

VAASAN YLIOPISTO

TEKNIIKAN JA INNOVAATIOJOHTAMISEN YKSIKKÖ

SÄHKÖTEKNIikka

Reza Ghafari

**EXCEL-POHJAINEN OIKOSULKUVIRRAN LASKENTATYÖKALU
LAIVOJEN SÄHKÖVERKOILLE**

Diplomityö, joka on jätetty tarkastettavaksi diplomi-insinöörin tutkintoa varten

Vaasassa 12.06.2019

Työn valvoja

Professori Kimmo Kauhaniemi

Työn ohjaaja

Diplomi-insinööri Ismo Ouvinen

Työn tarkastaja

Professori Hannu Laaksonen

ALKULAUSE

Tämä diplomityö on tehty laivasuunnitteluyritys Deltamarinille. Kiitän työni valvojana toiminutta Vaasan yliopiston professoria Kimmo Kauhaniemiä ja tarkastajaa professori Hannu Laaksosta. Erityisesti haluaisin kiittää työni ohjaajaa diplomi-insinööriä Ismo Ouvista suuresta avusta ja tuesta. Haluan myös kiittää vanhaa yliopistokaveria sekä nykyistä työkollegaa diplomi-insinööriä Tomi Vaappoa hyvistä neuvoista ja kommentteista.

Lopuksi haluan kiittää myös erityisesti äitiäni, perhettäni ja ystäviäni, jotka ovat olleet aina tukenani kaikissa elämänvaiheissa.

Turku 12.06.2019

Reza Ghafari

SISÄLLYSLUETTELO

ALKULAUSE	1
SISÄLLYSLUETTELO	2
SYMBOLI- JA LYHENNELUETTELO	4
TIIVISTELMÄ	11
ABSTRACT	12
1 JOHDANTO	13
2 LAIVAN SÄHKÖVERKKO	16
2.1 Dieselmoottorit	18
2.2 Generaattorit	19
2.2.1 Akseligeneraattorit	20
2.2.2 Hätägeneraattorit	21
2.2.3 Sähköntuotanto generaattoreilla	21
2.3 Sähkönjakelu	23
2.4 Propulsiojärjestelmät	25
2.5 Muuntaja	27
2.6 Taajuusmuuttaja	28
2.7 UPS-laitteet	30
2.8 Pienjänniteverkon jakelujärjestelmät	31
2.8.1 TN-järjestelmä	32
2.8.2 TT-järjestelmä	33
2.8.3 IT-järjestelmä	34

3	LUOKITUSLAITOKSET	36
4	OIKOSULUN AIHEUTTAJAT JA VIKATYYPIT	41
4.1	Oikosulun aiheuttajat	41
4.2	Oikosulkutyypit	43
4.2.1	Kolmivaiheinen oikosulku	43
4.2.2	Kaksivaiheinen oikosulku	44
4.2.3	Yksivaiheinen oikosulku	46
5	OIKOSULKUVIRRAN LASKENTA LAIVAN SÄHKÖVERKOLLE	47
5.1	IEC 61361-1- standardi	47
5.2	Oikosulkuvirran luonne	49
5.3	Oikosulkuvirran laskentamenetelmät ja yhtälöt	53
5.3.1	IEC 61363-1 –standardiin perustuva laskentamenetelmä	53
5.3.2	Oikosulkuvirtalaskelma	55
6	EXCEL-POHJAINEN OIKOSULKUVIRTA LASKENTATYÖKALU	90
7	POHDINTA JA JOHTOPÄÄTÖKSET	92
8	YHTEENVETO	94
	LÄHDELUETTELO	96

