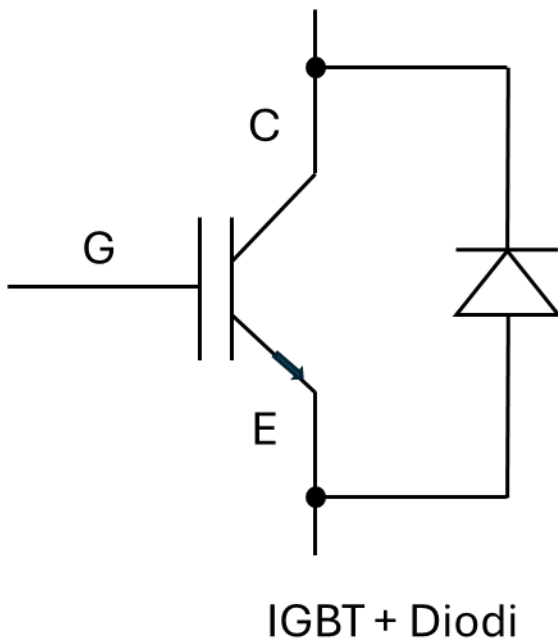
Kuvio 9. Yleiskuva Siemens Energyn STATCOM-järjestelmästä (muokattu Siemens Energy, 2023, s. 25).

### 4.1 Toimintaperiaate

Tyypillisiä STATCOM-järjestelmän komponentteja on muuntaja, joka laskee jännitteen STATCOMin nimellisjännitteeseen, vaihtovirtakatkaisijat, kytkentäreaktorit, kolme muunninvartta, jotka on kytketty kolmioon ja jäähdytysjärjestelmä (ENTSO-E, i.a.-a).

STATCOMissa on itsekommutoiva siltarakenne, joka koostuu IGBT (Insulated Gate Bipolar Transistor) -puolijohdekomponenteista (Elovaara & Haarla, 2011, s. 339). Tätä varten

tarvitaan myös tasasähköpiiri. STATCOMin toiminta perustuu puolijohdekomponenttien syytyksen ja sammutuksen rytmittämiseen halutulla tavalla. Tämä antaa STATCOMille kyvyn luoda loistehoa verkkoon tai kuluttaa sitä verkosta, mikä puolestaan mahdollistaa jännitteen suuruuden muuttamisen. Kuvio 10 havaitaan, että STATCOM käyttää eristyshi-laista bipolaaritransistoria rinnankytketyn diodin kanssa.



Kuvio 10. IGBT ja rinnankytketty diodi (perustuu ElectronicsTutorial, i.a.).

Säätämällä STATCOMin syöttämän jännitteen  $E$  amplitudia suhteessa verkon jännitteen  $U_V$  amplitudiin, voidaan ohjata loistehoa (Hingorani & Gyugyi, 2000, s. 167–168). Kun jännite  $E$  nostetaan yli jännitteen  $U_V$ , tuottaa STATCOM tällöin loistehoa verkkoon. Vastakkaisesti, jos jännite  $E$  lasketaan alle jännitteen  $U_V$ , STATCOM kuluttaa loistehoa verkosta. Jos STATCOMin syöttämä jännite ja verkon jännite ovat suhteessa yhtä suuret, on loistehon vaihto tällöin nolla.

Muuntajan yhden vaiheen läpi kulkeva loisvirta  $I_Q$  voidaan laskea kaavalla (3) (Hingorani & Gyugyi, 2000, s. 167).

$$I_Q = \frac{U_V - E}{X} \quad (3)$$

missä

- $I_Q$  on yhden vaiheen loisvirta
- $E$  on STATCOMIN syöttämä jännite
- $U_V$  on verkon vaihejännite
- $X$  on järjestelmän kokonaisreaktanssi

Vastaavasti järjestelmän tuottama loisteho  $Q$  voidaan laskea kaavalla (4) (Hingorani & Gyugyi, 2000, s. 167).

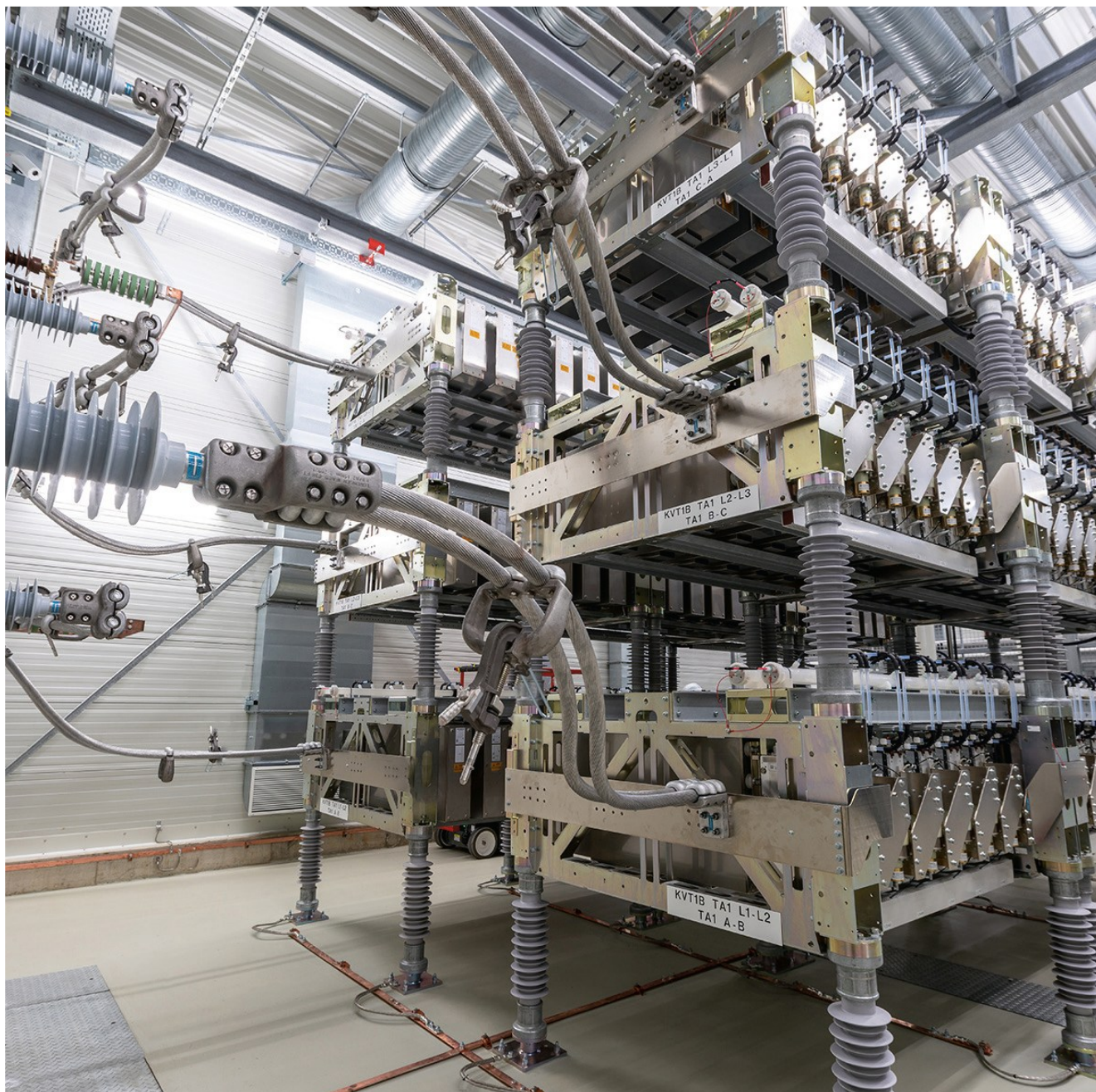
$$Q = \frac{1 - \frac{E}{U_V}}{X} U_V^2 \quad (4)$$

