

Antti Hallikainen

Maasähkön syöttöjärjestelmät satamissa

Metropolia Ammattikorkeakoulu

Insinööri (AMK)

Talotekniikka

Insinöörityö

15.5.2015

Tekijä(t) Otsikko	Antti Hallikainen Maasähkön syöttöjärjestelmät satamissa
Sivumäärä Aika	41 sivua + 2 liitettä 15.5.2015
Tutkinto	insinööri (AMK)
Tutkinto-ohjelma	talotekniikka
Suuntautumisvaihtoehto	sähköinen talotekniikka
Ohjaajat	yksikönpäällikkö Hannu Virkkunen lehtori Matti Sundgren
<p>Insinööriyön tarkoituksena oli perehtyä satamaan rakennettavien maasähkön syöttöjärjestelmien rakenteisiin sekä vaatimukseen standardin IEC/ISO/IEEE 80005-1 pohjalta. Työssä käydään läpi vuonna 2012 ilmestynyttä standardia syöttöjärjestelmien suunnittelun ja mitoituksen näkökulmasta.</p> <p>Työtä varten tutkittiin standardin lisäksi aiheeseen liittyviä julkaisuja, maasähkön käyttöä edistäviä direktiivejä ja asetuksia, tehtyjä tutkimuksia ja toteutettuja järjestelmäratkaisuja sekä tavattiin alalla toimivien valmistajien edustajia. Laadittujen ympäristöselvitysten ja toteutettujen syöttöjärjestelmien käytön seurantaraporttien pohjalta tarkasteltiin myös maasähkön etuja sekä vaikutuksia ympäristöön.</p> <p>Kerätyn aineiston sekä satamalta ja varustamoilta saatujen lähtötietojen pohjalta laadittiin esimerkkiratkaisu matkustajasataman laajennuksen yhteydessä kahdelle uudelle laituri-alueelle varattaville maasähkön syöttöjärjestelmille. Työssä laskettiin myös tietokoneavusteista mitoitusohjelmaa käyttäen standardin vaatimat oikosulkuvirrat syöttöjärjestelmän eri pisteissä.</p> <p>Standardin ja muun aineiston tutkimisen sekä niiden pohjalta laaditun esimerkkiratkaisun kautta aikaansaatu insinööriyö tarjoaa yleiskuvan maasähkön syöttöjärjestelmien vaatimuksista ja niiden suunnittelusta matkustajasataman aluesähköverkon suunnitteluhanketta varten.</p>	
Avainsanat	maasähkö, syöttöjärjestelmä, IEC/ISO/IEEE 80005-1

Author(s) Title	Antti Hallikainen On-shore power supply systems
Number of Pages Date	41 pages + 2 appendices 15 May 2015
Degree	Bachelor of Engineering
Degree Programme	Building Services Engineering
Specialisation option	Electrical Engineering for Building Services
Instructors	Hannu Virkkunen, Head of Department Matti Sundgren, Senior Lecturer
<p>The objective of this Bachelor's thesis was to introduce the requirements and topologies of on-shore power supply systems according to the standard IEC/ISO/IEEE 80005-1 released in 2012. In addition to the study of the standard, content was gathered by meeting representatives of the foremost actors on the market, studying relevant literature, existing systems, as well as directives and regulations. Moreover, environmental studies and follow-up reports of existing installations were surveyed for the benefits of the use of shore-side electricity.</p> <p>The information, together with information received from the port organization and ship owners, was used to create an introductory plan for an on-shore power supply system in a harbor with two quay areas to supply shore-side electricity. Furthermore, short-circuit calculations for the system were carried out by a computer-assisted dimensioning tool. In conclusion, the thesis offers a general view on the requirements and design principles of a standard on-shore power supply system and serves as an analysis to support the electrical design of a new harbor area.</p>	
Keywords	shore side electricity, on-shore power supply, IEC/ISO/IEEE 80005-1

Sisällys

Lyhenteet

1	Johdanto	1
2	Maasähkö	2
2.1	Vaikutukset ympäristöön	3
2.2	Maasähkön käytön edistäminen	5
2.2.1	Esitys maasähkön käytön edistämisestä Suomessa	7
2.2.2	Standardisointi	8
2.3	Maasähkön syöttömahdollisuudet satamissa	9
2.3.1	Göteborg	10
2.3.2	Suomen satamat	11
3	Maasähkön syöttöjärjestelmän standardinmukainen rakenne ja standardin vaatimukset	13
3.1	Taajuusmuuttajat	16
3.1.1	Hajautettu ratkaisu	18
3.1.2	Keskitetty ratkaisu	19
3.2	Muuntajat	20
3.3	Päämuuntamon keskijännitekojeisto	22
3.4	Maasähkömuuntamon keskijännitekojeisto	23
3.5	Liittymiskaapeli	24
3.6	Kaapelinkäsittelylaitteisto	25
3.7	Sataman sähköverkosta syötettävän maasähkön laatu	28
4	Järjestelmän suunnittelun lähtökohdat	29
5	Esimerkkisatama	30
5.1	Maasähköjärjestelmän rakenne	31
5.2	Kuormitusvirtojen tarkastelu	31
5.3	Järjestelmän oikosulkulaskelmat	33
5.3.1	Impedanssien määrittely	34
5.3.2	Tulokset	36

6	Yhteenveto	38
	Lähteet	40
	Liitteet	
	Liite 1. Esimerkkisataman maasähkön syöttöjärjestelmän rakenne	
	Liite 2. Esimerkkisataman maasähkön syöttöjärjestelmän oikosulkulaskelmat	

1 Johdanto

Merillä liikkuvat alukset tuottavat sisäisten järjestelmien ylläpitämiseen ja propulsiojärjestelmän tyypistä riippuen myös liikkumiseen tarvitsemansa sähköenergian alusten omilla sähköntuotantojärjestelmillä. Sähköntuotanto aluksilla on toteutettu konehuoneessa sijaitsevilla dieselmoottorikäyttöisillä generaattoreilla, joilla tuotettu sähkö vietään aluksen sähköjakeluverkon jakelupisteen kautta varsinaisille kulutuspiisteille. Aluksella sähköenergiaa käyttäviä järjestelmiä ovat muun muassa valaistus ja ilmanvaihto sekä dieselsähköisissä propulsiojärjestelmissä voimansiirrosta vastaava sähkömoottori. Dieselsähköisen voimansiirron lisäksi propulsiojärjestelmiä toteutetaan alustyyppistä riippuen myös dieselmekaanisina, jolloin aluksen potkureita ajetaan sähköntuotannosta erillisellä dieselmoottorilla.

Sähköenergiaa tarvitaan myös satamassaolon aikana normaalin toiminnan kannalta oleellisten järjestelmien ylläpitämistä varten sekä erilaisten purku- ja lastausoperaatioiden mahdollistamiseksi. Aluksen saapuessa satamaan ja sen kiinnittyttyä laituriin, liikkumiseen tarkoitettu koneisto voidaan sammuttaa ja käyttöön jäävien järjestelmien tarvitsema sähköenergia tuotetaan apukoneiden generaattoreilla.

Dieselmoottori-generaattorikäytöstä aiheutuu satamaan ja sen lähialueille hiilidioksidi-, rikkidioksidi- ja pienhiukkaspäästöjä sekä matalataajuisen melun myötä häiritsevää resonointia. Vaikutukset ympäristöön tulisi ottaa huomioon ja saada hallintaan erityisesti satamissa, jotka sijaitsevat lähellä kaupungin keskustaa sekä muita asutusalueita.

Tällä hetkellä aluksista aiheutuvia päästöjä pyritään vähentämään pääsääntöisesti neljällä eri tavalla: säätelemällä laivojen käyttämän polttoaineen rikkipitosuutta, tuomalla alusten tarvitsema sähköenergia sataman sähköverkosta, hyödyntämällä vaihtoehtoisia polttoaineratkaisuita, kuten nesteytettyä maakaasua dieselin sijaan, sekä asentamalla aluksiin erilaisia pakokaasujen puhdistus- ja suodatusjärjestelmiä. Tämän insinööriyön tarkoituksena syventyä näistä vaihtoehdoista yhteen; satamasta laivoille vietävään maasähköön, sekä laatia Ramboll Finland Oy:n Kiinteistöt ja rakentaminen -toimialan sähkötekniikasta vastaavalle yksikölle selvitys toteutettavissa olevista, standardinmukaisista järjestelmäratkaisuksista sekä niiden vaatimuksista ja mitoittamisesta matkustajasataman laajennushankkeen aluesähköistyksen suunnittelua varten.

2 Maasähkö

Maasähköllä tarkoitetaan sähköä, jota hyödyntämällä aluksella satamassa olon aikana käytössä olevien, sähköenergiaa vaativien järjestelmien ja laitteiden toiminta voidaan mahdollistaa ilman aluksen omien apukoneiden käynnissäpitoa. Maasähkö siirretään sataman sähköverkosta laiturikohtaisen muuntamon kautta laiturialueella sijaitsevalle maasähkön syöttöpisteelle, johon kiinnitetään aluksen ja sataman välinen liitäntäkaapeli.

Maasähköä on hyödynnetty alle 1 000 voltin pienjännitteellä jo vuosikymmeniä muun muassa sotalaivojen käyttämissä satamissa, joissa alukset viipyvät laiturissa pitkiäkin aikoja. 1980-luvulta lähtien on rakennettu syöttöjärjestelmiä myös satamiin, joissa säännöllisesti risteilevät alukset kiinnittyvät laituriin aina samalla tavalla esimerkiksi perä- tai keulaportin ja ajorampin sijainnin vuoksi. Alusten koon ja sen myötä niiden tehontarpeen kasvaessa maasähköjärjestelmien toteuttaminen pienjännitteellä on muodostunut epäkäytännölliseksi. Jännitetason pysyessä samana suurempien tehojen siirtäminen vaatisi suurempia virtoja, jonka myötä sataman ja aluksen välisten liittymiskaapeleiden määrää tulisi lisätä tai kaapeleiden poikkipinta-alaa kasvattaa. Paksujen kaapeleiden määrän lisääminen lisää edelleen käsin tehtävään kaapeleiden kytkemiseen kuluvaa aikaa, minkä vuoksi maasähköä ei päästä hyödyntämään välittömästi aluksen saapuessa laituriin.

Vuosituhanneen taitteessa satamaorganisaatioiden sekä alan toimijoiden yhteisen kehitystyön tuloksena maasähköä on alettu yleisemmin siirtää aluksiin keskijännitteellä. Tämän myötä tehonsiirto onnistuu aiempaa suuremmilla jännitetasoilla ja sitä mukaa pienemmillä virroilla. Pienempien virtojen johdosta alusten tarvitsema teho on mahdollista siirtää sataman sähköverkosta yksinkertaisimmillaan yhtä liittymiskaapelia pitkin, mikä mahdollistaa huomattavasti nopeamman ja yksinkertaisemman liittymisen aiempaan verrattuna sekä varteenotettavan vaihtoehdon päästöjen vähentämiseksi myös lyhyempiä aikoja satamassa viettäville aluksille.

Ongelmallista maasähkön syöttöjärjestelmien suunnittelussa ja toteuttamisessa on alustyypeittäin ja kokoluokittain vaihtelevat jännite- ja taajuustasot sekä suuret tehontarpeet. Selvitysten ja varustamoilta saatujen tietojen mukaan alusten sisäiset sähkönjakelujärjestelmät ovat yleisimmin toteutettu 380–460 V pienjännitteillä sekä 50 tai 60 hertsin taajuudella. Poikkeuksena näihin on esimerkiksi suuret risteilyalukset, joiden

sisäisten järjestelmien tehokuormat yltävät kymmenien megawattien tasolle, mistä joh-tuen alusten sähkönjakelu tapahtuu 6,6–11 kV:n keskijännitteellä.

Mikäli alukselle, jonka sähkönjakelu tapahtuu pienjännitteellä, halutaan syöttää maa-sähköä satamasta keskijännitteen avulla, tulee alukselle sijoittaa erillinen muuntaja, jolla jännitetaso lasketaan alukselle sopivaksi. Vanhoille aluksille jälkiasennuksena asennettavat muuntajat ja tarvittavat kojeistot vievät aluksilta kallisarvoista ja jo val-miiksi rajallista tilaa, mikä saattaa nousta kynnyskysymykseksi keskijännitesyöttöjen käyttöönotolle varustamoiden osalta ja samalla vaikuttaa syöttöjärjestelmien toteutta-mishalukkuuteen satamaorganisaatioiden kohdalla.

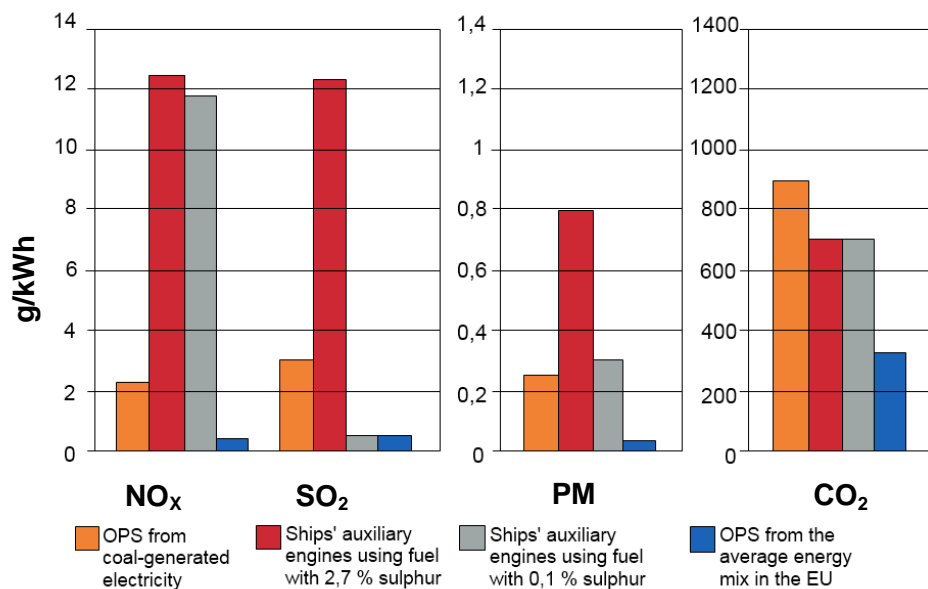
2.1 Vaikutukset ympäristöön

Laivaliikenne on avaintekijä kansainvälisen kaupan saralla vastaten energia- ja kustan-nustehokkuutensa vuoksi noin 90 prosentista kansainvälisistä raakamateriaalien bulk-kikuljetuksista sekä ruuan ja tavarankaupasta [1, s. 7]. Viime vuosikymmeninä lisään-tyntynyt laivaliikenne on kuitenkin näkynyt myös merkittävänä tekijänä globaaleissa pääs-tötilastoissa. Siitä aiheutui vuonna 2012 arviolta 796 miljoonaa tonnia ja ennen vuonna 2008 puhjennutta finanssikriisiä 885 miljoonaa tonnia CO₂-päästöjä. Laivaliikenteestä aiheutuvien päästöjen osuudessa on siis viime vuosina ollut nähtävissä pieni lasku, osuuden oltua vuonna 2007 noin 2,8 % ja viimeisimpien tutkimusten mukaan vuonna 2012 noin 2,3 % globaaleista CO₂-kokonaispäästöistä. [2, s. 13.] Arvion mukaan kan-sainvälisestä merenkulusta aiheutuvat päästöt tulevat nykyisellä kehityssuunnalla kui-tenkin jopa kolminkertaistumaan vuoteen 2050 mennessä [2, s. 18].