SYMBOLI- JA LYHENNELUETTELO

f	Taajuus
E''	Alakeskuksen/taulun alkutilan jännite
E'	Alakeskuksen/taulun muuttuvan tilan jännite
E''_{q0}	Generaattorin alkutilan jännite
E'_{q0}	Generaattorin muutostilan jännite
E''_T	Muuntajan alkutilan jännite
E'_T	Muuntajan muutostilan jännite
I	Virta
I_{ac}	Oikosulkuvirran vaihtovirtakomponentti
I_{ac*}	Ekvivalenttgeneraattorin oikosulkuvirran vaihtovirtakomponentti
$I_{acbusbar}$	Päätaulun kiskolle aiheuttama vaihtovirtakomponentti (generaattorit ja moottorit)
I_{acG}	Generaattorin oikosulkuvirran vaihtovirtakomponentti
I_{acM}	Moottorin oikosulkuvirran vaihtovirtakomponentti
I_{acP}	Oikosulkuvirran vaihtovirtakomponentti generaattorin navalle
I_{acT}	Muuntajan ensiön oikosulkuvirran vaihtovirtakomponentti
I_{ac2T}	Muuntajan toision oikosulkuvirran vaihtovirtakomponentti
I_{dc*}	Ekvivalenttgeneraattorin oikosulkuvirran tasavirtakomponentti
I_{dcG}	Generaattorin oikosulkuvirran tasavirtakomponentti
I_{dcM1}	Suurien moottorien oikosulkuvirran tasavirtakomponentti
I_{dcM1}	Pienten moottorien oikosulkuvirran tasavirtakomponentti
I_k	Jatkuvan tilan oikosulkuvirta

I_{k*}	Ekvivalenttigeneraattorin jatkuvan tilan oikosulkuvirta
I_{k3}	Kolmivaiheinen oikosulkuvirta
I_{kd}	Generaattorin jatkuvan tilan oikosulkuvirta (valmistajan antama tieto) (r.m.s)
I_N	Nimellisvirta
I_{N*}	Ekvivalenttigeneraattorin nimellisvirta
I_{Np}	Muuntajan ensiön nimellisvirta
I_{Ns}	Muuntajan toision nimellisvirta
I_{rG}	Generaattorin nimellisvirta
I_{rM}	Moottorin nimellisvirta (r.m.s)
I_k''	Alkutilan oikosulkuvirta
I_{k*}''	Ekvivalenttigeneraattorin alkutilan oikosulkuvirta
I_{k1}''	Alkutilan oikosulkuvirta yksivaiheisessa oikosulussa
I_{k2}''	Alkutilan oikosulkuvirta kaksivaiheisessa oikosulussa
I_{k2E}''	Vaiheessa kulkeva alkutilan oikosulkuvirta kaksivaiheisessa maaosulussa
I_{k3}''	Alkutilan oikosulkuvirta kolmivaiheisessa oikosulussa
I_{kd}''	Generaattorin alkutilan oikosulkuvirta
I_{kE2E}''	Maahan kulkeva alkutilan oikosulkuvirta kaksivaiheisessa maaosulussa
I_{kT}''	Muuntajan alkutilan oikosulkuvirta
I_M''	Moottorin alkutilan oikosulkuvirta
I_{M1}''	Suurien moottorien alkutilan oikosulkuvirta
I_{M2}''	Pienten moottoreiden alkutilan oikosulkuvirta
I_k'	Muutostilan oikosulkuvirta
I_{k*}'	Ekvivalenttigeneraattorin muutostilan oikosulkuvirta

I'_{kd}	Generaattorin muutostilan oikosulkuvirta
I'_{kT}	Muuntajan muutostilan oikosulkuvirta
L_k	Oikosulkupiirin induktanssi
P_{N*}	Ekvivalenttgeneraattorin nimellisteho (r.m.s)
P_M	Moottorin nimellisteho (r.m.s)
R	Resistanssi
R_*	Ekvivalenttgeneraattorin resistanssi
R_a	Staattorin resistanssi
R_{cp}	Muuntajan ensiökaapelin resistanssi
R_{cs}	Muuntajan toisiokaapelin resistanssi
R_k	Oikosulkupiirin resistanssi
R_M	Moottorin resistanssi
R_r	Roottorin resistanssi
R_s	Staattorin resistanssi
R_T	Muuntajan resistanssi
R_{tot}	Muuntajan kokonaisresistanssi
S_N	Nimellisteho
S_T	Muuntajan nimellisteho
T_{dc}	Generaattorin tasavirran aikavakio
T_{dc*}	Ekvivalenttgeneraattorin tasavirran aikavakio
T_{dce}	Generaattorin ja kaapelin tasavirran aikavakio
T_{dce*}	Ekvivalenttgeneraattorin ja kaapelin tasavirran aikavakio
T_{dce*T}	Ekvivalenttgeneraattorin ja muuntajan kaapelin tasavirran aikavakio
T_{dcM}	Moottorin tasavirran aikavakio