missä

- $Q$  on järjestelmän tuottama loisteho
- $E$  on STATCOMIN syöttämä jännite
- $U_V$  on verkon vaihejännite
- $X$  on järjestelmän kokonaisreaktanssi

STATCOMin kuluttaessa tai tuottaessa loistehoa, ottaa järjestelmä verkosta pienen määrän pätötehoa mekaanisten ja sähköisten häviöiden kattamiseksi (Hingorani & Gyugyi, 2000, s. 170). Muuntimen puolijohdekytkimien häviöt kuluttaisivat tasavirtakondensaattorin varastoidun sähköenergian. Muuntimen lähtöjännitteitä jätättämällä pienellä kulmalla vaihtovirtajärjestelmään verrattuna, saa muunnin pienen määrän pätötehoa vaihtovirtajärjestelmästä korvaamaan puolijohdekytkimien häviöt ja pitämään kondensaattorin jännitteen halutulla tasolla. Kondensaattorin tehtävä järjestelmässä on tärkeä energiatasapainon saavuttamiseksi tulon ja lähdön välillä loistehonsyötön dynaamisten muutosten aikana.

STATCOMin tehomuuntimet nähdään sinimuotoisena, synkronisena jännitelähteenä, jota ulkoinen ohjaus (STATCOM-järjestelmä) ohjaa referenssisignaalien avulla (Hingorani & Gyugyi, 2000, s. 171). Sisäinen valvonta käyttää tehokytkimiä tuottaakseen lähtöjännitteen aaltomuodon, jonka suuruus ja vaihekulma ovat vaaditun suuruiset ja synkroniset vaihtovirtajärjestelmän kanssa. Kuvassa 1 näkyy Siemens Energyn STATCOM, SVC PLUS.

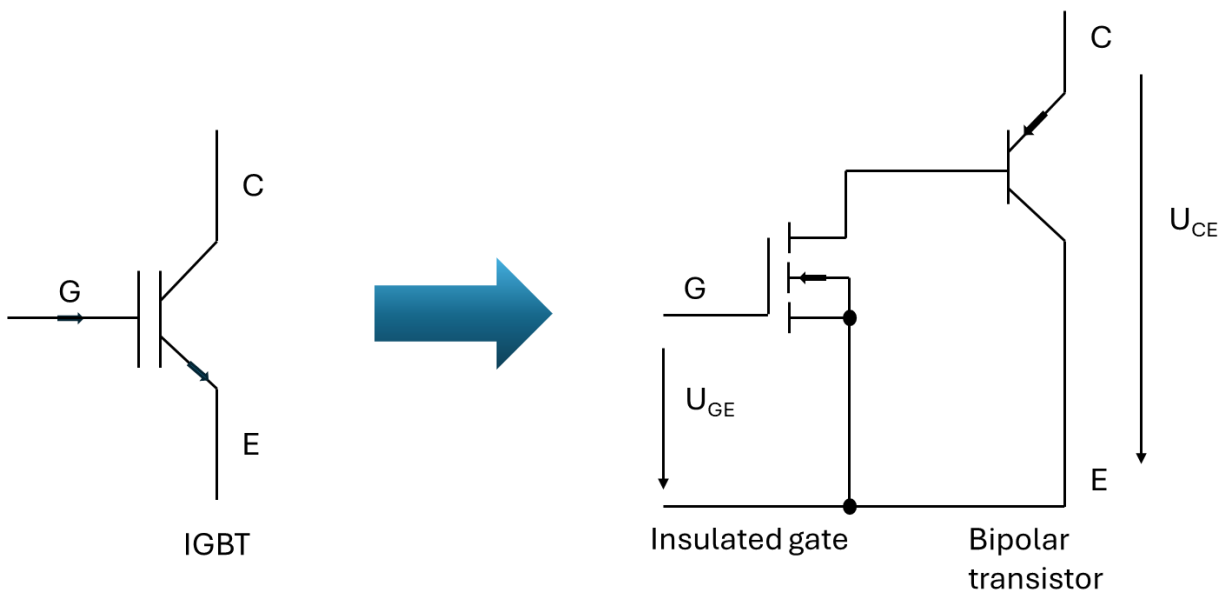


Kuva 1. SVC PLUS -konvertteri (Siemens Energy, 2023, s. 24).

Määrittääkseen muuntimen kytkimien päälle- ja poiskytkentäajat sisäinen ohjaus laskee halutun lähtöjännitteen ja vaihekulman STATCOM-järjestelmän antamasta loisivirran arvosta ja tuottaa joukon ajoitusaaltomuotoja (Hingorani & Gyugyi, 2000, s. 171).