Maasähkön syöttöjärjestelmän kautta sataman sähköverkosta tuotavalla maasähköllä voidaan vähentää aluskohtaisia, satamassaolon aikaisia päästöjä ja muita haittavaiku-tuksia satamaan ja sen lähialueille. On kuitenkin huomioitavaa, että myös sähköverkon kautta aluksiin siirrettävän sähkön tuottamisen ja voimalaitoksella käytössä olevan polt-toaineen polttamisen yhteydessä syntyy haitallisia päästöjä muun muassa hiilidioksidin, rikkidioksidin, typen oksidien ja pienhiukkasten myötä. Poikkeuksena tähän ovat tuuli-voimalat ja muut pääosin ympäristöä kuormittamattomat energianlähteet, joita on tähän mennessä hyödynnetty myös maasähkön käytössä muutamissa Euroopan satamista. Aluksille syötettävän maasähkön päästömäärät ovatkin riippuvaisia siitä, millä tavoin

sähköverkon kautta siirrettävä energia on voimalaitoksella tuotettu ja tuotannon yhteydessä syntyvät pakokaasut suodatettu.

Kuviossa 1 on esitetty typenoksidi-, rikkidioksidi-, pienhiukkas- ja hiilidioksidipäästöjen päästökertoimet EU25-alueen keskimääräiselle sähköntuotannolle, kivihieillä tuotetulle sähköenergialle sekä rikkipitoisuuksiltaan 2,7 % ja 0,1 % dieselpolttoaineille, joita käytetään alusten omien generaattoreiden sähköntuotannossa. Kuviossa esitettyjen arvojen perusteella nähdään, että matalarikkisen dieselin käytöllä voidaan vähentää apukoneiden sähköntuotannon yhteydessä syntyviä rikkidioksidi- sekä pienhiukkas- päästöjä. Yksistään rikkipitoisuutta muuttamalla ei kuitenkaan saada aikaan merkittäviä muutoksia muun muassa happosateita synnyttävissä ja kasvihuoneilmiötä edistävissä typenoksidi- sekä hiilidioksidipäästöissä. Kokonaisvaltaisesti tehokkaampi ratkaisu päästöjen vähentämiseksi on kattaa aluksen satamassaolon aikainen tehontarve sataman sähköverkosta tuotavalla maasähköllä. Tehontarpeen kattaminen maasähköllä vähentää ilmakehään leviäviä päästöjä kaikkien edellä mainittujen yhdisteiden kohdalla käytettäessä sähköntuotannon polttoaineena muuta kuin kivihieiltä. Huomattavaa kuitenkin on, että myös kivihieillä tuotetun sähköenergian päästömäärät ovat hiilidioksidipäästöjä lukuun ottamatta pienemmät kuin korkearikkipitoisen dieselin käyttö.



Kuvio 1. Sähköntuotannon päästökertoimet [3, s. 26.]

2.2 Maasähkön käytön edistäminen

YK:n alla toimiva kansainvälinen merenkulkujärjestö IMO, *International Maritime Organization*, on laatinut meriliikennettä sääteleviä normeja Kioton ilmastopimuksen mukaisesti. Sen keskeisimmät tavoitteet ovat meriturvallisuuden edistäminen sekä merien ympäristönsuojelu vähentämällä laivaliikenteestä aiheutuvia päästöjä vuonna 1973 voimaan tulleen MARPOL-yleissopimuksen avulla. Yleissopimusta on täydennetty sen voimaantulon jälkeen useaan otteeseen. Viimeisin, meriliikenteessä käytettävien polttoaineiden rikkipitoisuuden raja-arvot rikin oksidipäästöjen valvonta-alueilla (SECA, *Sulphur Emission Control Area*) sekä tämän alueen ulkopuolella asettava liite VI saatiin voimaan vuoden 2005 toukokuussa. SECA-alueella liikennöivien alusten käyttämän polttoaineen rikkipitoisuus saa olla enintään 1,00 painoprosenttia 1. heinäkuuta 2010 lähtien ja 0,10 painoprosenttia 1. tammikuuta 2015 lähtien. SECA-alueen ulkopuolella rikkipitoisuuden raja-arvot ovat 3,5 % 1. tammikuuta 2012 lähtien ja 0,5 % 1. tammikuuta 2020 lähtien [4, s. 14].

Myös Euroopan unionin toimielimet ovat omalta osaltaan tehneet töitä laivaliikenteestä aiheutuvien päästöjen vähentämiseksi ja maasähkön käytön edistämiseksi huomioimalla muun muassa IMO:n asettamat normit laatimissaan direktiiveissä ja suosituksissa. Direktiiveillä annetaan toimintaohjeet unionin jäsenvaltioiden lainsäätäjille direktiiveissä esitettyjen asioiden saattamiseksi lainvoimaisiksi kussakin maassa.

MARPOL-yleissopimuksen liitteen VI mukaiset meriliikenteessä käytettävien polttoaineiden rikkipitoisuuksien kiristyvät raja-arvot asetettiin toimeenpantaviksi jokaisessa jäsenmaassa direktiivillä 2012/33/EU. Direktiivin myötä Euroopan vesillä risteilevien alusten satamassaolon aikana apukoneiden sähköntuotannossa käytettävä polttoaineen rikkipitoisuus tulee olla enintään 0,1 painoprosenttia vuoden 2015 alusta alkaen. Tätä vaatimusta ei kuitenkaan sovelleta aluksiin, jotka kattavat satamassaolon aikaisen tehontarpeensa sataman sähköverkosta tuotavalla maasähköllä ilman apukoneiden käyttöä [5, s. 7].

Euroopan komissio on antanut tehtyjen tutkimusten ja maasähkön vaikutusten seurannan pohjalta myös suosituksen 2006/339/EY maasähkön käytön edistämisestä yhteisön satamissa. Suositukseen myötä Euroopan unionin jäsenvaltioiden tulisi harkita maasähkön syöttöjärjestelmien toteuttamista erityisesti asuinalueiden läheisyydessä

sijaitseville laiturialueille sekä satamiin, joissa ilmanlaadulliset raja-arvot ylittyvät tai joissa meluhaitat ovat väestön kokemusten perusteella korkealla tasolla [6, s. 1].

Maasähkön käyttöä pyritään edistämään myös direktiivin 2014/94/EU myötä, joka asettaa vaatimukset vaihtoehtoisten polttoaineiden infrastruktuurien käyttöönotolle Euroopan unionin alueella. Direktiivin myötä jäsenvaltioille annetaan ohjeet tällaisten infrastruktuurien, kuten maasähkön syöttöjärjestelmien kehittämiseksi sekä käyttöönotolle. Direktiivin artiklan 4 mukaan jäsenvaltioiden on varmistettava, että maasähkön syöttötarve sisävesi- tai merialuksia varten maiden satamissa arvioidaan niiden kansainvälisissä toimintakehyksissä. Maasähkön syöttöjärjestelmiä on asennettava ensisijaisesti TENT-T-ydinverkon (*Trans-European Transport Network*) satamiin ja muihin satamiin viimeistään 31. päivänä joulukuuta 2025, paitsi jos kysyntää ei ole tai kustannukset ovat suhteettomia hyötyihin nähden, ympäristöhyödyt mukaan luettuina. [7, s. 12]

Euroopan unionin jäsenvaltiot voivat myös energiatuotteiden ja sähkön verotusta koskevan direktiivin 2003/96/EY artiklan 19 mukaisesti hakea vapautuksia tai alennuksia direktiivissä käsiteltyjen, eri tarkoituksiin käytettävien energiamuotojen ja tuotteiden osalta. Tällaisen toimenpiteen käyttöönottoa harkitsevan jäsenvaltion tulee ilmoittaa asiasta Euroopan komissiolle sekä toimittaa sille merkitykselliset ja tarpeelliset tiedot asiaan liittyen. Tässä asiayhteydessä verohelpotusta on mahdollista hakea sataman sähköverkosta alukselle siirrettävän ja varustamoille myytävän maasähkön verotukseen, joka omalta osaltaan edesauttaa ja edistää varustamoiden halukkuutta investoida maasähkön käyttöönoton mahdollistaviin aluskohtaisiin järjestelmiin kiristyvien polttoainevaatimuksien ja sitä mukaa polttoaineen hinnannousun myötä. Komissio käsittelee jäsenmaan pyynnön verotuksen muuttamisesta ja huomioi vaikutukset tasapuolisen kilpailun sekä markkinatoiminnan takaamiseksi eri politiikan alojen pohjalta. Käsittelyn ja vaikutusten arvioinnin perusteella komissio jättää neuvostolle ehdotuksen jäsenmaalle myönnettävästä luvasta. Ehdotuksen myötä neuvosto voi tämänhetkisten direktiivien mukaisesti myöntää luvan ehdotuksessa mainituille toimenpiteille enintään kuudeksi vuodeksi, joka on mahdollista uusina ennen määräajan päättymistä. [8, s. 7, 10.]

2.2.1 Esitys maasähkön käytön edistämisestä Suomessa

Suomen Varustamot, Suomen Satamaliitto ja Suomen erikoisalusten työnantajaliitto toimittivat 28. kesäkuuta 2013 valtiovarainministeriölle sekä liikenne- ja viestintäministeriölle esityksen maasähkön käytön edistämisestä Suomen satamissa. Maasähkön käyttöä ja sen edistämisen hyötyjä perustellaan aluksesta aiheutuvien ympäristöhaittojen vähentämisellä ja Suomelta vaadittavilla maakohtaisilla teoilla maasähkön käyttöönotolle sekä aluksille suunnattavien kriteerien luomisessa. Esityksessä on huomioitu myös EU:n komission suositus 2006/339/EY sekä suosituksen ja EU:n neuvoston energiatuotteiden ja sähkön verotusta koskevan direktiivin 2003/96/EY pohjalta myönnetty verohelpotukset maasähkön käytölle Ruotsissa ja Saksassa. Suomessa verokannan alentaminen lisäisi esityksen mukaan eri kuljetusmuotojen tasa-arvoisuutta sekä investointihalukkuutta aluskohtaisiin maasähkön käyttövalmiuksiin muun muassa Ruotsista ja Saksasta Suomeen liikennöivillä varustamoilla. Tällä hetkellä Suomessa sataman sähköverkosta ostettavasta sähköenergiasta peritään energiaveroa luokan I mukaan. Esityksen jättämisen jälkeen energiaveroa on korotettu kahteen otteeseen. Vuonna 2014 verotaso nousi 1,703 sentistä 1,903 senttiin ja vuonna 2015 edelleen 2,253 senttiin kilowattitunnilta (22,53 €/MWh) [9]. Veroluokan I sähköenergiasta peritään myös 24 % arvonlisävero. Esityksen laatineet osapuolet ehdottavat maasähkön käytön edistämiseksi seuraavia toimenpiteitä:

1. Maasähkölle myönnetään verohelpotus, kuten on tehty Ruotsissa ja Saksassa.
2. Valtio edistää maasähkön käyttöönottoa ja käyttöä niin matkustajakuin rahtisatamissa ja käyttää hyväkseen mahdolliset EU-rahoituslähteet (esim. TEN-T) kehittääkseen maasähkөөn liittyvää satamainfrastruktuuria.
3. Maasähkön vaatiman infrastruktuurin ja liitännätarvikkeiden toteuttamiseksi voidaan myöntää valtiontuen suuntaviivojen mukaista ympäristöinvestointitukea.
4. Satamat ja varustamot tekevät yhteistyötä ja edistävät omalta osaltaan maasähkön käyttöönottoa.

2.2.2 Standardisointi

Maasähköjärjestelmien yleistymisen ja maasähkön käytön hidasteena on ollut viime vuosikymmeninä yleispätevän ratkaisumallin ja yhteisten suuntaviivojen puuttuminen järjestelmien toteuttamisessa täyden potentiaalin hyödyntämiseksi. Järjestelmiä on toteutettu räätälöidysti tiettyjen alusten tarpeiden ja varustamoiden toiveiden mukaisesti, joka on tehnyt niiden käyttämisestä muiden alusten kohdalla haastavaa tai jopa mahdotonta.

Kansainvälisen sähköalan standardointiorganisaation IEC:n, kansainvälisen standardoimisjärjestön ISO:n, sekä kansainvälisen tekniikan alan järjestön IEEE:n yhteistyössä laatima standardi IEC/ISO/IEEE 80005-1 "Utility connections in port – Part 1: High Voltage Shore Connection (HVSC) Systems – General requirements" julkaistiin vuonna 2012. Standardi asettaa keskeiset vaatimukset nimellisjännitteeltään 1–15 kV:n maasähkön syöttöjärjestelmien suunnittelulle ja rakentamiselle, turvallisuudelle sekä alusten ja sataman liitännämahdollisuuksien yhteensopivuudelle. Sen tavoitteena on saada laivateollisuus ja satamien toimijat tekemään yhteistyötä universaalien ratkaisun kehittämiseksi. Yhtenäinen ratkaisumalli ja standardin mukaisesti toteutetut järjestelmät satamissa sekä alusten valmiudet mahdollistaisivat maasähkön käytön mahdollisimman monen aluksen kohdalla.

Samaan standardisarjaan kuuluva, syöttöjärjestelmien tiedonsiirtoyhteyksiä käsittelevä standardi IEC/IEEE 80005-2 "Cold ironing – Part 2: High Voltage Shore Connection (HVSC) Systems — Communication Interface Description", on parhaillaan työn alla siitä vastaavan komission toimesta.

IEC on laatinut myös kahteen osaan jaetun standardisarjan IEC 62613 "Plugs, socket-outlets and ship couplers for high-voltage shore connection systems (HVSC-Systems)" syöttöjärjestelmissä käytettävien keskijännitekaapeleiden pistokkeille, pistorasioille ja kytkentälaitteille, joiden nimellisvirta ei ylitä 500 ampeeria eikä nimellisjännite 12 kilovoltia 50 tai 60 hertsin taajuudella. Standardin ensimmäinen osa sisältää keskeiset vaatimukset edellä mainituille liitännälaitteille. Toinen osa käsittelee liitännälaitteiden muunneltavuutta ja mitoituksen yhteensopivuutta erityyppisten laivojen kohdalla.

2.3 Maasähkön syöttömahdollisuudet satamissa

Yhä useammassa satamassa ympäri maailmaa maasähkön syöttöjärjestelmien suunnittelu ja toteuttaminen on ajankohtainen aihe kiristyvien ympäristöasetusten ja yhteiskunnan painostuksen vuoksi. Satamien kansainvälisen kattojärjestön, IAPH:n (*International Association of Ports and Harbors*), satamien ympäristöstä vastaava komitea käynnisti paikallisten satamaorganisaatioiden konsultoimana vuonna 2008 aloitteen satamien toimista ja ratkaisuista ilmastonmuutoksen torjumiseksi. Aloite sai nimen World Port Climate Initiative, *WPCI*, ja sen yhteydessä koottiin työryhmä maasähkön käytön edistämiseksi satamissa. Taulukossa 1 on esitetty WPCI:n ilmoittamat satamat, joissa on toteutettu vuosien 2000 ja 2015 välillä maasähkön syöttöjärjestelmä, missä tehonsiirto eri alustyypeille tapahtuu keskijännitteellä.

Taulukko 1. Satamat, joissa on toteutettu keskijännitteellä toimiva maasähkön syöttöjärjestelmä [10.]