T_d''	Generaattorin alkutilan aikavakio
T_{d*}''	Ekvivalenttgeneraattorin alkutilan aikavakio
T_e''	Generaattorin ja kaapelin alkutilan aikavakio
T_{e*}''	Ekvivalenttgeneraattorin ja kaapelin alkutilan aikavakio
T_{e*T}''	Ekvivalenttgeneraattorin ja muuntajan kaapelin alkutilan aikavakio
T_M''	Moottorin alkutilan aikavakio
T_d'	Generaattorin muutostilan aikavakio
T_{d*}'	Ekvivalenttgeneraattorin muutostilan aikavakio
T_e'	Generaattorin ja kaapelin muutostilan aikavakio
T_{e*}'	Ekvivalenttgeneraattorin ja kaapelin muutostilan aikavakio
T_{e*T}'	Ekvivalenttgeneraattorin ja muuntajan kaapelin muutostilan aikavakio
U	Jännite
U_N	Nimellisjännite
U_{N*}	Ekvivalenttgeneraattorin nimellisjännite
U_{rM}	Moottorin nimellisjännite (r.m.s)
U_{rp}	Muuntajan ensiön nimellisjännite
U_{rs}	Muuntajan toision nimellisjännite
X	Reaktanssi
X_*	Ekvivalenttgeneraattorin jatkuvan tilan reaktanssi
X_{cp}	Muuntajan ensiökaapelin reaktanssi
X_{cs}	Muuntajan toisiokaapelin reaktanssi
X_d	Generaattorin synkroninen reaktanssi
X_T	Muuntajan reaktanssi

X''_*	Ekvivalenttigeneraattorin alkutilan reaktanssi
X''_d	Generaattorin alkutilan reaktanssi
X''_M	Moottorin alkureaktanssi
X'_*	Ekvivalenttigeneraattorin muutostilan reaktanssi
X'_d	Generaattorin muutostilan reaktanssi
Z	Impedanssi
Z_*	Ekvivalenttigeneraattorin jatkuvan tilan impedanssi
Z_k	Oikosulkupiirin vaiheimpedanssi
Z''_*	Ekvivalenttigeneraattorin alkutilan impedanssi
Z''_e	Generaattorin ja kaapelin alkutilan impedanssi
Z''_{e*}	Ekvivalenttigeneraattorin ja kaapelin alkutilan impedanssi
Z''_{e*T}	Ekvivalenttigeneraattorin ja muuntajan kaapelin alkutilan impedanssi
Z''_M	Moottorin alkutilan impedanssi
Z'_*	Ekvivalenttigeneraattorin muutostilan impedanssi
Z'_e	Generaattorin ja kaapelin muutostilan impedanssi
Z'_{e*}	Ekvivalenttigeneraattorin ja kaapelin muutostilan impedanssi
Z'_{e*T}	Ekvivalenttigeneraattorin ja muuntajan kaapelin muutostilan impedanssi
$\cos \phi$	Tehokerroin
i_k	Oikosulkuvirta
i_p	Sysäysoikosulkuvirta
i_{pG}	Generaattorin sysäysoikosulkuvirta
$i_{pbusbar}$	Päätaulun kiskolle aiheuttama sysäysoikosulkuvirta
i_{pM1}	Suurten moottoreiden sysäysoikosulkuvirta

i_{pM2}	Pienten moottoreiden sysäysaikosulkuborta
i_{pP}	Sysäysaikosulkuvirta generaattorin navalle
κ	Sysäyskerroin
τ	Piirin aikavakio
t	Oikosulun kesto aika
$\hat{u}$	Sinimuotoinen jännite
ω	kulmataajuus
φ_k	Impedanssin vaihekulma
α	Jännitteen vaihekulma oikosulun alkuhetkellä

ABS	American Bureau of Shipping
AVR	Automatic Voltage Regulator
BV	Bureau Veritas
CCS	China Classification Society
ClassNK	Nippon Kaiji Kyokai
CRS	Croatian
DNV	Det Norske Veritas
DTC	Direct Torque Control
EB	Emergency Board
EL	Emergency Lighting Board
GL	Germanischer Lloyd
HB	Heating Board
IACS	International Association of Classification Societies
IEC	International Electrotechnical Commission
IMO	International Maritime Organization