## 4.2 IGBT (Insulated Gate Bipolar Transistor)

Insulated Gate Bipolar Transistor tai suomeksi eristyshilainen bipolaaritransistori on yhdistelmä kahdesta yleisestä transistorityypistä, Bipolar Junction Transistorista (BJT) ja Field Effect Transistorista (MOSFET) (ElectronicsTutorial, i.a.). IGBT yhdistää näiden kahden transistorityypin parhaat puolet tuottaakseen yhden, erilaisen transistorikytkentälaitteen, joka on MOSFETin tavoin jänniteohjattu, mutta omaa bipolaarisen transistorin kytkentä- ja johtavuusominaisuudet. Kuviossa 11 havainnollistetaan, miten IGBT rakentuu.



Kuvio 11. Insulated Gate Bipolar Transistor (perustuu Schulz, 2019, s. 3).

IGBT-transistorin suurimmat edut verrattuna muihin transistorilaitteisiin ovat sen nopea kytkentänopeus, helppokäyttöisyys, korkea jännitteen sietokyky, alhainen vastus ON-tilassa ja olematon portinohjausvirta (ElectronicsTutorial i.a.). Nämä ominaisuudet tekevät IGBT-transistorista erinomaisen laitteen järjestelmiin, jotka toimivat korkealla jännitteellä ja vaativat nopeaa reagointia.

IGBT on yksisuuntainen jänniteohjattu laite, se tarvitsee portilleen vain pienen jännitteen, että johtuminen laitteen läpi säilyy (ElectronicsTutorial, i.a.). Portti kytketään ON-tilaan syöttämällä sille positiivinen jännite. Kytkentä OFF-tilaan tapahtuu säätämällä porttijännite nolaksi tai negatiiviseksi. Yksisuuntaisuudella tarkoitetaan sitä, että IGBT voi kytkeä virtaa vain eteenpäin, kollektorista emitteriin.

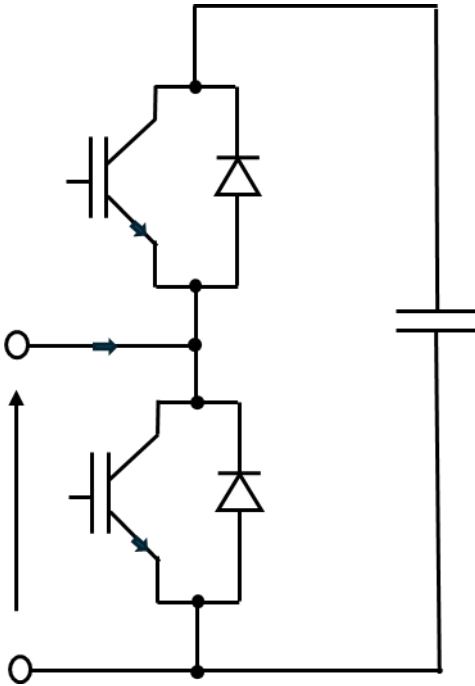
### 4.3 MMC (Modular Multilevel Converter)

Modular Multilevel Converter tai suomeksi modulaarinen monitasomuunnin koostuu useista sarjaan kytketyistä alamoduuleista (Siemens Energy, 2023, s. 18–19). Jokainen alamoduuli koostuu sen ytimessä olevista IGBT-transistoreista, jotka ovat erikseen ohjattavissa. Kuvassa 2 on Siemens Energyn tehomoduli.

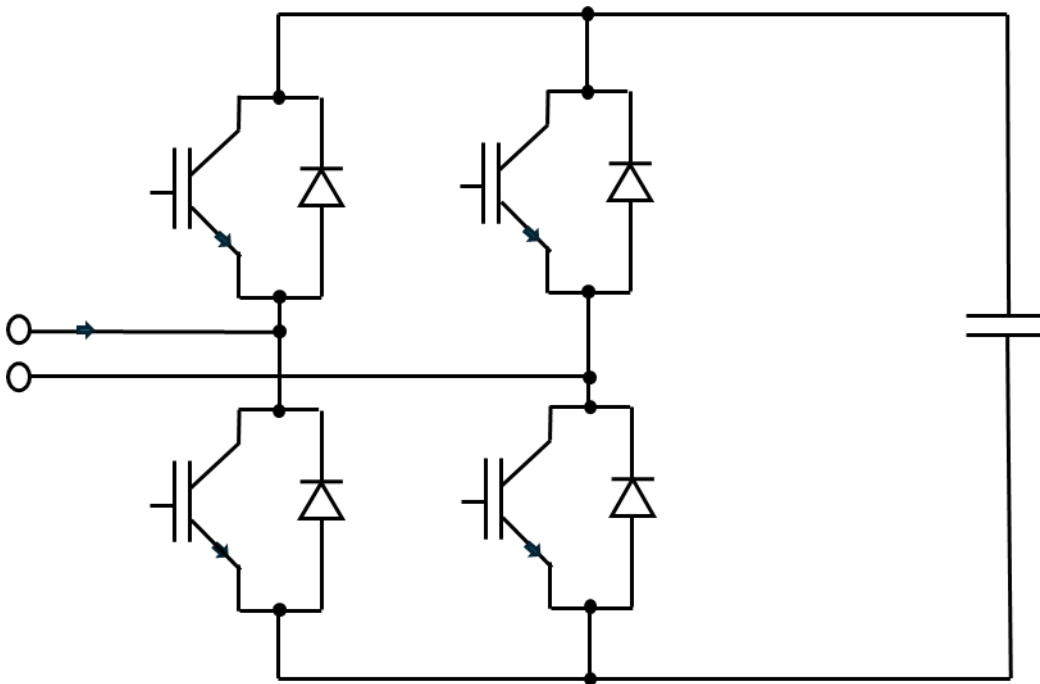


Kuva 2. Siemens Energyn tehomoduli (Siemens Energy, 2023, s. 18).

Täysisiltakytketty alamoduuli pystyy luomaan pienen jänniteaskeleen ja niitä ohjataan yksi kerrallaan siten, että saadaan aikaan sinimuotoisen AC-lähtöjännitteen aaltomuodot (Perez ym., 2021). Lähtövirtaa on mahdollista muuttaa lineaarisesti ja tasaisesti koko toiminta-alueella. Yleisimmin alamoduulien toiminta perustuu puoli- tai täysisiltakytkentään, jotka esitetään kuvioissa 12 ja 13.