Vuosi	Satama	Maa	Teho (MW)	Taajuus (Hz)	Jännite (kV)	Alustyyppi
2000-2010	Göteborg	Ruotsi	1,25-2,5	50/60	6,6/11	RoRo/ROPAX
2000	Zeebrugge	Belgia	1,25	50	6,6	RoRo
2001	Juneau	Yhdysvallat	7-9	60	6,6/11	risteily
2004	Los Angeles	Yhdysvallat	7,5-60	60	6,6	rahti/risteily
2004	Piteå	Ruotsi	1,0	50	6	RoRo
2005-2006	Seattle	Yhdysvallat	12,8	60	6,6/11	risteily
2006	Kemi	Suomi		50	6,6	ROPAX
2006	Kotka	Suomi		50	6,6	ROPAX
2006	Oulu	Suomi		50	6,6	ROPAX
2008	Antwerp	Belgia	0,8	50/60	6,6	rahti
2008	Lübeck	Saksa	2,2	50	6	ROPAX
2009	Vancouver	Kanada	16	60	6,6/11	risteily
2010	San Diego	Yhdysvallat	16	60	6,6/11	risteily
2010	San Francisco	Yhdysvallat	16	60	6,6/11	risteily
2010	Karlskrona	Ruotsi	2,5	50	11	ROPAX
2011	Long Beach	Yhdysvallat	16	60	6,6/11	risteily
2011	Oslo	Norja	4,5	50	11	risteily
2011	Prince Rupert	Kanada	7,5	60	6,6	
2012	Rotterdam	Alankomaat	2,8	60	11	ROPAX
2012	Ystad	Ruotsi	6,25	50/60	11	ROPAX
2013	Trelleborg	Ruotsi	3,5-4,5	50	11	ROPAX
2015	Hamburg	Saksa	12	50/60	6,6/11	risteily

2.3.1 Göteborg

Göteborgin satamassa otettiin vuonna 2000 käyttöön maailman ensimmäinen keski-jännitteellä toimiva, sataman, Stora Enson ja ABB:n yhteistyössä kehittämä maasähkön syöttöjärjestelmä, johon liittymällä alukset voivat sammuttaa apukoneensa satamassa olon ajaksi [11, s. 4]. Aluksille vietävä sähkö tuodaan sataman sähköverkosta jälkiasennuksena rakennetulle maasähkömuuntamolle, jossa on valmiudet 6,6 ja 10 kV:n syötölle 50 Hz:n taajuudella. Liittymiskaapeli lasketaan aluksen kannelta laituri-alueella sijaitsevalle liitäntäpisteelle, jonka kautta 10 kV:n jännite syötetään alukselle. Korkean jännitetason johdosta laiturissa olevan aluksen tarvitsema tehokuorma on mahdollista siirtää ainoastaan yhtä liittymiskaapelia pitkin ja liittäminen onnistuu käsi-voimin siitä vastaavan henkilön toimesta ilman erillisiä kaapelinkäsittelylaitteistoja tai kaapelisilloja. Jännite muunnetaan syöttöjärjestelmää käyttävän aluksen omalla muuntajalla 400 volttiin vastaamaan sisäisten järjestelmien jännitetasoa.

Satamassa on ensimmäisen syöttöjärjestelmän valmistumisen jälkeen laajennettu liittymismahdollisuuksia vuosina 2003, 2006 ja 2011. Vuosina 2003 ja 2006 rakennetuissa järjestelmissä 10 kV:n jännite tuodaan alukselle suoraan sataman verkosta ilman erillisiä, laituri-kohtaisia muuntajia. Myös liittymiskaapelit sijaitsevat näissä ratkaisussa sataman puolella alusten omien kaapelikelajärjestelmien sijaan. Vuonna 2011 käyttöön otettu syöttöjärjestelmä poikkeaa aiemmin toteutetuista järjestelmistä siinä, että sen yhteyteen rakennettiin myös taajuusmuuttajalaitteisto, jonka avulla sataman sähköverkon 50 Hz:n taajuus muutetaan 60 hertsiin järjestelmää käyttäville aluksille sopivaksi.

Kokonaisuudessaan satamaan toteutettujen syöttöjärjestelmien avulla on mahdollista vähentää aluksista aiheutuvia CO₂-päästöjä arviolta 61 tonnilla vuodessa, mikäli kaikilla risteilevillä aluksilla liittyisivät sataman sähköverkkoon ollessaan laiturissa [12, s. 65]. Göteborgin satamaan on asennettu ja otettu käyttöön myös kaksi tuuliturbiinia tuotamaan suurimmilta osin päästötöntä sähköenergiaa sataman sähköverkkoon ja maasähkön syöttöpisteiden kautta edelleen kattamaan osa laiturissa olevien alusten tehontarpeesta [3, s. 14].

2.3.2 Suomen satamat

Suomessa on vuoteen 2015 mennessä toteutettu keskijännitteellä toimivia maasähkön syöttöjärjestelmiä Kemin, Kotkan ja Oulun satamiin. Kemin ja Oulun satamien syöttöjärjestelmien rakenteet vastaavat pitkälti rakennetta johon Göteborgin satamassa päädyttiin vuonna 2000, sillä samantyyppiset alukset liikennöivät näissä satamissa.

Kemin sataman 3-laiturilla ja Oulun Oritkarin sataman Pohjoislaiturilla sijaitsevien syöttöjärjestelmien kautta on mahdollista siirtää maasähköä satamissa vieraileville RoRo-aluksille 6,6 kilovoltin jännitteellä ja 50 hertsin taajuudella. Pohjoislaiturin syöttöjärjestelmän syöttöpiste sijoitettiin alun perin laituripinnan alapuolelle riittävän lastaus- ja purkutilan takaamiseksi. Sataman ja aluksen välisen paksun liittymiskaapelin kytkeminen laituripinnan alapuolelle sijoitettuun syöttöpisteeseen osoittautui kuitenkin haasteelliseksi, mistä syystä Oulun Satama rakennutti myöhemmin uuden syöttöpisteen laiturirakenteen päälle liittymisen helpottamiseksi. [13.]

Keskijännitesyöttöjärjestelmien lisäksi Suomen satamista löytyy maasähkön syöttöpisteitä erityisesti pienempien alusten tehontarpeiden kattamiseen pienjännitteellä. Helsingin matkustajasatamissa on kymmenen 400 V:n 50 Hz:n syöttöpistettä 90–175 kW syöttökapasiteetilla [14].

Näiden lisäksi Helsingin Katajanokan terminaalissa otettiin vuonna 2012 käyttöön maasähkön syöttöjärjestelmä palvelemaan Viking Linen Tukholmaan risteileviä matkustaja-autolauttoja M/S Mariellaa ja M/S Gabriellaa. Aluksilla oli järjestelmän suunnittelun aloittamisen yhteydessä valmiudet vastaanottaa maasähköä 380 V:n jännitetasolla ja 50 Hz:n taajuudella Tukholmaan rakennetun syöttöjärjestelmän myötä. Varustamon toiveena oli, että Katajanokalle rakennettava järjestelmä toteutetaan niin, että se olisi yhteneväinen toimivaksi koetun Tukholman sataman järjestelmän kanssa ja sopisi laivojen nykyisiin kytkentämahdollisuuksiin. Laivojen satamassa olon aikainen tehontarve on arviolta 1,5–2,5 MW, joten 400 V:n pienjännitteellä toteutettuna järjestelmään piti varata 12 liittymiskaapelia riittävän tehon siirtämiseksi kaapeleiden ollessa vielä suhteellisen helposti käsiteltävissä.



Kuva 1. Katajanokan maasähkömuuntamo.

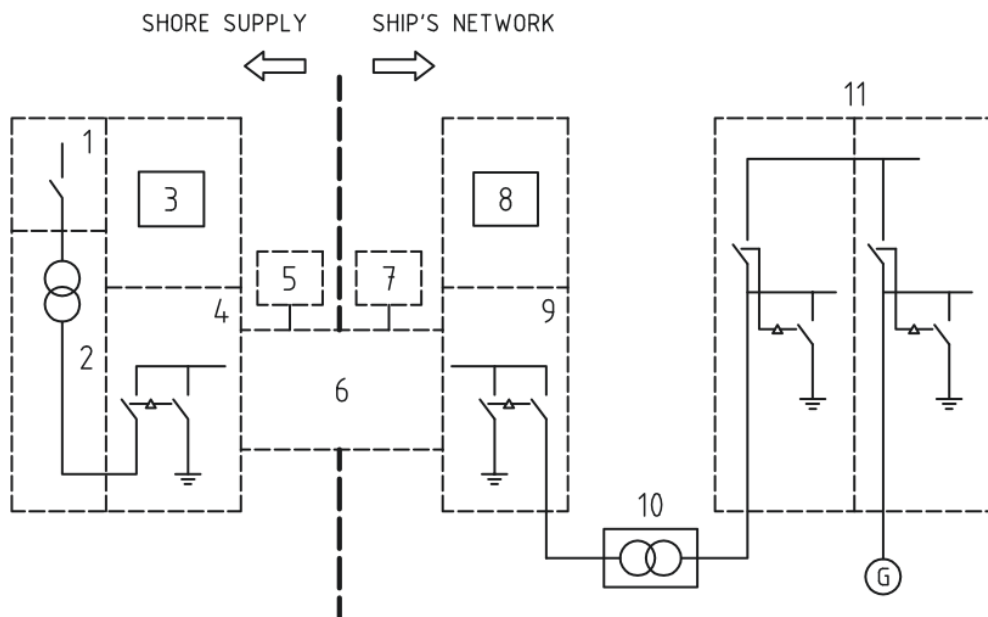
Kuvassa 1 oikealla näkyvä pienjännitemaasähkökeskus sijaitsee laiturialueelle rakennetussa muuntamotilassa, jossa siihen on yhdistetty kiskosilloilla kaksi sitä syöttävää 2000 kVA:n muuntajaa. Muuntamotilaan on asennettu myös muuntajien kompensointipatteristo, jonka kokonaisteho on 1500 kvar.



Kuva 2. Kaapelisilta (vasemmalla) ja yhdistyspisteessä sijaitsevat liittymiskaapelit (oikealla)
(Kuva: Port of Helsinki)

Maasähkökeskukselta lähtee 12 kappaletta 400 voltin liittymiskaapelia kuvassa 2 vasemmalla puolella näkyvää kaapelisiltaa pitkin yhdistyspisteelle, jossa laivojen liitääntä maasähköverkkoon suoritetaan hydraulimoottorihjattujen ohjainrullien avustuksella. Avoin kaapelisilta sekä Suomen kylmät talviolosuhteet asettavat omat haasteensa paksumien liittymiskaapeleiden käsittelylle johdinmateriaalina käytettävän kuparin jäykistymisen myötä. Jäykistymistä on pyritty vähentämään asentamalla lämmittämiä yhdistyspisteen yhteyteen.

3 Maasähkön syöttöjärjestelmän standardinmukainen rakenne ja standardin vaatimukset



Kuva 3. Standardin IEC/ISO/IEEE 80005-1 mukainen maasähkön syöttöjärjestelmä. [15, s. 11]

Kuvassa 3 on yksiviivaisena esitystapana standardissa IEC/ISO/IEEE 80005-1 esitetty rakenne maasähkön syöttöjärjestelmille, joiden kautta sähköteho syötetään aluksille 6,6 tai 11 kilovoltin jännitteellä. Kokonaisuus on jaettu kuvassa näkyvällä katkoviivalla kahteen osaan, jossa viivan vasemmalle puolella on esitetty järjestelmän satamanpuoleinen osa ja oikealla puolella liittymispiste laivaan sekä laivan sähköjakeluverkon jakelupiste, jolle sataman sähköverkosta tuotava sähköenergia syötetään tarvittaessa muuntajan kautta. Taulukossa 2 on tarkemmin kuvattu järjestelmän eri osien tarkoitukset. Kaikki maasähkön syöttöjärjestelmän osat tulee olla standardin IEC 61936-1 "Power installations exceeding 1 kV a.c. – Part 1: Common rules" sekä paikallisten viranomaisten vaatimusten ja määräysten mukaisia.

Taulukko 2. Kuvan 3 numeroinnin selitteet

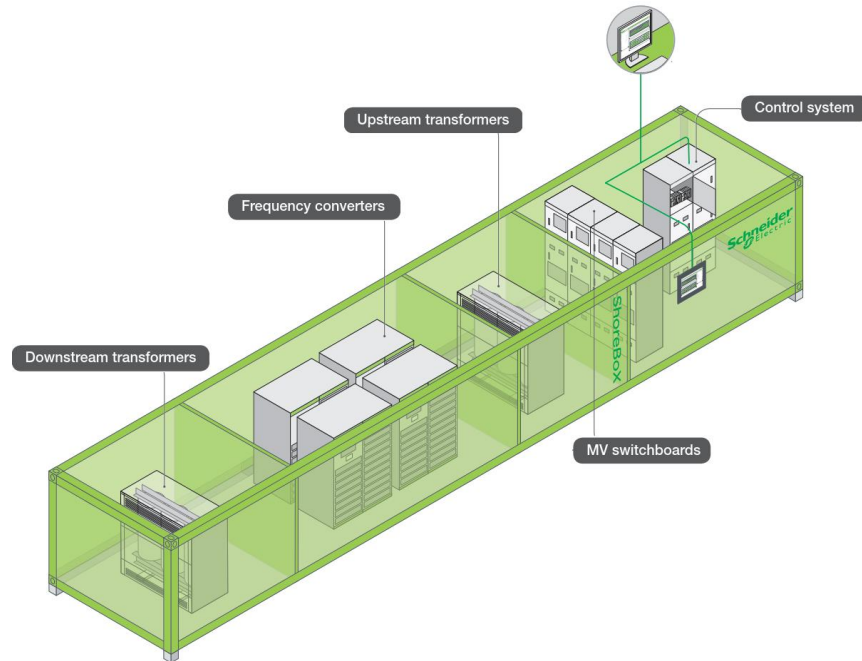
Positio	Selitys
1	Syöttö sataman sähköverkosta suojakatkaisijan kautta laiturikohtaiselle maasähkömuuntamolle
2	Satamanpuoleinen muuntaja, jolla sataman sähköverkon jännite muunnetaan vastaamaan alukselle syötettävää jännitettä (6,6 kV tai 11 kV)
3	Satamanpuoleinen relepiiri, jolla ohjataan syöttöjärjestelmän suojalaitteita
4	Järjestelmän satamanpuoleinen suojakatkaisija ja maadoituskytkin.
5	Kaapelinkäsittelyjärjestelmän ja liittymiskaapeleiden hallinta/ohjaus
6	Kaapelinkäsittelyjärjestelmä ja keskijänniteliittymiskaapeli, jota pitkin alus saa syötönsä sataman sähköverkosta. Sisältää myös pilottipiirin, jonka avulla tarkistetaan liitännän toimivuus ennen varsinaisen tehonsiirron aloittamista.
7	Kaapelinkäsittelyjärjestelmän ja liittymiskaapeleiden hallinta/ohjaus
8	Aluksenpuoleinen relepiiri, jolla ohjataan aluksen suojalaitteita.
9	Liittymiskaapeleiden kytkentäpiste aluksella. Sisältää suojakatkaisijan sekä maadoituskytkimen.
10	Aluksenpuoleinen muuntaja, jolla syöttöjärjestelmän kautta tuotava jännite muunnetaan tarvittaessa vastaamaan laivan jännitetasoa. Mikäli laivan sähkönjakelujärjestelmä on toteutettu 6,6 tai 11 kV:n keskijännitteellä, ei muuntajaa tarvita.
11	Aluksen sähkönjakelujärjestelmän jakelupiste, jolle sataman sähköverkosta tuotava sähköenergia syötetään.

Standardin liitteissä B–F on tarkennettu järjestelmän vaatimuksia eri alustyyppien kohdalla muun muassa syöttöjännitteen osalta. Maasähkö tulee syöttää RoRo-aluksille ja risteilijöille 11 ja/tai 6,6 kV:n jännitteellä sekä konttialuksille, säiliöaluksille ja LNG-kuljetusaluksille 6,6 kV:n jännitteellä. Aluskohtaisilla laitureilla voidaan harkita kuitenkin myös muita standardijännitteitä, mikäli se on toteutuksen ja käytön kannalta perusteltua ja järkevää. Syötettävän sähkön taajuus määräytyy aluksen sähköverkon taajuuden mukaan, mistä syystä satamanpuoleinen järjestelmä tulee tarpeen mukaan varustaa taajuusmuuttajalaitteistolla.