IRS	Indian Register of Shipping
IT	Isolated Terra
KR	Korean Register of Shipping
LNG	Liquefied Natural Gas
MCC	Motor Control Center
N	Nollajohdin
PB	Power Board
PE	Suojamaadoitusjohdin
PID	Proportional Integral-Derivative
PRS	Polish Register of Shipping
RINA	Registro Italiano Navale
RS	Russian Maritime Register of Shipping
SG	Shaft Generator
SGD	Shaft Generator Drive
SOLAS	International Convention for the Safety of Life at Sea
TN	Terra Neutral
TNC	Terra Neutral-Combined
TNS	Terra Neutral-Separated
TT	Terra Terra
UPS	Uninterruptible Power Supply

VAASAN YLIOPISTO**Teknillinen tiedekunta****Tekijä:**

Reza Ghafari

Diplomityön nimi:Excel-pohjainen oikosulkuvirran laskentatyökalu
laivan sähköverkolle**Valvoja:**

Professori Kimmo Kauhaniemi

Ohjaaja:

Diplomi-insinööri Ismo Ouvinen

Tarkastajan:

Professori Hannu Laaksonen

Tutkinto:

Diplomi-insinööri

Oppiaine:

Sähkötekniikka

Opintojen aloitusvuosi:

2011

Diplomityön valmistumisvuosi:

2019

Sivumäärä: 102

TIIVISTELMÄ

Meriteollisuus on aina ollut maailman yksi tärkeimmistä toimialoista, joka on yhdistänyt kansainvälisen kaupan ja liikennöintiä vuosien saatossa. Laivan sähköverkon toimivuus on välttämätöntä laivan toiminnalle. Laivan sähköverkko suunnitellaan siten, että se kykenee toimimaan itsenäisenä yksikkönä merellä ja satamassa. Laivoissa on oma sähköverkko, sähköntuotanto, jakelu ja sähköverkkoon kytketty kulutus eli sähköä tarvitsevat laitteet. Laivan omat polttomoottorit pyörittävät laivan omia generaattoreita, jotka tuottavat laivan tarvitsemaa sähköä. Tuotettu sähkö syötetään generaattoreilta keskitä pienjännitekojeistoihin, joita laivoissa kutsutaan päätauluiksi, ja siitä edelleen laivan sähkön jakeluverkkoon. Päätaulu syöttää muuntajia, joilla jännite muunnetaan sopivaksi ja se siirretään laivan eri puolille sijaitseville kuluttajille.

Laivan toiminnallisuuden kannalta häiriötön sähkönsyöttö on tärkeä, sillä häiriöt sähkönsyötössä tai sähkönsyötön keskeytys voi aiheuttaa sekä suuria kustannuksia että vaaratilanteita. Kyky selviytyä turvallisesti sähköverkkoon ilmenevistä vikavirroista on yksi keskeinen osa laivan sähköverkossa luotettavuuden kannalta. Laivan sähköverkolle on ominaista korkeat oikosulkuvirrat. Tämä johtuu verkkoa syöttävistä generaattoreista, pyörivistä sähkömoottoreista ja lyhyistä etäisyyksistä. Laivaverkon toiminnan varmistamiseksi on tärkeä tietää verkon oikosulkuvirtojen suuruus sekä verkon komponenttien oikosulkukestoisuudet.

Tämän diplomityön tarkoituksena oli tutkia laivan sähköverkkoa, luokituslaitoksien vaatimuksia ja säännöksiä, oikosulkuvirtalaskentaa sekä lopuksi esittää Microsoft Excelillä luotu laskentatyökalu oikosulkuvirtalaskentaan. Aluksi tutkittiin laivan sähköverkkoa tarkasti esittäen eri mahdolliset verkkotyypit, komponentit ja kojeistot sekä laivan sähköverkon jakelua. Seuraavaksi perehdyttiin laivan sähköverkon oikosulkusuojaukseen ja sen oikosulkuvirtalaskentaan käyttäen IEC 61363-1 -standardia. Lopuksi esitettiin luotu IEC 61363-1 -standardin mukainen Excel-pohjainen laskentatyökalu oikosulkuvirtalaskentaa varten.