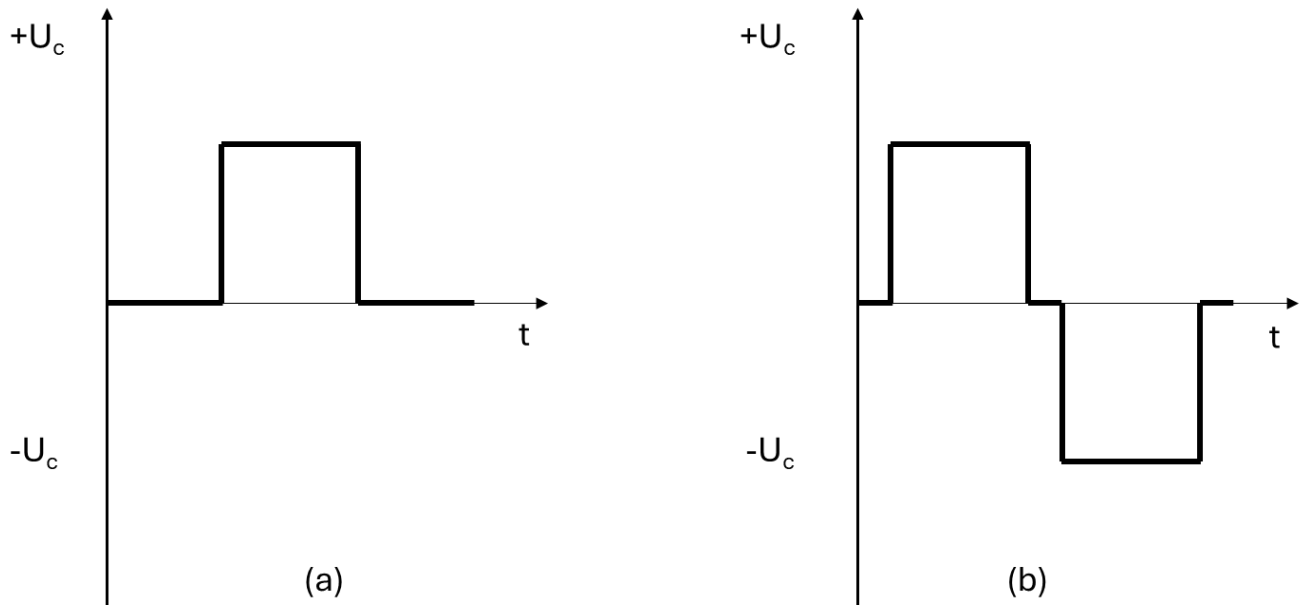
Kuvio 12. IGBT-transistoreista koostuva puolisolta (perustuu Perez ym., 2021).



Kuvio 13. IGBT-transistoreista muodostuva täyisolta (perustuu Perez ym., 2021).

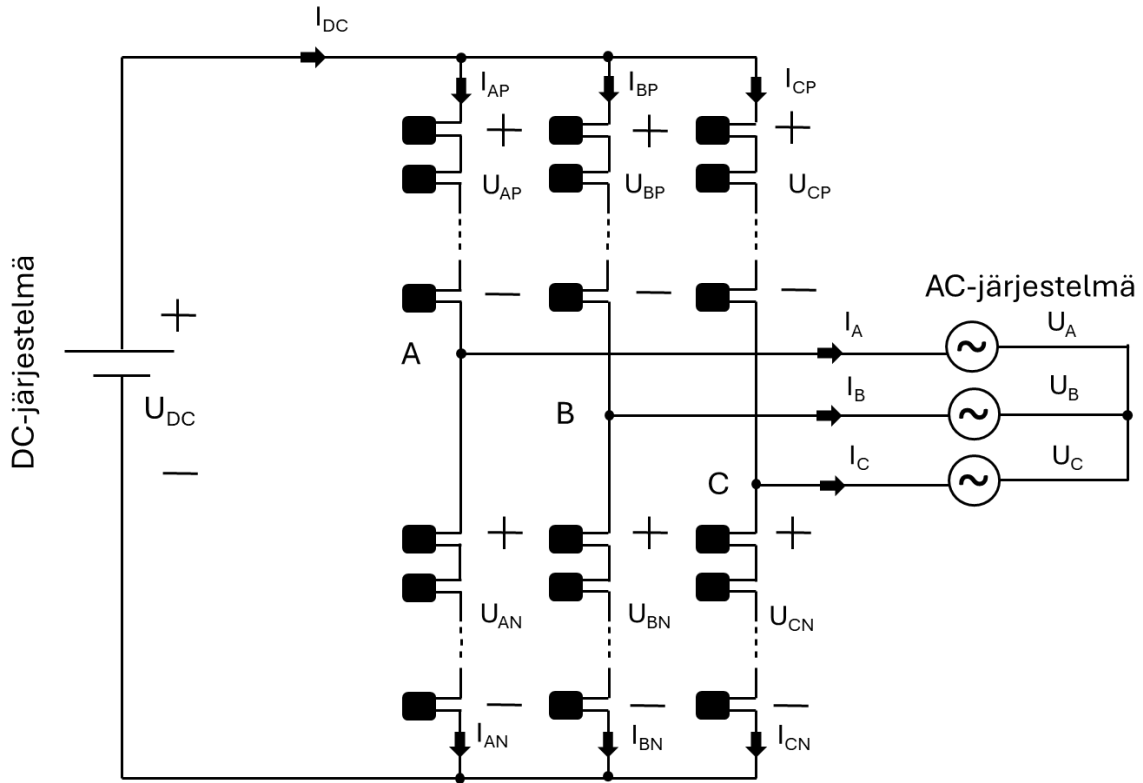
Puolisillalla on kaksi mahdollista kytkentätilaa: ohitus ja lisäys (Sharifabadi ym., 2016, s. 24). Ohitustilassa venttiilissä oleva kytkin, joka on kytketty rinnan ulkoisen liittimen kanssa, on johtava, ja tällöin liittimen jännite on nolla. Lisäystilassa venttiili, joka on

sarjassa alamoduulin kondensaattorin kanssa johtaa jolloin jännite päälaitteessa on yhtä suuri kuin kondensaattorin jännite. Toisin kuin puolisolilla, täysisilto pystyy luomaan kaksinapaisen jännitteen. Kuviossa 14 on kuvattuna yhden alamoduulin tuottama jännite.