Alalla toimivat valmistajat tarjoavat nykyisin standardinmukaisia, kompakteja maasähkön syöttöjärjestelmien laitekokonaisuuksia liitettäväksi sataman sähköverkkoon.

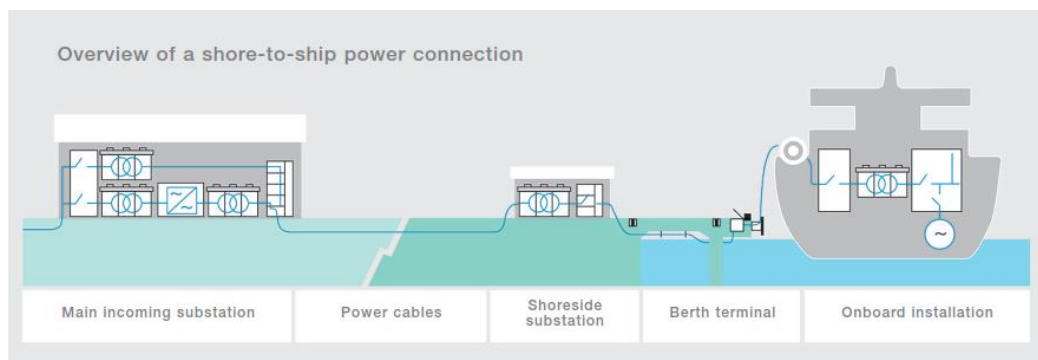
Kuvassa 4 esitetty Schneider Electricin ShoreBoX on konttipohjainen, satamassa tapahtuvien muutosten myötä uudelleensijoittamisen mahdollistava ratkaisu, joka sisältää kaikki tarvittavat, laiturikohtaisesti asennettavat laitteistot maasähkön syöttämiseksi satamassa vieraileville aluksille. Kontit toimitetaan tilaajalle tehtaalta valmiiksi koottuina, testattuina ja asennusta vaille käyttövalmiina. Järjestelmän kapasiteettia voidaan

lisätä asentamalla yksittäisiä ShoreBoX-yksiköitä rinnan, jolloin kuitenkin laitteiston lopullinen koko kasvaa ja rakenne sekä ulkomuoto muistuttavat enää etäisesti alkupe-
räistä ajatusta liikuteltavasta kontista.



Kuva 4. ShoreBoX:n rakenne (Kuva: Schneider Electric)

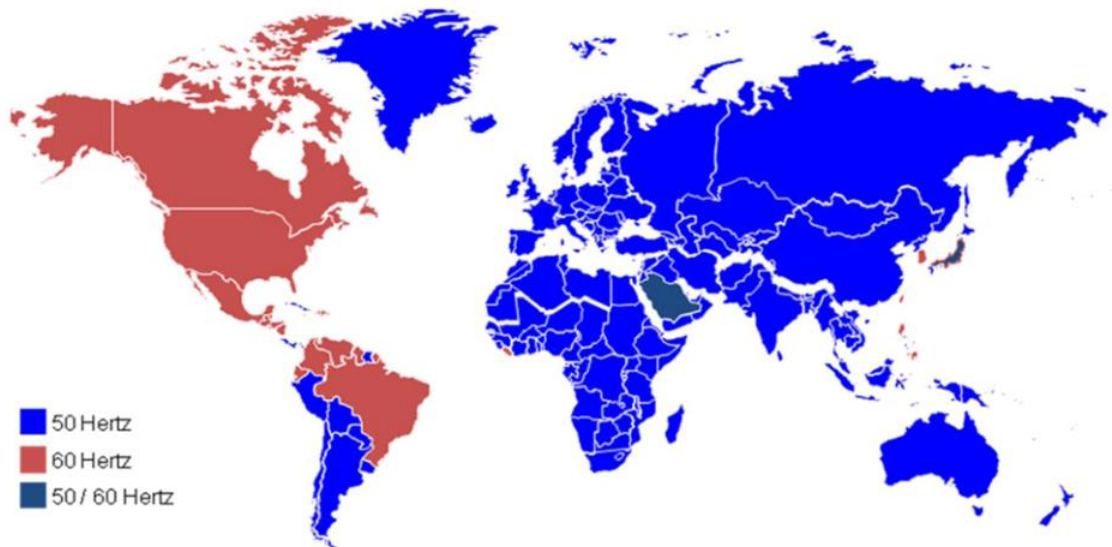
ABB:n tarjoama kokonaisuus on esitetty kuvassa 5. Ratkaisu kattaa niin ikään tarvittavat laitteistot maasähkön syöttämistä varten sataman tarpeiden ja laadittujen suunnitelmien mukaisesti toteutettuna ja käyttöönotettuna. ShoreBoX:sta poiketen taajuuden muutos suoritetaan kuitenkin jo päämuuntamon yhteydessä, jolloin siihen käytettävä laitteisto ei vie tilaa laiturialueelta ja laiturikohtaisen maasähkömuuntamon koko voidaan minimoida.



Kuva 5. ABB:n maasähköjärjestelmän rakenne (Kuva: ABB)

3.1 Taajuusmuuttajat

Maasähköjärjestelmän kautta siirrettävän sähkön taajuutta on tarpeen muuttaa tilanteissa, jossa sataman ja aluksen sähköverkkojen taajuudet eivät vastaa toisiaan.



Kuva 6. Sähköverkkojen taajuudet [16, s. 3]

Kuvasta 6 nähdään, että sähköverkot Euroopassa ja pääosin muissa maanosissa Pohjois- ja Etelä-Amerikkaa sekä osaa Aasian maista lukuun ottamatta toimivat 50 Hz:n taajuudella. Merillä liikkuvien alusten sähköjakelujärjestelmät taas on toteutettu joko 50 tai 60 Hz:n taajuudella alustyyppistä ja rakennusmaasta riippuen.

Alukset, joiden sisäinen sähköjakelu tapahtuu 60 hertsin taajuudella, voivat hyödyntää 50 Hz:n taajuista sähköä tiettyjen järjestelmien, kuten valaistuksen ja lämmityksen osalta. Aluksilla on kuitenkin paljon erilaisia moottorikäyttöisiä koneita, kuten pumppuja, joiden suunniteltu pyörimisnopeus ja tarkoituksenmukainen toiminta toteutuvat 60 hertsin taajuudella. Mikäli tällaisille laitteille syötetään sataman sähköverkosta sähköä 50 Hz:n taajuudella, koneiden toiminta muuttuu, mikä voi edelleen vaikuttaa aluksen muihin järjestelmiin ja aiheuttaa häiriöitä järjestelmien normaalissa toiminnassa. [17, s. 6.] Tästä syystä myös standardi vaatii, että satamaan rakennettavan maasähkön syöttöjärjestelmän kautta laiturissa oleville aluksille vietävän maasähkön taajuutta on tarvittaessa pystyttävä muuttamaan, mikäli satamassa liikennöivien alusten sähköjakeluverkkojen taajuuksissa on eroavaisuuksia.

Taajuusmuutos voidaan suorittaa sataman puolella monin eri tavoin, eikä standardi aseta varsinaisia vaatimuksia sille, miten se käytännössä toteutetaan ja mihin siihen vaadittava laitteisto sijoitetaan. Syöttöjärjestelmissä käytettävien taajuusmuuttajien tulee kuitenkin olla tyypiltään soveltuvia asennuksiin, joissa useita taajuusmuuttajia kytketään rinnan laiturin tehokapasiteetin mukaisesti. Järjestelmien kehitystyön tuloksena eri valmistajat ovat päätyneet omissa ratkaisuisaan taajuusmuuttajiin, jotka toimivat tehotasosta riippuen joko pien- tai keskijännitteellä.

ShoreBoX-ratkaisussa taajuuden muutokseen käytetään UPS-pohjaisia, 340–460 V jännitetasolla toimivia 500–1000 kVA:n MGE Galaxy GFC-taajuusmuuttajia. Kyseiset taajuusmuuttajat soveltuvat kymmenen laitteen rinnankytkentäsovelluksiin, mikä mahdollistaa yhteensä 5–10 MVA:n suuruisen taajuuden muutoksen

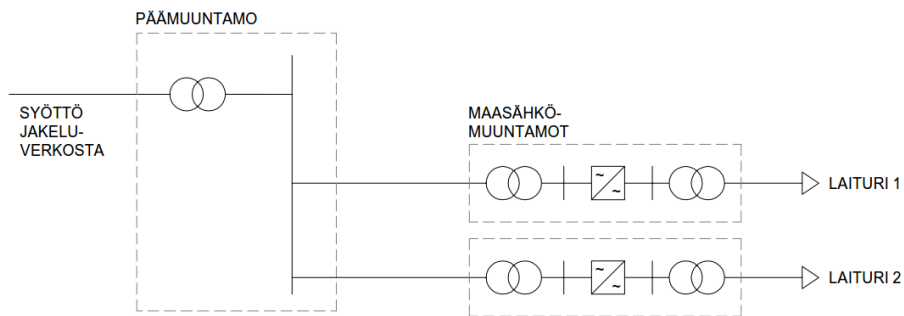
ABB:n ratkaisuisa taajuusmuutos suoritetaan pienemmissä, 0,1–2 MVA:n syöttöjärjestelmissä bipolaaritransistoreihin (IGBT) pohjautuvilla 200–480 voltin PCS 100 SFC-pienjännitetaajuusmuuttajilla. Suurempien, 4–14 MVA:n järjestelmien taajuusmuunnos tapahtuu 3–3,3 kV:n keskijännitteellä toimivilla PCS 6000 SFC-taajuusmuuttajilla.

PCS 6000 SFC-taajuusmuuttajien tasasuuntaus tapahtuu 12-pulssisen diodisillan avulla ja vaihtosuuntaus IGCT-tekniikalla [18, s. 3]. IGCT-tekniikan keskipisteenä on hilakommutoitu tyristori, joka on ABB:n kehittämä tehoelektronikkapuolijohdekomponentti. Sen rakenne ja toiminta vastaavat pitkälti GTO-tyristoria, tarkoittaen, että komponenttia voidaan kokonaisuudessaan ohjata sen hilan kautta. IGCT-tyristorilla on GTO-tyristoria pienempi poiskytkennästä aiheutuva häviö sekä parempi jännitteenousukestoisuus. PCS 6000 SFC-taajuusmuuttajien vaihtosuuntaajat koostuvat useista IGCT-komponenteista, jotka sijoitetaan taajuusmuuttajan sisällä sijaitsevaan IGCT PEBB (*Power Electronic Building Block*)-yksikköön.

Valmistajien ratkaisuja sekä toteutuneita syöttöjärjestelmiä tutkimalla taajuusmuuttajat voidaan sijoittaa esimerkiksi keskitetysti päämuuntamotilaan tai hajautetusti laiturikohtaisiin maasähkömuuntamoihin. Taajuusmuutokseen käytettävä laitteisto tulee toteuttaa tyypistä riippuen niitä koskevien standardien mukaisesti. Taajuusmuuttajien käyttö ei saa myöskään laskea suojalaitteiden selektiivisyyttä suurimmankaan kuorman kohdalla aluksen ollessa kytkettynä maasähköverkkoon.

3.1.1 Hajautettu ratkaisu

Kuvassa 7 esitettyssä hajautetussa ratkaisussa sataman sähköverkosta syötettävän sähkön taajuus muutetaan tarvittaessa vastaamaan laivan sähköverkon taajuutta laiturikohtaisiin maasähkömuuntamoihin sijoitettavilla taajuusmuuttajilla. Taajuusmuuttajia varten maasähkömuuntamoon tarvitaan myös jännitteen alennusmuuntaja, jolla sataman sähköverkosta syötettävä keskijännite muunnetaan taajuusmuuttajille sopivaksi, sekä korotusmuuntaja, jolla jännite nostetaan taajuusmuutoksen jälkeen standardin mukaisesti 11 tai 6,6 kilovolttiin.



Kuva 7. Taajuusmuuttajat hajautetusti laiturikohtaisissa maasähkömuuntamoissa

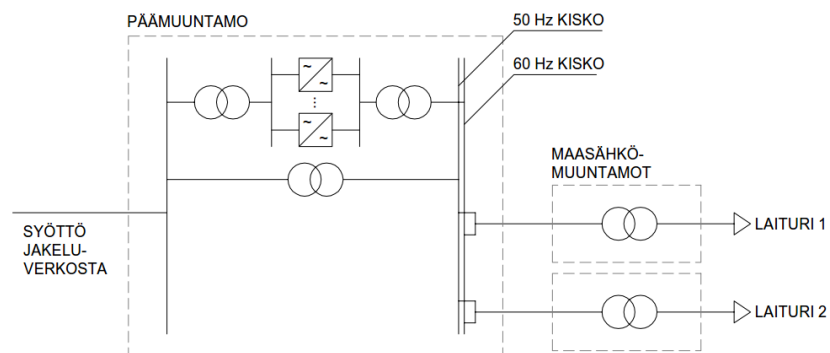
Sijoitettaessa taajuusmuuttajat hajautetusti laiturikohtaisiin maasähkömuuntamoihin niitä käytetään ainoastaan yhden laiturialueen syöttöjärjestelmässä tapahtuvaan taajuuden muuttamiseen. Tästä johtuen vika yhden maasähkömuuntamon taajuusmuuttajissa ei vaikuta muiden muuntamoiden maasähkösyöttöjen toimintaan tai niiden ominaisuuksiin. Häiriötilanteissa maasähkömuuntamo, jonka taajuusmuuttajissa vika on ilmennyt, voidaan erottaa sataman muusta verkosta ja suorittaa vian aiheuttamat korjaustoimenpiteet mahdollistaen samalla muiden laitureiden maasähkösyöttöjärjestelmien normaalin toiminnan samanaikaisesti.

Huomioitavaa kuitenkin on, että laiturikohtaisiin maasähkömuuntamoihin sijoitettavat taajuusmuuttajat, jännitteen alennus- ja korotusmuuntajat sekä tarvittavat keskijännitekojeet vaativat enemmän tilaa laiturialueilta verrattuna esimerkiksi seuraavaksi käsiteltävään ratkaisuun, jossa taajuusmuuttajat sijoitettaisiin keskitetysti päämuuntamotilaan. Suurehkojen maasähkömuuntamoiden sijoittaminen vilkkaasti liikennöidyille ja valmiiksi ahtaille laiturialueille voi olla usein haastavaa tai jopa mahdotonta.

Suuremman laiturikohtaisen tilantarpeen lisäksi sähkö syötetään laivoille taajuusmuuttajien läpi hajautetussa ratkaisussa myös tilanteissa, jossa taajuutta ei ole tarpeen muuttaa. Tästä syystä taajuusmuuttajat tulee mitoittaa kyseistä laituria ja syöttöjärjestelmää käyttävistä aluksista suurimman tehontarpeen omaavan aluksen mukaan, huolimatta siitä onko taajuutta kyseisen aluksen kohdalla tarpeen muuttaa.

3.1.2 Keskitetty ratkaisu

Toinen yleisesti käytetty ratkaisu on sijoittaa jokaisen laiturialueen maasähkömuuntamoita palvelevat taajuusmuuttajat keskitetysti kauempana laiturialueista sijaitsevaan päämuuntamotilaan, jolloin laiturikohtaisten maasähkömuuntamoiden tilantarpeet saadaan minimoitua (kuva 8).