AVAINSANAT: Sähköverkko, oikosulku, oikosulkuvirta, laivan sähköverkko, IEC 61363-1

UNIVERSITY OF VAASA**Faculty of technology**

Author:	Reza Ghafari
Topic of the Thesis:	Short circuit calculation for ship's grid with Excel
Supervisor:	Professor Kimmo Kauhaniemi
Instructor:	Master of Science in Technology Ismo Ouvinen
Inspector:	Professor Hannu Laaksonen
Degree:	Master of Science in Technology
Degree Programme:	Degree Programme in Electrical and Energy Engineering
Major of Subject:	Electrical Engineering
Year of Entering the University:	2011
Year of Completing the Thesis:	2019

Pages: 102

ABSTRACT

Marine industry has always been one of the worlds most important industries, which has connected the international business and logistics throughout the years. The functionality of the electric grid in the ships is essential for the operability of the ships.. The ships include an own electric grid, electricity production, distribution and the consumption connected to the electric grid, which stands for the electricity demanding equipment. The engine of the ships run the ships generators, which produce the electricity, demanded by the ship. The produced electricity is supplied from the generators to the low- and medium voltage switchgears, which are called the main power boards in the ship, and from there forwarded to the ships electricity's distribution grid. The main power board supplies the transformers, which are used to transfer the voltage to suitable, and therefore transferred to the different consumers within the ship.

An impeccable power supply is important for the functionality of the ship, because a disruption or an interruption within the supply can cause major expenses as well as danger. The ability to survive safely from the faults exposing on the electric grid is an essential factor in the reliability of the ship. High short-circuit currents are general for the electric grid of the ships. This is derived from power supplying generators, engines and short-distances. In order to ensure the operability of the electric grid of the ships, it is important to know the size of the short-circuit currents and the grids components short-circuit currents durability.

The purpose of this master's thesis was to examine the electric grid of the ship, demands and terms of the classification society, short-circuit currents calculating and eventually to present a calculation tool for short-circuit currents calculation. The thesis started with examining the electric grid precisely, by presenting different possible grid types, components, and switchgears as well as electric grid distribution. Next chapter consisted of the ships electricity grids short-circuit currents protection and short-circuit currents calculations using IEC 61363-1 standard. Eventually the thesis presented an IEC 61363-1 standard based Microsoft Excel calculation tool for short-circuit currents.

KEYWORDS: Electrical grid, Short circuit, Short circuit current, Ship's power system

1 JOHDANTO

Meriteollisuus on aina ollut maailman yksi tärkeimmistä toimialoista, joka on yhdistänyt kansainvälisen kaupan ja liikennöintiä vuosien saatossa. Euroopan perinteisiä suuria laivanrakennusvaltioita ovat Saksa, Hollanti, Iso-Britannia ja Espanja. Myös Japani ja Yhdysvallat ovat varustautuneet erityisesti sotilaallisilla kentillä. Kun 1950-luvun jälkeen laivanrakennusteollisuuden kansainvälisille markkinoille nousivat mm. Italia, Puola, Tanska, Ruotsi ja Norja, niin samanaikaisesti alkoivat laivanrakennusteollisuuden ensimmäiset rakennemuutoksen oireet, kun markkinoilta alkoi poistua telakkateollisuutta. Esimerkiksi Iso-Britannia sulki entisiä telakoitaan ja Ruotsi päätti lopettaa 1970-luvun puolivälissä telakkateollisuuttaan sisäisten kustannusten kasvamisen ja kansainvälisen kilpailun kiristymisen johdosta. Vaikka nykyaikainen laivateollisuus on peräisin Euroopasta, niin Kaukoidän halvan työvoiman ansiosta Eurooppa on menettänyt lähes kokonaan laivateollisuutensa Aasiaan. Meriteollisuudessa ja erityisesti laivanrakennusteollisuudessa silmämielestävintä on se, että vielä 1900-luvun alkupuoliskolla Euroopan laivanrakennuksen osuus maailman laivanrakennuksesta oli 80 prosenttia, kun tänä päivänä sen osuus on laskenut 15 prosenttiin. Tosiasia on se, että laivateollisuuden painopiste on siirtynyt vuosikymmenten aikana Aasiaan, jossa Japani, Kiina ja Etelä-Korea hallitsevat vahvasti laivateollisuutta. (Gustafsson, Heikkilä, Hillgren, Karvonen, Keltaniemi & Lappalainen 2013: 10; Rakennemuutos toimisto 2012: 10).