Kuvio 14. Yhden alamoduulin tuottaman jännite a) puolisolilla ja b) täysisiltoilla (perustuu Sharifabadi ym., 2016, s. 24).

Sarjaan kytketyt alamoduulit muodostavat haaran ja kaksi haaraa muodostavat varren eli vaiheen (Perez ym., 2021). Korkeajännitejärjestelmässä alamoduuleja voi olla useita satoja yhtä haaraa kohti. Vaihtosähköjärjestelmä on kytketty vaiheiden keskipisteeseen haarojen väliin, kun taas tasasähkö on kytketty vaiheiden ylä- ja alapäätteisiin. Jokainen varsi tuottaa päihinsä jännitteen, joka yhdessä tasajännitteen ja vaihtovirtajärjestelmän kanssa tuottaa vaaditut AC- ja DC-virrat. Kuviossa 15 on kuvattu modulaarisen monitasomuuntimen toimintaperiaate kolmivaiheisena.



Kuvio 15. MMC-toimintaperiaate kolmivaiheisena (perustuu Perez ym., 2021).

## **5 STATCOM-RAKENTAMISEN HAASTEET VERRATTUNA KYTKINASEMARAKENTAMISEEN**

Tämä luku perustuu kahteen asiantuntijahaastatteluun. Haastatteluissa tarkoitus oli lähestyä ja kertoa aiheesta käytännönläheisesti. Luvun tarkoitus on löytää eriävyyksiä kahden eri laitteiston rakentamisesta.

### **5.1 Työmaapäällikön näkökulmasta**

Kytkinasemarakentamisen ja STATCOM-rakentamisen erot työmaalla liittyvät lähinnä asennettavaan tekniikkaan (Linnanen, 2025). Uuden tekniikan asentaminen vaatii erilaisia menetelmiä asennusvaiheessa, sekä perinpohjaista perehtymistä asennusohjeisiin sekä työmaapäälliköltä että asennusporukalta. Tärkeimmät STATCOM-järjestelmän osat asennetaan sisätiloihin, mikä vähentää ulkona tehtyä työtä. Tämä johtaa suoraan siihen, että esimerkiksi sääolosuhteiden huomioon ottaminen ei ole niin tärkeässä osassa kuin kytkinasemalla. Kytkinasemilla tehdään myös usein töitä jännitteiden lähellä, mikä lisää työturvallisuusriskiä.

#### **5.1.1 Työturvallisuus**

Perehdytyksellä varmistetaan, että työntekijä ymmärtää ja hallitsee turvallisuusasiat esimerkiksi tarvittavat suojavarusteet, mahdolliset jännitteiset alueet ja työkoneiden kulkureitit (Linnanen, 2025). Perehdytyksen jälkeen jokaisen työntekijän tulisi tietää, miten kyseessä olevalla työmaalla pystytään toimimaan turvallisesti. Perehdytyksen aikana myös selvitetään työntekijöiden pätevyudet, työturvallisuuskortti, ensiapukortti sekä sähkötyöturvallisuus sellaisilta henkilöiltä, jotka tekevät sähkötöitä.

Kaikkien työvälineiden pitää olla tarkastettuja, osittain niiltä vaaditaan myös tarkastuspöytäkirja/sertifikaatti (Linnanen, 2025). Valjaista, ketjuista, ketjutaljoista, nostoliinoista ja muista tarvikkeista, joiden varaan tehdään nostoja, tulee olla näyttää vuoden sisällä tehty tarkastussertifikaatti. Työkoneen saapuessa työmaalle tulee sille tehdä työmaalletulotarkastus, tällä varmistetaan, ettei kone aiheuta mahdollisella hajoamisellaan vaaraa kuljettajalle, sivullisille tai sähköaseman laitteistolle. Työkoneen kuljettajan tulee tehdä päivittäinen

tarkastus ennen töiden aloittamista, sekä viikoittain täyttää koneen viikkotarkastuslomake, jossa käydään läpi koneen osien ehjyys. Nostureille tulee tehdä samat edellä mainitut tarkastukset, mutta niiden lisäksi jokaisesta pystytyksestä tulee tehdä pystytystarkastus.

Sääolosuhteet tuovat oman haasteensa sähköasemarakentamiseen (Linnanen, 2025.). Kytkinasemarakentamisessa sääolosuhteet ovat isommassa roolissa kuin STATCOM-rakentamisessa, sillä ulkotöitä tehdään enemmän. Talvella työturvallisuus korostuu liukkauden ja kylmyyden vuoksi. Lumien auraamisella ja säännöllisellä liukkauden poistolla vähennetään työntekijöiden kaatumisen riskiä. Talvella jokaisen työntekijän tulee itse pitää huoli, ettei kylmyys aiheuta paleltumia. Talven alkaessa on hyvä pitää työntekijöille turvavartti, jossa käydään läpi asioita, jotka tulee huomioida ilman kylmetessä. Kesällä suurimmat riskit ovat kuumuus ja kyykäärmeet. Myös kesän alkaessa on hyvä pitää turvavartti, että työntekijät osaavat ottaa nämä riskit huomioon. Ukkossäässä sähköaseman ulkokennällä ei saa tehdä töitä.

Työturvallisuutta valvotaan ja varmistetaan jatkuvalla valvonnalla (Linnanen, 2025). Vaikka tarkastelu on jatkuvaa, viikoittaisten MVR-mittauksien (turvallisuustason arviointimenetelmä) aikana tarkastellaan tarkemmin mahdollisia vaarapaikkoja. Vaarapaikkoja voivat olla esimerkiksi kompastumisvaaran aiheuttavat materiaalit ja roskat kulkuteillä

### **5.1.2 Toteutus**

Sekä kytkinasemarakentamisessa että STATCOM-rakentamisessa on paljon mekaanista-asentamista (Linnanen, 2025). Laitteet ovat kuitenkin täysin erilaisia, joten STATCOM-rakentamisessa työohjeisiin tulee perehtyä hyvin sen ensikertaisuuden vuoksi. Työmaapäällikön tulee pitää huoli siitä, että myös työntekijät perehtyvät asennusohjeisiin ennen työn aloittamista. Ulkokytkinlaitosta rakentaessa erillistä asennusvalvojaa ei välttämättä ole, mutta kaasueristettyä kytkinasemaa rakentaessa asennusvalvoja on aina. Myös STATCOM-rakentamisessa on asennusvalvoja.