Kuva 8. Taajuusmuuttajat keskitetysti päämuuntamon yhteydessä

Hajautetun ratkaisun tavoin päämuuntamoon sijoitettavat taajuusmuuttajat tarvitsevat jännitteen alennus- ja korotusmuuttajat, jolla sähköverkon jännitetaso saadaan muunnettua ensin taajuusmuuttajille sopivaksi ja taajuusmuutoksen jälkeen vastaamaan haluttua, maasähkömuuntamoille vietävää jännitettä. Lisäksi päämuuntamoon sijoitetaan erillinen muuntaja, jonka kautta jakeluverkosta tuodaan sähkö laiturikohtaisille maasähkömuuntamoille ilman taajuusmuutosta. Laiturikohtaiset maasähkömuuntamot varustetaan ainoastaan muuntajilla, joilla päämuuntamolta tuotava jännite nostetaan tai lasketaan aluksille sopivaksi, sekä keskijännitekojeistolla, johon sijoitetaan tarvittavat kytkin- ja suojalaitteet. Laiturikohtaisella muuntajalla saadaan jännitetaso muutoksen lisäksi aikaan myös galvaaninen erotus liitettävän aluksen ja sataman sähköverkon välille.

Jotta kahden laiturikohtaisen maasähkömuuntamon kautta pystyttäisiin syöttämään kahdelle eri alukselle eri taajuista sähköä samanaikaisesti, päämuuntamo tulee varustaa muuntajien ja taajuusmuuttajien lisäksi kaksoiskiskollisella keskijännitekojeistolla sekä tarvittavilla kytkin- ja suojalaitteilla. Kaksoiskiskon toiseen kiskoon tuodaan jännite jakeluverkosta muuntajan kautta ilman taajuusmuutosta ja toiseen taajuusmuuttajalaitteiston kautta. Soveltuvilla kytkinlaitteilla voidaan valita, kummasta kiskosta syöttö kulkekin maasähkömuuntamolle otetaan. Tämän ansiosta päämuuntamoon sijoitettava taajuusmuuttajalaitteisto voidaan mitoittaa niiden alusten tehontarpeen mukaan, joille on tarpeen syöttää 60 Hz:n taajuista sähköä. Erillisen muuntajan ja kaksoiskiskon ansiosta taajuusmuuttajista ei myöskään aiheudu häviöitä syötettäessä maasähköä alukselle, jonka sähköjakeluverkko toimii 50 Hz:n taajuudella.

Tämän ratkaisun heikkoutena on, että vian sattuessa taajuusmuuttajalaitteistossa, 60 Hz:n taajuisen sähkön jakelu päämuuntamolta maasähkömuuntamoille ja maasähkömuuntamoilta edelleen aluksille häiriintyy kaikkien laiturialueiden osalta. Kaksoiskiskojärjestelmä ja erillinen muuntaja ilman taajuusmuuttajalaitteistoa mahdollistaa vikatilanteissa kuitenkin 50 Hz:n kiskon käytön ja kyseisellä taajuudella toimivan sähkön syötön normaaliin tapaan.

3.2 Muuntajat

Maasähkömuuntamoihin asennettavissa kolmivaihemuuntajissa tulee standardin 80005-1 mukaisesti käyttää Dyn-kytkentää, jolloin muuntajan ensiökäämit kytketään kolmioon ja toisiokäämit tähteen [15, s. 19]. Muuntajien maadoitus tapahtuu niiden tähtipisteen kautta. Tähtipiste kytketään maahan resistanssin läpi, jonka avulla voidaan rajoittaa maavikavirtaa sekä transienttiylijännitteitä, mikäli resistanssin rajoittama virta on suurempi kuin järjestelmän kapasitiivinen varausvirta [19, s. 15]. Muuntajien käämityksissä tulee myös ottaa huomioon, että maasähkömuuntamossa sijaitsevaan muuntajan kautta sataman sähköverkosta syötettävän sähkön jännitetaso on tarvittaessa pystyttävä muuttamaan aluksesta riippuen joko 6,6 tai 11 kilovolttiin. Tämä onnistuu muuntajan välioton avulla.

Laiturikohtaisilla muuntajilla on jännitetason muunnoksen lisäksi monia muita hyötyjä syöttöjärjestelmän kannalta. Sähkö voidaan siirtää sataman sähköverkosta laiturialueella sijaitseville maasähkömuuntamoille korkeammalla jännitteellä ja pienemmillä kuormitusvirroilla vähentäen kaapeleista aiheutuvia häviöitä. Muuntajalla saadaan lisäksi aikaan standardin vaatima galvaaninen erotus eri potentiaalissa olevien sataman ja aluksen sähköverkkojen välille.

Huomioitavaa on, että syöttöjärjestelmässä joissa on mukana taajuusmuuttajia, samaa muuntajaa käytetään kaikilla asetetuilla taajuuksilla, millä on vaikutusta myös muuntajan toimintaan muun muassa sen impedanssin myötä. Impedanssiin vaikuttava ja vaihtovirran taajuudesta riippuva käämitysten induktiivisen reaktanssin suuruus voidaan määritellä kaavalla 3.1 [20, s. 7-8].

$$X_L = 2 * \pi * f * L \quad (3.1)$$

jossa

X_L on induktiivinen reaktanssi

f on vaihtovirran taajuus

L on induktanssiarvo

Mikäli muuntaja on suunniteltu toimivaksi 50 hertsin taajuudella ja sen läpi syötetään 60 Hz:n taajuista sähköä, sen käämitysten induktiivinen reaktanssi kasvaa aiheuttaen suurempia jännitehäviöitä itse muuntajassa. Tilanteessa jossa 60 hertsin muuntajalle syötetään 50 Hz:n taajuista sähköä, käämitysten reaktanssi pienenee mistä johtuen muuntajan läpi siirtyvä virta kasvaa. Riittävän suuri muutos taajuudessa voi nostaa muuntajan käämitysten virtaa niin paljon, että käämitykset vaurioituvat. Tästä syystä syöttöjärjestelmissä, joiden kautta on tarkoitus siirtää sähköä sekä 50, että 60 hertsin taajuudella, tulee niissä käytettävät muuntajat valita pienemmän käytettävän taajuuden mukaan.

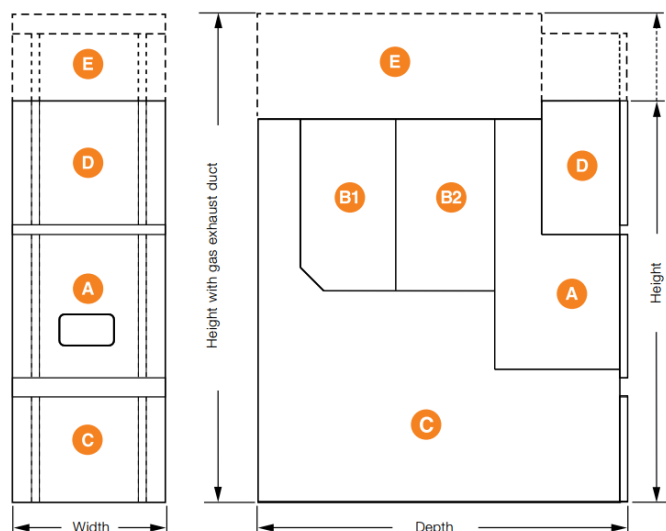
Muuntajien ensiöpiirin oikosulkusuojaus toteutetaan joko keskijännitekatkaisijoilla tai sulakkeilla ja toisiopiirin suojaus katkaisijoilla. Ensiö- ja toisiopiirit tulee myös varustaa ylikuormitussuojauksella sekä ylikuumenemistapauksia varten hälytysignaaliilla, jonka avulla alukseen lähetetään hälytys muuntajan lämpötilan noustessa yli sallitun rajan. [15, s. 19.]

3.3 Päämuuntamon keskijännitekojeisto

Ratkaisussa, jossa jokaista laiturialuetta palvelevat taajuusmuuttajat sijoitetaan keskitetysti päämuuntamotilaan, on sataman sähkönjakelu ja maasähkön syöttö eri aluksille pystyttävä suorittamaan samanaikaisesti kahdella eri taajuudella. Kahdella eri taajuudella tapahtuva sähkönjakelu voidaan toteuttaa keskijännitekojeistolla jossa on kaksoiskisko. Valmistajien ratkaisuja tutkimalla kaksoiskiskokojeistoja toteutetaan sekä kaas- että ilmaeristeisinä.

ABB:n UniGear ZS1 on metallikoteloitu ilmaeristeinen keskijännitemoduulikojeisto kaksoiskiskolla, joka soveltuu asennuksiin, joiden nimellisjännite ei ylitä 24 kilovolttia. Kaksoiskiskosta johtuen jokaiseen kennoon kuuluu kaksi kaksiasentoista kiskoerotinta lukituksilla, joiden avulla erottimien väärät kytkennät, kuten kytkennät molempiin kiskoihin samanaikaisesti, estetään. Erottimia voidaan operoida käsikäyttöisesti tai moottoriohjauksella, jolloin maasähkömuuntamo syöttävän kiskon valinta onnistuu myös etähallinnan avulla [21, s. 64].

Kojeiston kennot on jaettu kuvan 9 mukaisesti laitetilaan (A), kokoojakiskotiloihin (B1 ja B2) sekä kaapelitilaan (C). Kojeistossa on myös toisiokojetila (D) ja purkauskanava (E) valokaaren synnyttämien kaasujen poistamiseksi. Jokaisessa tilassa on luukku purkauskanavaan, joka avautuu vian yhteydessä syntyvän paineen ansiosta mahdollistaen kaasujen siirtymisen pois kojeistosta.



Kuva 9. UniGear Z21 keskijännitekojeisto [21, s. 71]

Päämuuntamon keskijännitekojeiston kennojen laitetilat varustetaan katkaisijoilla, jotka voivat olla tyypiltään esimerkiksi tyhjiö- tai kaasukatkaisijoita. Kaasukatkaisijoissa käytetään yleisesti eristeenä hajutonta, myrkytöntä ja palamatonta SF₆-kaasua, jonka eriste- ja sammutusominaisuudet sekä lämmönjohtokyky ovat ilmaan verrattuna parempia [22, s. 5]. ABB:n HD4 SF₆-katkaisijat soveltuvat nimellisjännitteeltään 12–40,5 kV syöttöihin, ja ne voidaan toteuttaa joko kiinteinä tai ulosvedettävänä vaunukatkaisijoina.

Satamassa, jossa halutaan syöttää maasähköä aluksille kahden laiturin kautta samanaikaisesti eri taajuuksilla, tulee keskijännitekojeistoon varata kaksi tulokennoa sekä kaksi lähtökennoa. Toinen tulokennoista syöttää yhtä kokoojakiskoa taajuusmuuttajan, jännitteen korotusmuuttajan sekä keskijännitekatkaisijan kautta 60 Hz:n taajuudella. Toinen kisko saa syöttönsä erillisen muuttajan ja katkaisijan kautta, jolloin sähkönjako tämän kiskon kautta onnistuu 50 Hz:n taajuudella. Kojeiston lähtökennot syöttävät laiturikohtaisia maasähkömuuntamoita katkaisijoiden kautta.

3.4 Maasähkömuuntamon keskijännitekojeisto

Laiturikohtaisen maasähkömuuntamon muuttajan toisiopuolen keskijännitekojeisto voidaan toteuttaa pienemmällä kojeistolla kuin päämuuntamotilassa, sillä kojeistoon ei tarvita kaksoiskiskoa.

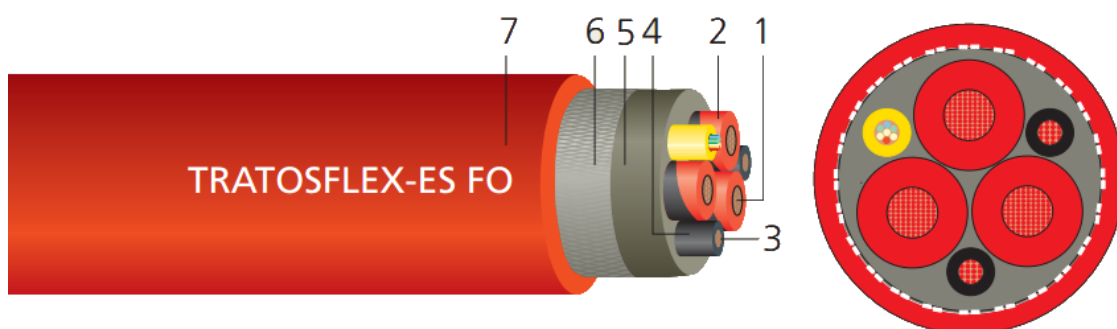
ABB:n Uniswitch on kevyt ilmaeristeinen moduulikojeisto, joka soveltuu moniin eri käyttötarkoituksiin laajan kennotyyppivalikoiman ja käyttöturvallisuuden vuoksi [23, s. 3]. Muuttajan toisiopuoli yhdistetään keskijännitekojeiston kiskoon katkaisijan läpi. Katkaisijoina voidaan käyttää vastaavanlaisia SF₆-katkaisijoita kuin päämuuntamon keskijännitekojeistossa. Kisko saa tarvittaessa syöttönsä muuttajalta myös välioton kautta, jolloin syötettävä jännite pystytään valitsemaan maasähköjärjestelmään liitettävälle alukselle sopivaksi.

Jokaisen maasähkömuuntamon keskijännitekojeiston kennot, johon laiturialueella sijaitsevalle syöttöpisteelle vietävät kaapelit kiinnitetään, varustetaan kolmiasentoisilla kuormanerotimilla (kiinni – auki – maadoitus), jotta liittymiskaapelin jännitteettömyys voidaan varmistaa maadoittamalla ennen aluksen liittämistä maasähköjärjestelmään. Kuormanerotimet voivat olla tyypiltään esimerkiksi ABB SHS2. SHS2-erottimissa käytetään eristeaineena katkaisijoiden tavoin SF₆-kaasua [24, s. 2].

3.5 Liittymiskaapeli

Maasähkön syöttöjärjestelmissä aluksen ja sataman sähköverkon välinen liittymiskaapeli altistuu mekaaniselle rasitukselle sekä monille ympäristön vaikutuksille, kuten auringon säteilylle ja merivedelle, aluksen ollessa liittyneenä sataman sähköverkkoon sekä kaapelin ollessa käyttämättömänä joko aluksen kannella tai satamassa. Tästä syystä järjestelmissä käytettävien liittymiskaapeleiden ulkovaipan materiaalin tulee hylkiä öljyä, kestää meri-ilman ja -veden sekä UV-valon vaikutukset ja olla vähintään standardin IEC 60332-1-2 vaatimusten mukaisesti paloa hidastavia [15, s. 27].

Taipuisat kaivoskaapelit soveltuvat hyvin syöttöjärjestelmien liittymiskaapeleiksi sillä ne on suunniteltu käytettäväksi vaativissa olosuhteissa ja ne kestävät hyvin mekaanista rasitusta. Kuvassa 10 on esitetty ominaisuuksiltaan liittymiskaapeleiksi soveltuvan, kaivosolosuhteissakin käytettävän Tratosflex-ES FO-keskijännitekaapelin poikkileikkauskuva ja kaapelitiedot.