Toteutus saadaan vastaamaan suunnittelua seuraamalla kuvia ja jatkuvalla asennusvalvonnalla (Linnanen, 2025). Urakoitsijoille on hyvä antaa myös kuvia malliasennuksista ja heidän on suoritettava malliasennus, joka tarkastetaan. Pätevä urakoitsija osaa tehdä

asennukset asiaan kuuluvalla tavalla. Käyttöönottajat hoitavat toisiojärjestelmän oikeellisuuden tarkastamisen ja tekevät tarvittavat muutokset sekä merkitsevät ne kuviin punakynällä. Mahdollisista työmaalla tulleista muutoksista tulee ilmoittaa suunnitteluun, että kuvat ovat ajan tasalla. Työmaan loppuessa suunnittelu tulee tarkastamaan kuvien ja toteutuksen yhtenäisyyden.

### **5.1.3 Materiaalin toimitus**

Materiaalin saapuminen työmaalle on oleellinen osa rakentamista (Linnanen, 2025). Tehneiden ja tavarantoimittajien kanssa on hyvä pitää jatkuvaa yhteyttä, jotta pysytään ajan tasalla, milloin tavaraa on tulossa. Mahdolliset viivästykset tai aikaistumiset voivat aiheuttaa vaikeuksia varsinkin isompien lähetysten kanssa, joiden purkamiseen tarvitaan nostokalustoa. Materiaalin saapuessa työmaalle tulee sille tehdä vastaanottotarkastus, jossa tarkistetaan, että materiaali on lähetysluettelon mukaista. Tarkastuksessa tarkastetaan materiaalin oikeellisuus, ehjyys ja saapunut määrä.

### **5.1.4 Aikataulu**

Aikataulussa pysyminen vaatii useiden asioiden toteutuksen onnistumista (Linnanen, 2025). Sääolosuhteet ovat yksi syy, miksi aikatauluvaikeuksia voi tulla. Tuulinen sää ja ukkonen seisauttavat ulkona tapahtuvan työn ja talvella työnteko on hitaampaa. Kytkinasemille asennettavia katkaisijoita ei voi asentaa vesisateessa.

Sähköasemalaitteiden asennus alkaa vasta, kun tarvittavat rakennukset ja perustukset ovat valmiit, joten rakennustöiden myöhästyessä koko sähköasemaprojektin aloitus viivästyy (Linnanen, 2025). Myös suunnitelmien myöhästyminen tai huono luettavuus aiheuttaa viivästyksiä. Edellä mainittuja viivästyksiä voidaan kieriä tekemällä ylitöitä tarpeen mukaan ja hankkimalla kokeneet työntekijät.

Aikataulullisesti tavarantoimituksen myöhästyminen on suuri riski, mutta myös väärän tavaran saapuminen työmaalle aiheuttaa paljon ylimääräistä työtä ja töiden seisahtumista (Linnanen, 2025). Viallinen tai huonosti valmistettu materiaali, jota ei voida käyttää asennuksissa, kuuluu samaan kategoriaan.

Aikatauluriskien tunnistaminen ja hallitseminen tapahtuu kokemuspohjaisesti (Linnanen, 2025). Tehdyistä virheistä opitaan ennakoimaan mahdolliset viivästykset. Urakoitsijoille tulee tehdä sopimukseen sakkopykälät, jotta aikataulutavoitteet ovat selvät, eikä niistä laistettaisi. Jos aikataulu on tiukka, jo hyväksi ja nopeaksi todetut urakoitsijat ovat parempi vaihtoehto kuin uusi, jonka osaamisesta ja nopeudesta ei ole tietoa. Urakoitsijan työntekijöiden vaihtuvuuden tulisi olla vähäistä.

## **5.2 Projektipäällikön näkökulmasta**

STATCOM- ja kytkinasemaprojektit ovat erilaisia, mutta projektipäällikön näkökulmasta työ on kuitenkin hyvin samanlaista molemmissa (Höytiä, 2025). Hyvä kommunikaatio eri työryhmien välillä on välttämättömyys riskien hallinnalle ja sujuvalle projektille.

### **5.2.1 Hankintaprosessi**

Vaikka työvaiheet ovat suurelta osin samanlaisia, projekti itsessään on erilainen kuin kytkinasemaprojekti (Höytiä, 2025). Teknologia on uutta Suomessa, joten tarjousvaiheessa tarvitaan Saksan Siemens Energyn tukea. Haasteita voi ilmetä esimerkiksi silloin, jos tilaajan spesifikaatiot jäävät huomioimatta.

Sähköasemaurakka jakautuu eri toimijoille, ja STATCOM-rakennus on erillinen kokonaisuus (Höytiä, 2025). Urakkarajojen jakaminen ei itsessään ole uutta, mutta STATCOM-rakentamisessa on useita eri kokonaisuuksia, joihin yritetään löytää omat toimijat. Käyttöönotto ja koestus poikkeavat kytkinasemarakentamisesta. STATCOM-järjestelmän koestajat saapuvat Saksasta, ja kytkinasemilla käytössä on Siemens Energy Oy:n omat koestusasiantuntijat. Siemens Energyn Kiinan tehtaalta saapuvat muuntajat tuovat pienen haasteen hankintavaiheeseen.

### **5.2.2 Teknisten vaatimusten täytyminen**

Teknisten vaatimusten täyttymisen varmistaminen toteutuu eri projekteissa usein samalla tavalla (Höytiä, 2025). Tilaaja on luonut yleiset spesifikaatiot suojaus- ja ohjausjärjestelmiin, joiden perusteella Siemens Energy Saksassa sijaitsevan suunnittelutiimin ja tehtaan

tulisi suunnitella ja valmistaa laitteisto. Projektiryhmät Saksassa ja Suomessa käyvät suunnitelmia yhdessä läpi ja vertailevat niitä tilaajan spesifikaatioihin. Mahdollisista epäkohdista annetaan tehtaalle kommentit asioista, jotka tulisi korjata. Kun tarkastusryhmä toteaa suunnitelmien olevan kunnossa, ne lähetetään tilaajan hyväksyttäväksi. Toisiopuolen tehdasteissa on mukana myös tilaaja varmistamassa, että suojaus- ja ohjauskaapit on valmistettu hyväksytyjen suunnitelmien mukaan.