- Rated Voltage 3,6/6 kV 6/10 kV 8,7/15 kV 12/20 kV
- Max Voltage AC 4,2/7,2 kV 6,9/12 kV 10,4/18 kV 13,9/24 kV
- AC Voltage Test 11 kV 17 kV 24 kV 29 kV

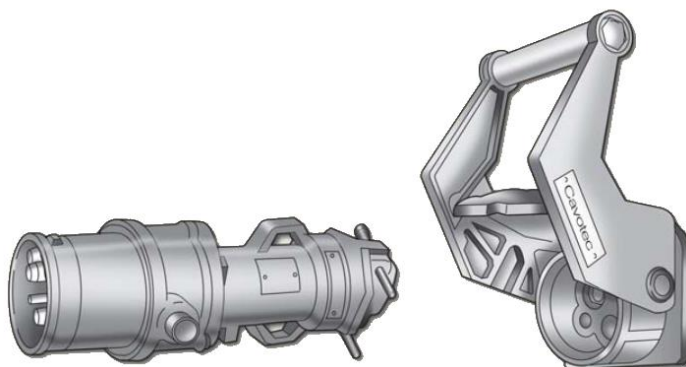
Part Number	Nominal Cross Section mm ²	Nominal Conductor Diameter mm	Maximum Conductor DC Resistance at 20 °C Ω/Km	Maximum Permanent Tensile Load N	Maximum Dynamical Tensile Load During Acceleration Process N	Minimum Overall Diameter mm	Maximum Overall Diameter mm	Nominal Cable Weight Kg/m
6/10 kV (N)TSCGEWÜ								
FDD325F	3x25+2x25/2+FO**	6,5/4,8	0,795/0,795*	3000	4125	42,5	45,5	2,560
FDD335F	3x35+2x25/2+FO**	7,8/4,8	0,565/0,795*	3000	4125	44,2	47,2	3,050
FDD350F	3x50+2x25/2+FO**	9,5/4,8	0,393/0,795*	3600	5250	48,2	50,2	3,520
FDD370F	3x70+2x35/2+FO**	11,4/5,4	0,277/0,565*	5000	7500	50,0	54,2	4,700
FDD395F	3x95+2x50/2+FO**	13,0/6,4	0,210/0,393*	6500	8900	55,4	59,4	5,880
FDD30AF	3x120+2x70/2+FO**	14,7/7,8	0,164/0,277*	7500	10800	60,6	64,6	6,950
FDD30BF	3x150+2x70/2+FO**	16,5/7,8	0,132/0,277*	9000	12000	64,0	68,0	8,600
FDD30CF	3x185+2x95/2+FO**	18,3/9,3	0,108/0,210*	11100	14000	69,3	73,3	10,300

Kuva 10. Tratosflex-ES FO-keskijännitekaapeli [25, s. 30-31]

Kaapelissa on kolme vaihejohtinta, maadoitusjohtimet sekä valokuidut aluksen ja sataman välistä tiedonsiirtoa varten. Vaihejohtimina käytetään kupariköysiä.

Liittymiskaapeleina käytettävien keskijännitekaapeleiden tulee myös läpäistä standardin IEC 60092-354 tai IEEE Std 1580 mukaiset testit seuraavin lisäyksin:

- Taivutustesti (IEC/ISO/IEEE 80005-1:2012)
- Ulkovaipan UV-kestoisuus (ISO 4892-2:2006)
- Ulkovaipan hankaustesti (ISO 4649:2010)
- Polttotestit (IEC 60332-1-2)
- Kaapelin käyttäytyminen alhaisissa lämpötiloissa, $-40\text{ °C} \pm 2\text{ °C}$ (IEC 60092-350:2008)
- Maadoitusjohtimen ja puolijohtavan kerroksen välinen resistanssi.



Kuva 11. Pistoke ja pistorasia (Kuva: Cavotec)

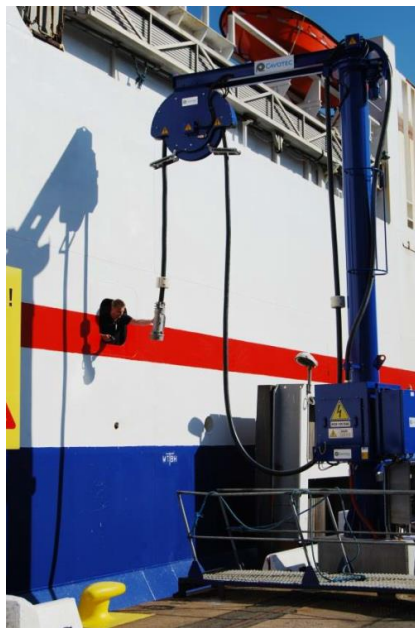
Kuvassa 11 on esitetty liittymiskaapelin päähän asennettava pistoke sekä liitännäspisteessä sijaitseva pistorasia, johon pistoke ja liittymiskaapeli lukitaan paikoilleen.

3.6 Kaapelinkäsittelylaitteisto

Kaapelinkäsittelylaitteiston tehtävänä on helpottaa aluksen ja sataman sähköverkon välisten keskijännitekaapeleiden käsittelyä sekä valvoa liitännän turvallista toimintaa. Laitteisto voi esimerkiksi lähettää hälytyssignaalin tai katkaista syötön tilanteessa, jossa alus siirtyy yli sallitun liikkumisalueen ja kaapelissa ilmenee sen myötä rajat ylittävää

vetojännitystä. [15, s. 23] Standardin IEC/ISO/IEEE 80005-1:2012 liitteissä B–F on tarkennettu kaapelinkäsittelylaitteiston sijainti erityyppisille aluksille tarkoitetuissa satamissa.

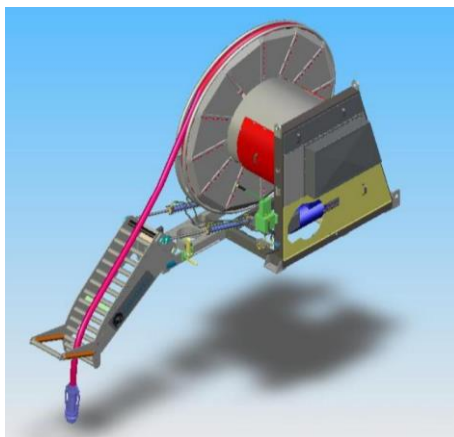
Kaapelinkäsittelylaitteisto tulisi sijoittaa RoRo-, matkustaja- ja säiliöaluksille tarkoitetuissa satamissa laituralueelle. Rakenteeltaan laitteisto voi olla esimerkiksi kuvassa 12 esitetyn kaltainen, kiinteästi sataman puolelle asennettava puominostintyyppinen ratkaisu. Vastaavanlaiset laitteistot soveltuvat erityisesti laitureille, joihin ankkuroituu vain tiettyntyyppisiä aluksia ja joiden liitântäkaapelin kytkentäpiste sijaitsee samassa kohdassa alusta. Nostimen korkeus sekä poikkipuomin pituus on mahdollista määrittellä suunnitteluvaiheessa laituria ja syöttöjärjestelmää käyttävien alusten kylkiaukon sijainnin mukaan. Puomia on myös mahdollista kääntää sivuttaissuunnassa, minkä myötä liittämässä on pientä säätövaraa, mikäli aukkojen sijainnissa on eroavaisuuksia.



Kuva 12. Kaapelinkäsittelylaitteisto (Kuva: Cavotec)

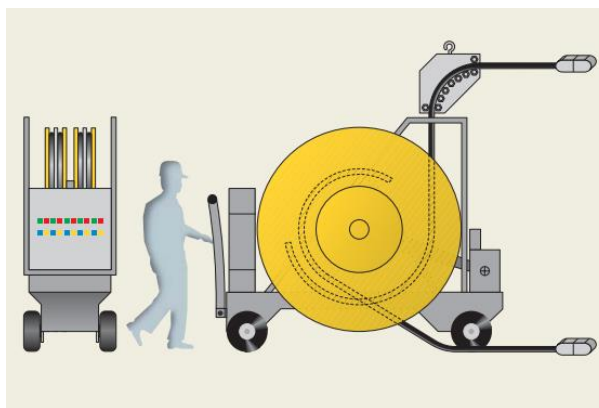
Maasähkömuuntamolta tuotava maakaapeli kytketään nostimen kyljessä olevassa liitântäkotelossa varsinaiseen liittämiseen käytettävään kaapeliin. Tämän jälkeen liittämiskaapeli syötetään nostimen nokkaan asennettavan moottoriohjatun syöttölaiteen kautta aluksen kyljestä aukeavalle aukolle, jonka läpi kaapeli viedään aluksessa sijaitsevalle liitântäpisteelle. Nostimen ja sen nokassa sijaitsevan kaapelisyöttimen ohjaaminen tapahtuu erillisen ohjauspaneelin avulla.

Konttialussatamissa laituripinta-ala on tarkoin käytössä alusten kuljettamien konttien lastaus- sekä purkuoperaatioita sekä operaatioissa käytettäviä nostureita varten, mistä johtuen laitureille ei useimmiten ole järkevää tai mahdollista sijoittaa kuvassa 12 esitetyn kaltaista kiinteää kaapelinkäsittelylaitteistoa. Tästä syystä syöttöjärjestelmän liittymiskaapeli sijaitsee konttialuksen kannella, josta se lasketaan kuvan 13 kaltaisen kaapelikelalaitteiston avulla laiturialueella sijaitsevalle järjestelmän satamanpuoleiselle liitäntäpisteelle.



Kuva 13. Aluksen kannelle asennettava maasähkön liittymiskaapeli sekä kaapelikelalaitteisto (Kuva: Cavotec)

Kiinteästi asennettavien puominostintyyppisten laitteistojen ja kaapelikelojen lisäksi kaapelinkäsittely sekä liittyminen sataman sähköverkkoon on mahdollista toteuttaa myös liikuteltavilla laitteilla. Kuvassa 14 on esitetty eräänlainen renkaiden varaan asennettu kaapelinkäsittelylaitteisto, joka mahdollistaa laitteiston siirtämisen syöttöjärjestelmää käyttävän aluksen liitäntäpisteen mukaan.



Kuva 14. Liikuteltava kaapelinkäsittelylaitteisto (Kuva: Cavotec)

Liikuteltavan kaapelinkäsittelylaitteiston myötä satamaan tai alukselle ei ole tarpeen asentaa kiinteitä nostimia tai kaapelikeloja. Laitteiston liittymiskaapelin toinen pää kytetään laiturialueella sijaitsevaan syöttöpisteeseen ja toinen pää viedään syötinlaitteen kautta aluksen liitäntäpisteelle.

3.7 Sataman sähköverkosta syötettävän maasähkön laatu

Standardi asettaa vaatimukset myös aluksia syöttäville verkoille. Sähköverkon tulee pystyä ylläpitämään aluksen jakelujärjestelmän jännite- ja taajuustasot sekä särökerroimet (*THD, total harmonic distortion*) alla kuvatuin edellytyksin [15, s. 17–18].

Jännite- ja taajuustasot

- Maasähkön syöttöjärjestelmien yhtenäistämiseksi eri satamissa tulee liittymisen aluksiin toteuttaa galvaanisesti sataman sähköverkosta erotetulla 6,6 ja/tai 11 kV:n nimellisjännitteellä.
- Satamissa, joissa toistuvasti liikennöivät alukset käyttävät aina samoja, niille osoitettuja laituripaikkoja, voidaan harkita myös muita IEC:n mukaisia standardijännitteitä.
- Sataman sähköverkon ja siellä liikennöivien alusten taajuustasojen tulee olla yhteneväiset, muutoin tarvitaan taajuusmuutokseen 50/60 Hz käytettävä laitteisto.

Jännite- ja taajuustoleranssit

- Taajuus ei saa ylittää kuormittamattoman ja nimelliskuormitetun tilan välillä ± 5 %:n vaihtelua.
- Kuormittamattomassa tilassa jännite ei saa ylittää 6 %:n jännitteennousua eikä alittaa -3,5 %:n jännitteenalenemää nimellisjännitteeseen verrattuna.

Jännite- ja taajuustransientit

- Jännitteessä ei saa tapahtua yli +20 %:n jännitepiikkiä tai alle -15 %:n jännitekuoppaa
- Taajuus ei saa ylittää ± 10 %:n vaihteluväliä.

Yliaallot kuormittamattomassa tilassa

- Yksittäiset yliaallot +3 %
- THD +5 %.

Näiden vaatimusten lisäksi tulee ottaa huomioon myös viranomaisten ja sataman sähköverkon haltijoiden ohjeet ja määräykset. Arvot tulee määrittää syöttöjärjestelmän liittymiskaapeleiden satamanpuoleisessa liitännäspisteessä ja laskennasta saadut tulokset on dokumentoitava.

4 Järjestelmän suunnittelun lähtökohdat

Maasähkön syöttöjärjestelmän suunnittelu käynnistyy sataman ja siellä risteilevien alusten tarpeiden sekä olemassa olevien kytkentämahdollisuuksien kartoittamisella. Lisäksi selvitetään, tullaanko syöttöjärjestelmä toteuttamaan yleisesti satamassa vieraillevien alusten käyttöön vai ainoastaan jonkin tietyn aluksen reittiliikennettä varten varatulle laiturialueelle.

Järjestelmää käyttävien alusten ominaisuudet

Syöttöjärjestelmää käyttävien alusten tyypit, sisäisten sähköjakelujärjestelmien jännite- ja taajuustasot sekä laiturissa olon aikaiset tehontarpeet tulee määrittää, jotta asennettavan laitteiston kapasiteetti voidaan mitoittaa järjestelmän käyttötarkoitukseen sopivaksi.

Sähköverkon ominaisuudet

Sataman sähköverkosta tulee selvittää sen jännite- ja taajuustaso sekä siirtokapasiteetti jopa kaupunginosan sähkönkulutusta vastaavan kulutuspisteen liittämiseksi siihen.

Taajuuden muutos

Taajuuden muutokseen käytettävä laitteisto on tarpeen suunnitella osaksi syöttöjärjestelmää mikäli siihen liitettävien alusten ja sataman sähköverkon taajuudet eivät vastaa

toisiaan. Taajuusmuuttajat voidaan sijoittaa esimerkiksi sataman päämuuntamon tai laiturikohtaiseen maasähkömuuntamon yhteyteen laiturialueelta varatun tilan ja halutun käyttövarmuuden mukaan.

Syöttöjännite

Syöttöjännitteenä tulee standardin 80005-1 mukaan käyttää joko 6,6 tai 11 kilovolttia, mistä johtuen erityisesti vanhemmille aluksille on asennettava erillinen muuntaja jännitteen laskemiseksi sisäisen sähkönjakelun jännitetasoa vastaavaksi.

Maasähkömuuntamoiden sijoittelu

Vilkaasti liikennöidyille laiturialueille rakennettavien maasähkömuuntamoiden sijoittelussa tulee ottaa huomioon muun muassa laiturialueella tapahtuvaa muuta toimintaa silmälläpitäen riittävät turvaetäisyydet valokaarien aiheuttamien kaasujen poistokanavia varten.

5 Esimerkkisatama

Tässä osiossa tarkastellaan maasähkön syöttöjärjestelmän rakennetta ja oikosulkuvirtoja matkustajasataman laajennuksen yhteydessä, jonka myötä kahdella uudella laiturialueella varaudutaan maasähkön syöttöjärjestelmän toteuttamiseen satamassa päivittäin vieraileville sisaraluksille.

Laiturit ovat käytössä pelkästään kyseisten alusten reittiliikennettä varten joten maasähköjärjestelmän kapasiteetti mitoitetaan vastaamaan näiden alusten tarpeita. Kunkin aluksen laiturissa olon aikainen tehontarve on 2 500 kW, ja sisäisten sähkönjakelujärjestelmien jännitetaso 400 V sekä taajuus 50 Hz. Sataman laajennusalueelle tuodaan 10 kV:n jakeluverkosta uusi liittymä uutta terminaalarakennusta, aluesähköistystä sekä syöttöjärjestelmiä varten. Liittymän näennäisteho on arviolta 8 MVA.

5.1 Maasähköjärjestelmän rakenne

Satamaan suunnitellun maasähkön syöttöjärjestelmän rakenne on esitetty liitteessä 1.