### 5.2.3 Riskit

Projektipäällikön näkökulmasta projektien riskit ovat usein rahallisia ja aikataulullisia (Höytiä, 2025). Niin STATCOM- kuin kytkinasemaprojektien mahdolliset riskit ja haasteet pyritään tunnistamaan sekä mietitään mahdollisuuksia minimoida, tai jopa välttää riski. Jos riskin minimointi lasketaan kalliimmaksi kuin itse riski, voidaan päättää hyväksyä riski ja sen vaikutukset. Tavoitteena on havaita riskit ajoissa, tehdä töitä niiden pienentämiseksi tai jopa välttää ne kokonaan. Tämä vaatii jatkuvaa seurantaa ja aktiivista riskienhallintaa koko projektin ajan.

### 5.2.4 Viestintä

Kommunikaatio eri työryhmien välillä on erittäin tärkeää projektin sujuvan etenemisen kannalta (Höytiä, 2025). Työelämän kommunikaatio on eräänlaista sosiaalisen ympäristön lukemista. Ihmiset ovat erilaisia, joten viestintätyyli, joka toimii yhden yksilön kanssa ei välttämättä toimi toisen kanssa kommunikoidessa. Haasteita tähän teettää myös kielimuuri ja kulttuurierot.

Sisäisessä viestinnässä sähköposti ei ole chatsovellus, chattailun pitäisi tapahtua sille tarkoitettun sovelluksen kautta, ettei sähköposti täyttyisi (Höytiä, 2025). Ainoastaan viralliset asiat, kuten kuvat ja dokumentit, lähetetään sähköpostiin. Palaverit verkossa tai kasvotusten ovat huomattavasti parempi tapa sopia asioista, kuin mikään muu. Kasvotusten jutellessa asiat tulevat usein paremmin ilmi. Palavereista tehdään muistio, joka lähetetään paikallaolijoille ja muille projektihenkilöille.

## 6 TYÖOHJE

Alkuperäinen ajatus oli luoda Siemens Energy Oy:lle työohje, jonka avulla kokemattomallakin työmaapäälliköllä on edellytykset pienellä perehtymisellä vetää STATCOM-työmaa sujuvasti. Vertailussa saatujen tulosten perusteella alkuperäinen ajatus STATCOM-rakentamisen työohjeesta vaihdettiin yleiseen työohjeeseen, jota on mahdollista käyttää jokaisella työmaalla.

Työohjeeseen kerättiin asiakirjoja ja ajankohtia, milloin niiden tulee olla valmiina. Lisäksi mietittiin asioita, joita työmaapäällikön tulee tehdä työmaan aikana.

## 7 TULOKSET

Tämän opinnäytetyön tavoitteena oli luoda työohje, mikä auttaa sähköpuolen työmaapäällikköä vetämään STATCOM-työmaan sujuvasti alusta loppuun ja vertailla STATCOM-rakentamista kytkinasemarakentamiseen. Vertailussa kävi ilmi, että työmaapäällikön näkökulmasta eroja ei eri ratkaisujen välillä ole paljoa. Suurimmaksi eroksi ilmeni ulkotiloissa tehtävän työn määrä. STATCOMia rakentaessa töitä tehdään enemmän sisätiloissa, mikä vähentää sääolosuhteiden aiheuttamia riskejä. Helpommaksi havaittiin luetella yhteneväisyyksiä kuin eroavaisuuksia. Vertaillusta saatujen tulosten pohjalta työohjeesta päätettiin tehdä yleinen työmaapäällikön työohje.

Työohjeeseen kerättiin asioita, joita työmaapäällikön tulee tehdä työmaan eri vaiheissa. Dokumenttien kohdalla kerrottiin, milloin niiden tulee olla valmiina. Työohjeeseen merkittiin myös erikseen, mitä tehtäviä tulisi tehdä päivittäin, viikoittain, kuukausittain tai jatkuvasti.

## 8 YHTEENVETO

Työn tavoitteena oli luoda työohje, jonka avulla sähköpuolen työmaapäällikkö pystyisi vetämään STATCOM-työmaan sujuvasti alusta loppuun. Työ alkoi perinteisen kytkinasemarakentamisen ja STATCOM-rakentamisen vertailulla, jonka perusteella lähdettiin työstämään työohjetta. Saatujen tulosten perusteella kuitenkin päädyttiin vaihtamaan STATCOM-työohje yleiseen ohjeeseen, johon kerättiin dokumentteja ja muita tehtäviä, jotka kuuluvat työmaapäällikön tehtäviin.

Työohjeessa on paljon asiaa ja varmasti jäi myös kohtia, joita tulisi lisätä ohjeeseen. Näitä kohtia tullaan lisäämään ohjeeseen sitä mukaa, kun puuttuvia asioita ilmenee. Myös mahdolliset lakimuutokset ja tilaajan vaatimusten muutokset tullaan muuttamaan työohjeeseen, niiden tapahtuessa.

## LÄHTEET

- Clemens, K. (31.7.2023). *Introduction to STATCOM systems*. EETech Group, LLC. <https://eepower.com/technical-articles/introduction-to-statcom-systems/#>
- Electrical 4 U. (15.6.2024). *Flexible AC transmission systems | FACTS*. Haettu 14.2.2025, <https://www.electrical4u.com/facts-on-facts-theory-and-applications/>
- ElectronicsTutorial. (i.a.). *Insulated gate bipolar transistor*. <https://www.electronicstutorials.ws/power/insulated-gate-bipolar-transistor.html>
- Elovaara, J., & Haarla, L. (2011). *Sähköverkot I: Järjestelmätekniikka ja sähköverkonlaskenta*. Gaudeamus / Otatieto.
- Elprocus. (i.a.). *Flexible AC transmission system: Need, definition & types*. <https://www.elprocus.com/flexible-ac-transmission-system-need-definition-types/>
- Energiateollisuus (ET). (i.a.). *Tuulivoima*. Haettu 29.12.2024, <https://energia.fi/energiatietoa/energiantuotanto/sahkontuotanto/tuulivoima/>
- ENTSO-E. (i.a.-a). *Static synchronous compensator (STATCOM)*. Haettu 20.3.2025, <https://www.entsoe.eu/Technopedia/techsheets/static-synchronous-compensator-statcom>
- ENTSO-E. (i.a.-b). *Voltage source converters*. Haettu 24.3.2025, <https://www.entsoe.eu/Technopedia/techsheets/voltage-source-converters>
- Fingrid. (i.a.-a). *Pohjoismaisen sähköjärjestelmän inertia*. Haettu 24.3.2025, <https://www.fingrid.fi/sahkomarkkinainformaatio/inertia/>
- Fingrid. (i.a.-b). *Käyttövarmuuden ylläpito*. Haettu 19.2.2025, <https://www.fingrid.fi/kantaverkko/sahkonsiirto/kayttovarmuuden-yllapito/>
- Fingrid. (1.11.2022). *Fingrid hakee ratkaisuja kantaverkon siirtokyvyn haasteisiin länsirannikolla* [tiedote]. <https://www.fingrid.fi/ajankohtaista/tiedotteet/2022/fingrid-hakee-ratkaisuja-kantaverkon-siirtokyvyn-haasteisiin-lansirannikolla/>
- Fingrid. (11.1.2024). *Uusi tekninen ratkaisu parantaa tuulivoimavaltaisen verkon käyttövarmuutta* [tiedote]. <https://www.fingrid.fi/ajankohtaista/tiedotteet/2024/uusi-tekninen-ratkaisu-parantaa-tuulivoimavaltaisen-verkon-kayttovarmuutta/>
- Hingorani, N. G., & Gyugyi, L. (2000). *Understanding FACTS: Concepts and technology of flexible AC transmission systems*. IEEE Press Marketing.

- Höytiä, P. (projektipäällikkö, Siemens Energy Oy). (24.3.2025). *Työmaiden haasteiden vertailu* [asiantuntijahaastattelu].
- Kauppalehti. (i.a.). Yrityshaku. Haettu 25.2.2025, <https://www.kauppalehti.fi/yritykset/yritys/3094936-4>
- Linnanen, M. (työmaapäällikkö, Siemens Energy Oy). (19.3.2025). *Työmaiden haasteiden vertailu* [asiantuntijahaastattelu].
- Padiyar, K.R. (2007). *FACTS controllers in power transmission and distribution*. New Age International (P), Publishers, [https://research.iaun.ac.ir/pd/bahador.fani/pdfs/UploadFile\\_6422.pdf](https://research.iaun.ac.ir/pd/bahador.fani/pdfs/UploadFile_6422.pdf)
- Perez, M. A., Ceballos, S., Konstantinou, G., Pou, J., & Aguilera, R. P. (2021). *Modular multilevel converters: Recent achievements and challenges*. IEEE, <https://doi.org/10.1109/OJIES.2021.3060791>
- Profinder. (i.a.). Siemens Energy Oy. Haettu 28.12.2024, <https://b2b.profinder.fi/haku/siemens-energy-oy/30949364>
- ScienceDirect. (i.a.). *Static synchronous compensators*. <https://www.sciencedirect.com/topics/engineering/static-synchronous-compensators>
- Schulz, M. (2019). *IGBT-basic know-how: IGBT: How does the insulated gate bipolar transistor work?* Infineon Technologies. [https://www.infineon.com/dgdl/Infineon-IGBT\\_basics\\_how\\_does\\_an\\_IGBT\\_work-AdditionalTechnicalInformation-v01\\_00-EN.pdf?fileId=5546d462700c0ae60170675ed665777f&da=t](https://www.infineon.com/dgdl/Infineon-IGBT_basics_how_does_an_IGBT_work-AdditionalTechnicalInformation-v01_00-EN.pdf?fileId=5546d462700c0ae60170675ed665777f&da=t) (vaatii kirjautumisen).
- Sharifabadi, K., Harnefors, L., Nee, H. P., Norrga, S., & Teodorescu, R. (2016). *Design, control, and application of modular multilevel converters for HVDC transmission systems*. Wiley & Sons, <https://doi.org/10.1002/9781118851555>
- Siemens. (i.a.). *Liiketoiminta-alueet*. Haettu 29.12.2024, <https://www.siemens.com/fi/fi/yhtio/siemens-suomessa-ja-baltiassa/liiketoiminta-alueet.html>
- Siemens Energy. (i.a.-a) *About us*. Haettu 29.12.2024, <https://www.siemens-energy.com/global/en/home/company/about.html>
- Siemens Energy. (i.a.-b). *Flexible AC transmission systems (FACTS)*. Haettu 12.2.2025, <https://www.siemens-energy.com/global/en/home/products-services/product-offerings/flexible-ac-transmission-systems.html>
- Siemens Energy. (7.5.2019a). *Siemens to build focused energy powerhouse and further boost performance* [tiedote]. <https://www.siemens-energy.com/global/en/home/press->

[releases/siemens-build-focused-energy-powerhouse-and-further-boost-performance.html](https://www.siemens-energy.com/global/en/home/press-releases/new-energy-company-to-be-called-siemens-energy.html)

Siemens Energy. (16.10.2019b). *New energy company to be called Siemens Energy* [tiedote]. <https://www.siemens-energy.com/global/en/home/press-releases/new-energy-company-to-be-called-siemens-energy.html>

Siemens Energy. (2023). *Grid stabilization*. Haettu 6.3.2025, [https://p3.aprimocdn.net/siemensenergy/b4fbea3c-a69a-4b6b-88d3-b1a300c0779d/2023\\_12\\_21\\_P1383-005\\_b\\_Grid\\_Stability\\_Digital\\_Final-pdf\\_Original%20file.pdf](https://p3.aprimocdn.net/siemensenergy/b4fbea3c-a69a-4b6b-88d3-b1a300c0779d/2023_12_21_P1383-005_b_Grid_Stability_Digital_Final-pdf_Original%20file.pdf)

Siemens Energy. (2024). *Company presentation*. Haettu 28.12.2024, <https://www.siemens-energy.com/global/en/home/company/about.html>

## **LIITTEET**

**Liite 1. Työmaapäällikön työohje (ei julkinen)**