10 kV:n jakeluverkosta tuodaan uusi liittymä alueen päämuuntamolle, josta laiturikohtaisia maasähkömuuntamoita syötetään säteittäisesti. Päämuuntamoon ei ole tarpeen asentaa syöttöjärjestelmää varten erillistä muuntajaa, vaan sähkö voidaan siirtää suoraan jakeluverkosta jakeluverkon jännitteellä laiturikohtaisille maasähkömuuntajille. Maasähkömuuntajien avulla jännitetaso nostetaan 11 kilovolttiin vastaamaan aluksille vietävää jännitettä ja saadaan jännitteen muunnoksen lisäksi aikaan galvaaninen erotus eri potentiaalissa olevien sataman ja alusten sähköverkkojen välille.

Järjestelmää käyttävien alusten sähkönjakeluverkot sekä sataman sähköverkko toimivat samalla taajuudella, mistä johtuen syöttöjärjestelmään ole tarpeen asentaa taajuusmuutosta varten siihen käytettävää laitteistoa.

Kaapelinkäsittelylaitteisto toteutetaan kiinteästi laiturialueelle asennettavana puominostintyyppisenä ratkaisuna, sillä syöttöjärjestelmää käyttävät alukset kiinnittyvät laituriiin aina samalla tavalla ajorampin sijainnin vuoksi. Nostimen poikkipuomin nokkaan asennetaan syötinlaite helpottamaan liittymiskaapelin vetämistä aluksen liitäntäpisteelle.

Aluksille tulee asentaa maasähkön käyttöönottoa varten erilliset muuntajat, joilla 11 kV:n keskijännite muunnetaan 400 voltin pienjännitteeksi vastaamaan alusten sähkönjakeluverkkojen jännitetasoa.

5.2 Kuormitusvirtojen tarkastelu

Vertailun vuoksi tarkastellaan järjestelmän kuormitusvirtoja päämuuntamolta maasähkömuuntamolle sähkönjakelun ja tehonsiirron tapahtuessa 10 sekä 20 kilovoltin jännitteellä. Maasähkömuuntamolta laiturikohtaisen syöttöpisteen kautta aluksille tapahtuvassa tehonsiirrossa tarkastellaan virtoja 400 voltin pienjännitteellä ja standardinmukaisilla 6,6 ja 11 kilovoltin keskijännitteillä. Kuormitusvirrat voidaan laskea jännitteen, arvioidun tehokertoimen ja syötettävän näennäistehon avulla.

Maasähkömuuntamoiden syöttö tapahtuu säteittäisesti päämuuntamolta, joten 2500 kilowatin pätötehon siirtäminen 10 kilovoltin jännitteellä yhdelle maasähkömuuntamolle synnyttää kuormitusvirtaa arviolta 180 ampeeria. 20 kilovoltilla kuormitusvirta on 90 A. Kahden maasähkömuuntamon päämuuntamoita kuormittavat kokonaiskuormitusvirrat 10 ja 20 kV jännitetasoilla on esitetty taulukossa 3.

Taulukko 3. Päämuuntamon kuormitusvirrat

Kuormittaja	10 kV	20 kV
Maasähkömuuntamo 1 (2500 kW)	180 A	90 A
Maasähkömuuntamo 2 (2500 kW)	180 A	90 A
Yhteensä (5000 kW)	360 A	180 A

Keskijännitejakelun etuna on, että 10 kV jännitetasolla kutakin maasähkömuuntamoita on mahdollista syöttää yhdellä, kuormitettavuudeltaan riittävällä keskijännitemaakaapelilla, joka voi olla esimerkiksi tyyppiä AHXAMK-W 3x95Al+35Cu. Jännitetason nostaminen 20 kilovolttiin laskisi edelleen kuormitusvirtaa ja sen myötä käytettävän kaapelin kokoa. Tällöin 2500 kW:n tehonsiirto synnyttäisi 90 ampeerin kuormitusvirran, joka olisi mahdollista siirtää yhtä AHXMK-W 3x50Al+35Cu –maakaapelia pitkin, jonka kuormitettavuus maa-asennuksissa on 155 A.

Maasähkömuuntamoilta laiturikohtaisille syöttöpisteille siirrettävät tehot synnyttää kuormitusvirtaa 400 voltin pienjännitteellä arviolta 4500 A, 6,6 kilovoltin keskijännitteellä 273 A ja 11 kilovoltin keskijännitteellä 164 A. Kuten saaduista kuormitusvirta-arvoista nähdään, maasähkömuuntamolta laiturikohtaisen syöttöpisteen kautta alukselle tapahtuvassa tehonsiirrossa kuormitusvirrat olisivat pienjännitteellä laskelmien mukaan useiden kiloampeerien luokkaa. Tästä johtuen järjestelmään tulisi varata Katajanokan terminaalien tavoin useita pienjänniteliittymiskaapeleita, jotta siirrettävän tehon synnyttämä kuormitusvirta kaapelia kohti saataisiin jaettua tasaisesti. 11 ja 6,6 kilovoltin jännitetasoilla tehonsiirto on mahdollista suorittaa yhtä liittymiskaapelia käyttäen.

Käytännössä maasähköä olisi mahdollista syöttää aluksille myös ilman laiturikohtaista muuntajaa sataman sähköverkon 10 kilovoltin jännitetasolla. Tällöin ei saataisi kuitenkaan aikaan galvaanista erotusta eri potentiaalissa olevien sähköverkkojen välille. Tässä tilanteessa aluskohtaisella muuntajalla, jolla 10 kV laskettaisiin vastaamaan aluksen sähkönsyöttöjärjestelmän jännitetasoa, galvaaninen erotus saavutettaisiin joissain määrin.

5.3 Järjestelmän oikosulkulaskelmat

Standardin 80005-1 mukaisesti satamaan asennettaville maasähkön syöttöjärjestelmille tulee määrittää prospektiiviset oikosulkuvirrat kohdassa, jossa alus tullaan kiinnittämään sataman sähköverkkoon. Oikosulkuvirtojen laskeminen tämän tyyppisissä järjestelmissä onnistuu tietokoneavusteisesti nykyaikaisilla laskenta- ja mitoitusohjelmilla. Oikosulkuvirtoja voidaan myös tarkastella matemaattisesti esimerkiksi Thévenin teoreemaan pohjautuvan piirianalyysimenetelmän avulla.

Maasähkijärjestelmän yksi- kaksi- ja kolmivaiheisten oikosulkuvirtojen määrittely onnistuu kaavojen 5.1, 5.2 ja 5.3 avulla [26, s. 10].

$$I_{k1} = \frac{c \cdot U_N}{Z_1 + Z_2 + Z_0} \quad (5.1)$$

$$I_{k2} = \frac{c \cdot U_N}{Z_1 + Z_2} \quad (5.2)$$

$$I_{k3} = \frac{c \cdot U_N}{\sqrt{3} \cdot Z_1} \quad (5.3)$$

joissa

c on taulukon 4 mukainen jännitekerroin

U_N on vikapaikan nimellispääjännite

Z_1 on oikosulkupiirin myötäimpedanssi

Z_2 on oikosulkupiirin vastaimpedanssi

Z_0 on oikosulkupiirin nolaimpedanssi

Taulukko 4. Jännitekerroimet standardin VDE/IEC 60909 mukaan.

Nimellisjännite U_N	Jännitekerroin c_{max}	Jännitekerroin c_{min}
Pienjännite 230/400 V	1,00	0,95
Muut pienjännitteet	1,05	1,00
Keskijännite 1 kV–35 kV	1,10	1,00
Suurjännite 35 kV–230 kV	1,10	1,00

joissa

c_{max} on jännitekerroin suurinta oikosulkuvirtaa laskettaessa

c_{min} on jännitekerroin pienintä oikosulkuvirtaa laskettaessa

5.3.1 Impedanssien määrittely

Maasähkön syöttöjärjestelmässä oikosulkuvirtaa syöttävänä komponenttina toimii jakeluverkko ja sitä rajoittavina komponentteina muun muassa maasähkömuuntajat, kaapelit sekä kiskot. Oikosulkuvirtojen laskemista varten tulee oikosulkupiirin eri komponenteille määrittellä niiden impedanssit.

Syöttävä verkko

Syöttävän verkon impedanssi voidaan määrittellä kaavalla 5.4 kun tunnetaan verkon alkuoikosulkuvirta I''_{kv} tai näennäinen alkuoikosulkuteho S''_{kv} [26, s. 15].

$$Z_{kv} = \frac{c \cdot U_N^2}{S''_{kv}} = \frac{c \cdot U_N}{\sqrt{3} \cdot I''_{kv}} \quad (5.4)$$

jossa

U_N on syöttävän verkon nimellispääjännite

S''_{kv} on syöttävän verkon näennäinen alkuoikosulkuteho

I''_{kv} on syöttävän verkon alkuoikosulkuvirta

c on taulukon 3 mukainen jännitekerroin

Kaapelit

Syöttöjärjestelmissä käytettävien kaapeleiden impedanssit voidaan määrittää sijoittamalla kaapelivalmistajien ilmoittamat resistanssi- ja reaktanssiarvot sekä kaapeliyhteyden pituus kaavaan 5.5. Kaapeleiden resistanssiin vaikuttavat myös käyttölämpötila sekä virran ahto, jotka voidaan tarvittaessa huomioida kaavalla 5.6 [26, s. 20–21].

$$Z_j = (r + jx) \cdot l \quad (5.5)$$

jossa

r on kaapelin tasavirtaresistanssi pituusyksikköä kohti

x on kaapelin reaktanssi pituusyksikköä kohti

l on kaapelin pituus

$$R = [1 + \alpha_{20} * (v - 20^{\circ}\text{C})] * (R_{20} + \Delta R) \quad (5.6)$$

jossa

α_{20} on resistanssi lämpötilakerroin

v on lämpötila, jossa resistanssi halutaan laskea

R_{20} on tasavirtaresistanssi 20 °C lämpötilassa

ΔR on lisäresistanssi, jolla huomioidaan virran ahdon aiheuttamat lisähäviöt

Muuntajat

Kaksikäämisten muuntajien verkon oikosulkuvirtoihin vaikuttavat suureet on mahdollista määrittellä kaavoilla 5.5–5.7 valmistajan ilmoittaman prosentuaalisen oikosulkujännitteen u_k sekä muuntajan resistanssin aiheuttaman oikosulkujännitteen u_r avulla [27, s. 18].

$$Z_k = \frac{u_k}{100} * \frac{U_N^2}{S_N} \quad (5.7)$$

$$R_k = \frac{u_r}{100} * \frac{U_N^2}{S_N} = \frac{P_{kN}}{3 * I_N^2} \quad (5.8)$$

$$X_k = \sqrt{Z_k^2 - R_k^2} \quad (5.9)$$

joissa

Z_k on muuntajan oikosulkuimpedanssi

R_k on muuntajan oikosulkuresistanssi

X_k on muuntajan oikosulkureaktanssi

U_N on muuntajan nimellispääjännite

I_N on muuntajan nimellisvirta

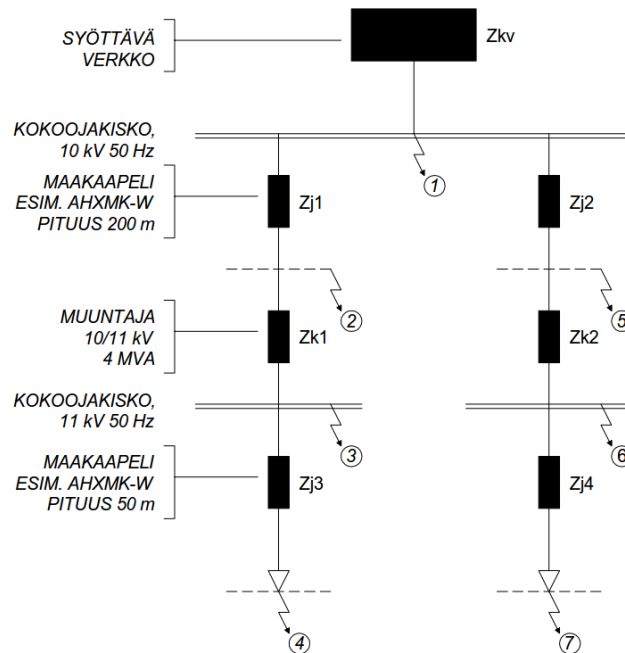
S_N on muuntajan nimellinäennäisteho

P_{kN} on muuntajan kokonaispätötehohäviöt nimellisvirralla

u_k on muuntajan oikosulkujännite prosentteina

u_r on muuntajan resistanssin aiheuttama oikosulkujännite prosentteina

Suunnitellusta maasähkön syöttöjärjestelmän impedansseista voidaan piirtää kuvan 15 kaltainen kuvaaja, johon on koottu järjestelmän kaikki oikosulkulaskennassa käytettävät impedanssikomponentit. Komponenteille määritellään edellisten kaavojen ja valmistajilta saatavien tietojen mukaan oikosulkuvirtoihin vaikuttavat impedanssit.



Kuva 15. Maasähköjärjestelmän impedanssikomponentit

5.3.2 Tulokset

Varsinaisessa oikosulkuvirtojen laskennassa käytetään ABB:n kehittämää ABB DOC-mitoitusohjelmaa, johon mallinnetaan järjestelmän rakenne liitteessä 1 esitetyn yksivivaisen esitystavan mukaan. Alkuoikosulkuvirraksi asetetaan 8,6 kA, joka on jakeluverkon loppusolmun kolmivaiheinen oikosulkuvirta sähköverkkoyhtiön laatimien laskelmien mukaisesti. ABB DOC:n standardin IEC 60909-1 mukaisesti suorittaman laskennan avulla voidaan poimia saaduista tuloksista järjestelmän 3- ja 2-vaiheiset oikosulkuvirrat taulukkoon 5 kuvassa 15 esitetyissä kohdissa 1–7. Taulukon lisäksi laskennasta saadut tulokset on esitetty kokonaisuudessaan liitteessä 2.

Taulukko 5. Maasähköjärjestelmän 3- ja 2-vaiheiset oikosulkuvirrat

Positio	I_{k3}	I_{k2}
1	8,60 kA	7,45 kA
2	8,60 kA	7,45 kA
3	2,56 kA	2,22 kA
4	2,55 kA	2,21 kA
5	8,60 kA	7,45 kA
6	2,56 kA	2,22 kA
7	2,55 kA	2,21 kA

Oikosulkulaskennan lisäksi ohjelma mitoittaa järjestelmään sijoitettavat kaapelit, katkaisijat sekä erottimet niiden kuormitusvirran ja prospektiivisten oikosulkuvirtojen mukaan.

Päämuuntamon lähtöpuolen sekä maasähkömuuntajan toisiopuolen katkaisijoiksi ohjelma määrittelee ABB HD4/R-SEC 12 08 – 25 -katkaisijat REF601 CEI 0-16 -suojareleillä sekä KECA250B1 (250A) -virtamuuntajilla. Maasähkömuuntamon syöttöjen kuormanerotimet ovat tyyppiä SHS2/IB 24.04.12.

6 Yhteenveto

Satamaorganisaatiot sekä varustamot osoittavat jatkuvasti suurempaa kiinnostusta vaihtoehtoisten polttoaineinfrastruktuurien käyttöönotolle, joiden myötä aluksista aiheutuvia päästöjä satama-alueilla voidaan vähentää ja samalla luodaan entistä ympäristöystävällisempää kuvaa merkittävälle toimijalle kansainvälisen kaupan saralla. Kiristyvät rikkipitoisuusvaatimukset meriliikenteessä käytettävälle dieselille näkyvät myös polttoaineiden hinnassa, minkä myötä maasähkön käyttöä voidaan pitää varteenotettava vaihtoehtona tehontarpeen kattamiselle alusten ollessa laiturissa niin taloudellisesta kuin ympäristöäkin huomioivasta näkökulmasta katsottuna.

Aihe insinööriyölle syntyi tarpeesta selvittää maasähkön syöttöjärjestelmien vaatimuksia ja suunnittelun lähtökohtia maasähkön syötön mahdollistamiseksi matkustajasatamassa vieraileville aluksille. Työtä lähdettiin viemään eteenpäin tutkimalla vuonna 2012 julkaistua standardia IEC/ISO/IEEE 80005-1 ”Utility connections in port – Part 1: High Voltage Shore Connection (HVSC) Systems – General requirements”. Standardin lisäksi aineistoa kerättiin aiheeseen liittyvän kirjallisuuden ja tehtyjen tutkimusten muodossa. Lisäksi tutkittiin toteutuneiden syöttöjärjestelmien ratkaisuja ja käytön vaikutuksia laadittujen seurantaraporttien pohjalta ja tavattiin alalla toimivien valmistajien edustajia.

Suunnittelu- ja konsulttitoimiston pääasiassa kiinteistöjen sähköiseen talotekniikkaan erikoistuneessa yksikössä ei aiemmin ollut laadittu suunnitelmia maasähkön syöttöjärjestelmiin liittyen, mistä johtuen aihealueen rajauksessa päädyttiin käsittelemään järjestelmää kokonaisuutena varsinaista suunnittelutyötä silmälläpitäen, eikä keskitytty ainoastaan jonkin tietyn järjestelmäosan tarkasteluun. Syvällisempää tutkimusta olisi mahdollista tehdä järjestelmän osalta monella eri tapaa, kuten tarkastelemalla siihen asennettavien suojalaitteiden toimintaa simuloimalla erilaisia vikatilanteita sataman sekä aluksen sähköverkoissa tai perehtymällä tarkemmin järjestelmän maadoitukseen ja potentiaalintasaukseen.

Oman haasteensa työlle toi suomenkielisen aineiston puute sekä toistaiseksi vielä vähäinen kokemus vasta julkaistun standardin mukaisten maasähkön syöttöjärjestelmien suunnittelusta ja siihen käytettävien laitteistojen toteuttamisesta Suomessa. Vierailu Helsingin sataman Katajanokan terminaalissa antoi hyvän katsauksen maasähkölle järjestelmän toimintaan vuonna 2012 käyttöönotettuun järjestelmään tutustumalla. Aluskoh-

taisesti räätälöityä pienjänniteratkaisua ei voitu kuitenkaan käyttää mallina tässä työssä luonnostellulle matkustajasataman maasähkön syöttöjärjestelmälle, jonka kautta sähkö siirretään aluksille 11 kV:n keskijännitteellä ja jonka suunnittelussa otettiin huomioon myös standardin 80005-1 vaatimukset.

Keskijännitteellä tapahtuvassa tehonsiirrossa on monia hyötyjä aiemmin käytettyyn pienjännitteeseen verrattuna. Alusten kasvavat sisäisten järjestelmien tehontarpeet on mahdollista siirtää 11 tai 6,6 kV:n keskijännitteellä yksinkertaisimmillaan yhtä liittymiskaapelia pitkin. Samansuuruisen tehonsiirron tapahtuessa pienjännitteellä tulee sen siirtämiseksi aluksille varata jopa 12 liittymiskaapelia, minkä myötä kytkentäprosessiin kuluva aika kasvaa.

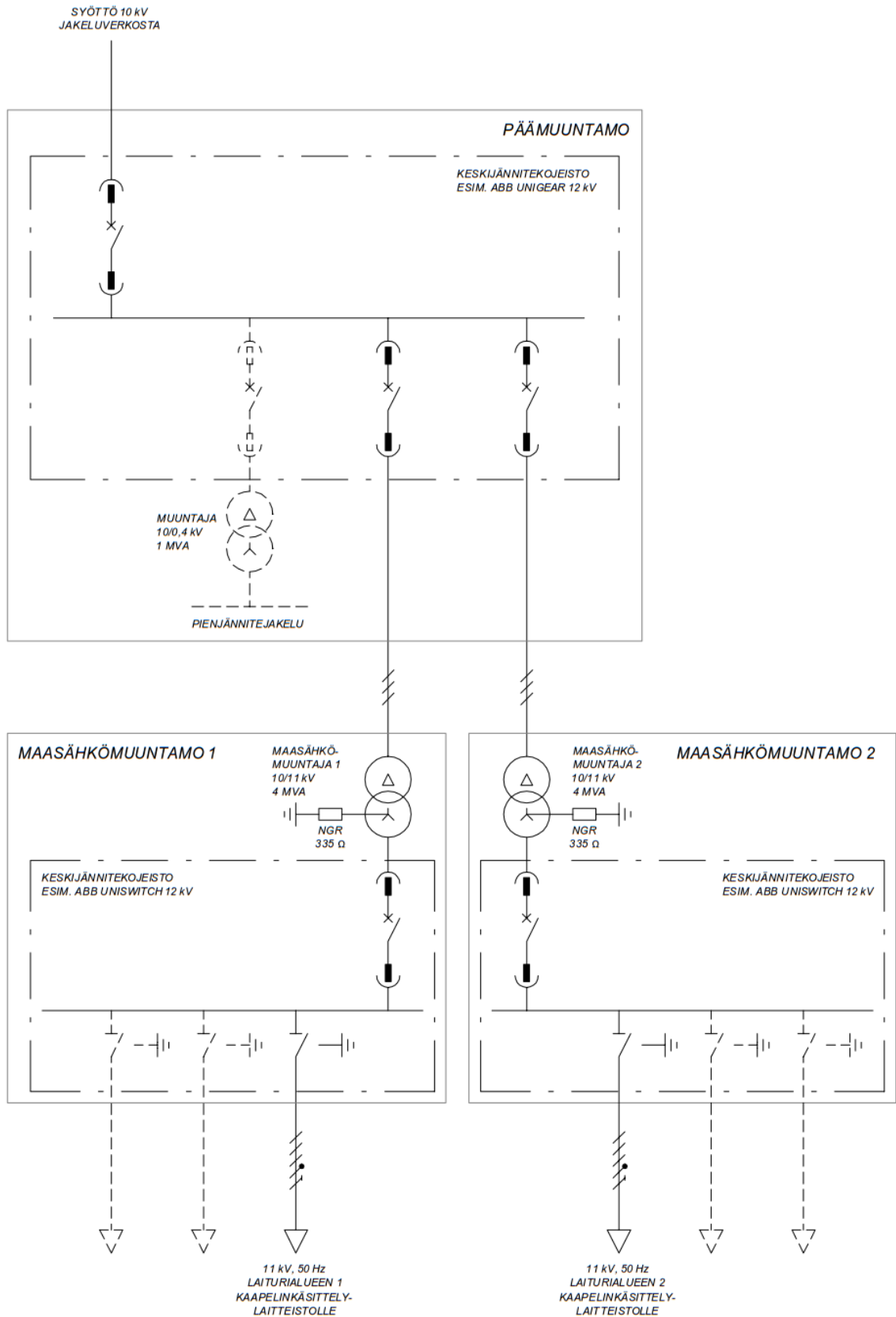
Maasähkön syöttöjärjestelmiä käsittelevän standardin ja muun aineiston tutkimisen myötä saatiin aikaan varsinaista sataman aluesähköistyksen suunnittelua tukeva insinööriyö, jossa on käyty läpi vaatimuksia sataman sähköverkkoon rakennettaville maasähkön syöttöjärjestelmien rakenteille sekä laitteistoille ja laitteistojen sijoittelulle suunnittelutyön näkökulmasta.

Lähteet

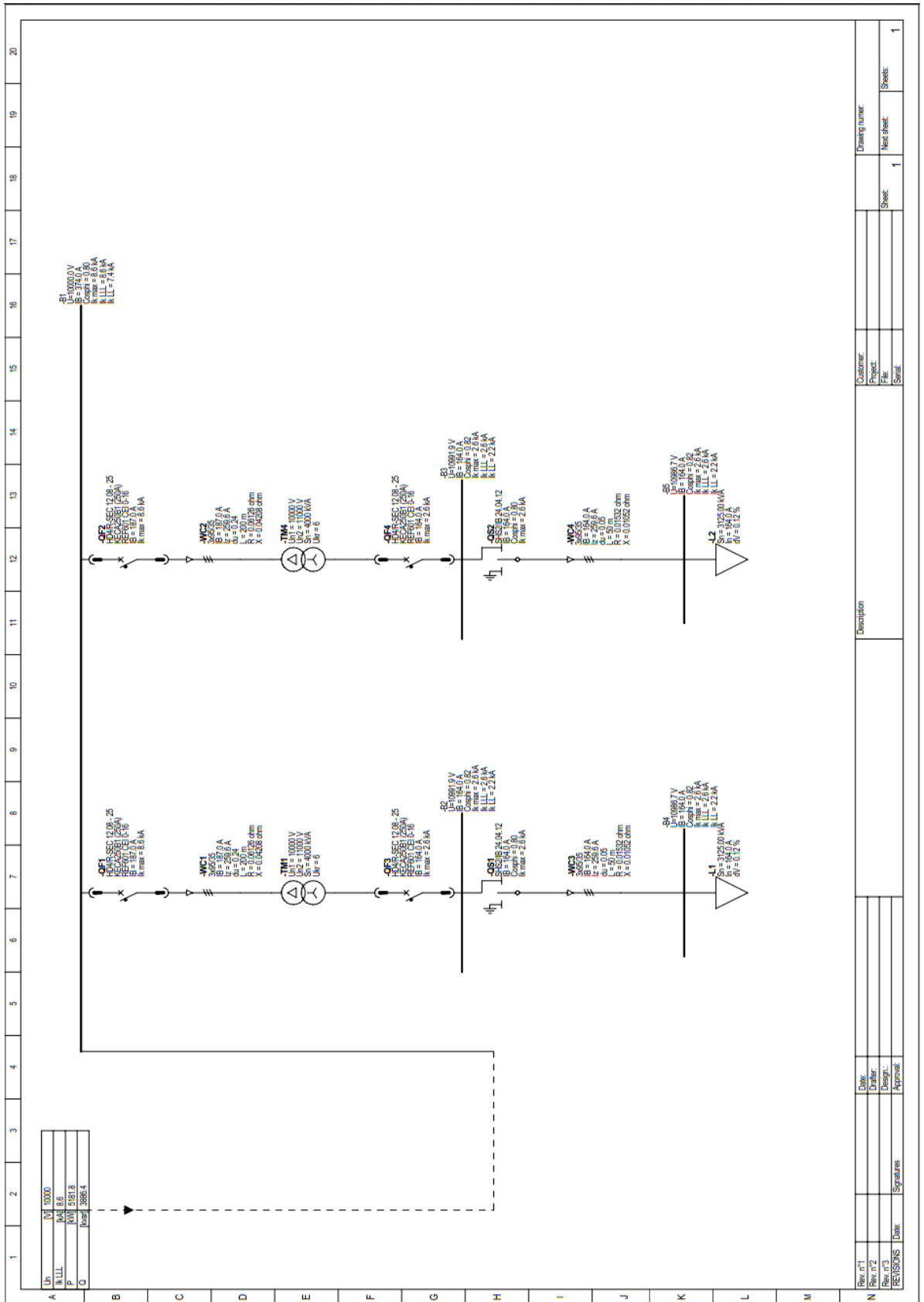
- 1 International Shipping Facts and Figures – Information Resources on Trade, Safety, Security, Environment. 2012. International Maritime Organization (IMO).
- 2 Smith, Tristan W. P.; Jalkanen, Jukka-Pekka; Anderson, Bruce A.; Corbett, James J.; Faber, Jasper; Hanayama, Shinichi; ym. 2014. Third IMO GHG Study 2014 – Final Report. International Maritime Organization (IMO). Lontoo.
- 3 Dutt, Susann. 2013. Case study – Onshore power supply at the Port of Gothenburg. Esitysmateriaali. Port of Gothenburg. Lontoo.
- 4 Marpol 73/78 Annex VI – Regulations for the Prevention of Air Pollution from Ships – Technical and operational implications. 2009. Det Norske Veritas (DNV).
- 5 Euroopan parlamentin ja neuvoston direktiivi 2012/33/EU. 2012. Euroopan unionin virallinen lehti L 327.
- 6 Euroopan komission suositus 2006/339/EY. 2006. Euroopan unionin virallinen lehti L 125.
- 7 Euroopan parlamentin ja neuvoston direktiivi 2014/94/EU. 2014. Euroopan unionin virallinen lehti L 307.
- 8 Euroopan neuvoston direktiivi 2003/96/EY. 2003. Euroopan unionin virallinen lehti L 283.
- 9 Sähkövero. 2015. Verkkodokumentti. Elenia.
<<http://www.elenia.fi/sahko/sahkovero>>. Luettu 15.3.2015.
- 10 Ports using OPS. 2015. Verkkodokumentti World Ports Climate Initiative.
<<http://www.ops.wpci.nl/ops-installed/ports-using-ops>>. Luettu 20.3.2015.
- 11 Shore-connected electricity supply to vessels in the Port of Göteborg. Port of Gothenburg. Göteborg.
- 12 Preconditions of connecting ships to Onshore Power Supply. 2012. Port of Gothenburg.
- 13 Maasähköä Oritkarista. OuluPort 1/2010. s. 11.
- 14 Helsingin Sataman valmistautuminen rikkidirektiivin voimaantuloon 2015 alussa. 2014. Verkkodokumentti. Port of Helsinki.
<<http://www.portofhelsinki.fi/ymparisto/rikkidirektiivi>>. Luettu. 15.3.2015.

- 15 IEC/ISO/IEEE 80005-1:2012. Utility connections in port – Part 1: High Voltage Shore Connection (HVSC) Systems – General Requirements. 2012. International Electrotechnical Commission. Geneva.
- 16 Yang, X.; Bai, G.; Schmidhalter, R. 2011. Shore to Ship Converter System for Energy Saving and Emission Reduction. Peking.
- 17 Service Contract on Ship Emissions: Assignment, Abatement and Market-based Instruments – Task 2a – Shore Side Electricity. 2005. Entec UK Limited. Norwich.
- 18 Enabling the shore-to-ship connection – Static frequency converters. 2011. Tuote-esite. ABB.
- 19 Radu, Daniel; Jeannot, Robert; Megdiche, Malik; Sorrel, Jean Paul. 2013. Shore connection applications – Main challenges. Schneider Electric. Rueil-Malmaison.
- 20 Induktiivisuuden ABC. Würth Elektronik Oy. Nurmijärvi.
- 21 UniGear ZS1 – Medium voltage, arc-proof, air insulated switchgear up to 24 kV insulated voltage. 2013. Tuote-esite. ABB.
- 22 Lehtonen, Olli. 2012. SF6-kaasu sähkökojeistoissa – Seminaari keskijänniteverkon suunnittelijoille. Esitysmateriaali. Siemens.
- 23 Uniswitch – Medium Voltage Switchgear. 2013. Tuote-esite. ABB.
- 24 SHS2 – Gas-insulated switching and isolating apparatus. 2010. Tuote-esite. ABB.
- 25 Tratosflex. 2015. Tuote-esite. Tratos.
- 26 Huotari, Kari; Partanen, Jarmo. 1998. Teollisuusverkkojen oikosulkuvirtojen laskeminen. Lappeenrannan teknillinen korkeakoulu. Lappeenranta.

Esimerkkisataman maasähkön syöttöjärjestelmän rakenne



Esimerkkisataman maasähkön syöttöjärjestelmän oikosulkulaskelmat



Rev. n°1	Date:	Description:	Customer:	Project:	Sheet:	Next sheet:	Drawing number:
Rev. n°2	Date:	Description:	File:	Serial:	1	1	
Rev. n°3	Date:	Description:					
REVISIONS		Signatures					
	Date:	Approval:					