Vuosikymmenien ajan strategisesti kiinnostavana toimialana pidetty laivanrakennusala on ollut yksi Suomen tärkeimmistä vientituotteista. Laivanrakennuksella on pitkä perinne Suomessa, sillä rauhansopimuksen ehtojen mukaan Suomi joutui 300 miljoonan dollarin edestä toimittamaan puutavaraa, paperia, selluloosaa, meri- ja jokialuksia sekä erilaisia koneita Neuvostoliitolle. Rauhansopimuksen ja sotakorvausten ansiosta Suomeen muodostui ja kehittyi mittava telakkateollisuus, jota arvostetaan maailmalla vielä tänäkin päivänä. 1970-1980 -luvuilla suomalaiset telakat viettivät kulta-aikaa, jolloin luotiin perusta nykyiselle suomalaiselle meriteollisuudelle. Koska suomalaiset telakat eivät ole kyenneet hintakilpailuun aasialaisten kilpailijoidensa kanssa, on Suomessa keskitytty erikoisaluksien, kuten risteilijöiden ja jäänmurtajien tuotantoon. Suomen

laivanrakennusteollisuuden vahvuuksia ovat konseptinkehitys, projektien hallinta ja hydrodynamiikka. Suomen tämän hetkinen meriteollisuus muodostuu telakoista, meriteknisen alan kokonaistoimittajista, suunnittelu- ja konsulttitoimistoista, järjestelmä- ja laitet toimittajista sekä sisustus- ja metallialihankintatyön toimittajista. Nykyään laivoja rakennetaan Turun, Rauman ja Helsingin telakoilla. (Gustafsson ym. 2013: 10; Nissilä, Oravasaari & Paavola 2015:17).

Laivan sähköverkon toimivuus on välttämätöntä laivan toiminnalle. Laivan sähköverkko suunnitellaan siten, että se kykenee toimimaan itsenäisenä yksikkönä merellä ja satamassa. Laivoissa on oma sähköverkko, sähköntuotanto, jakelu ja sähköverkkoon kytketty kulutus eli sähköä tarvitsevat laitteet. Laivan omat polttomoottorit pyörittävät laivan omia generaattoreita, jotka tuottavat laivan tarvitsemaa sähköä. Moottorit voivat toimia dieselillä, nesteytetyllä maakaasulla eli LNG:llä (Liquefied natural gas) tai akuilla. Tuotettu sähkö syötetään generaattoreilta keski- tai pienjännitekojeistoihin, joita laivoissa kutsutaan päätauluiksi, ja siitä edelleen laivan sähköjakeluverkkoon. Päätaulu syöttää muuntajia, joilla jännite muunnetaan sopivaksi ja se siirretään laivan eri puolille sijaitseville kuluttajille.

Laivan toiminnallisuuden kannalta häiriötön sähkönsyöttö on tärkeä, sillä häiriöt sähkönsyötössä tai sähkönsyötön keskeytys voi aiheuttaa sekä suuria kustannuksia että vaaratilanteita. Laivan jakeluverkon suunnitteluun, komponentteihin ja suojaukseen on kiinnitettävä erityistä huomiota, jotta sähköverkko olisi mahdollisimman luotettava. Kyky selviytyä turvallisesti sähköverkkoon ilmenevistä vikavirroista on yksi keskeinen osa laivan sähköverkossa luotettavuuden kannalta. Verkon toiminnallisuuden kannalta on tärkeä, että verkko on suunniteltu siten, että vikatyypeistä riippuen verkossa ilmenevät erisuuruiset virrat pystytään tunnistamaan ja rajoittamaan niiden vaikutusalue mahdollisimman pieneksi haittojen ehkäisemiseksi. Laivan sähköverkolle on ominaista korkeat oikosulkuvirrat verkon komponenttien, kuten esimerkiksi polttomoottoreiden ja generaattoreiden takia. Tämä johtuu verkkoa syöttävistä generaattoreista, pyörivistä sähkömoottoreista ja lyhyistä etäisyyksistä. Laivaverkon toiminnan varmistamiseksi on tärkeä tietää verkon oikosulkuvirtojen suuruus sekä verkon komponenttien oikosulkukestoisuudet. Vian sattuessa verkon eri osien pitää kestää vian synnyttämien

virtojen aikaansaamat mekaaniset ja termiset vaikutukset. Selvitettyjen oikosulkuvirtojen avulla verkon oikosulkusuojaus pystytään suunnittelemaan valitsemalla eri komponenttien oikosulun kestoisuuksien mukaan.

Tämän diplomityö tarkoituksena on tutkia laivan sähköverkkoa, luokituslaitoksien vaatimuksia ja säännöksiä, oikosulkuvirran laskentaa sekä lopuksi esittää Microsoft Excel -ohjelmalla toteutettu laskentatyökalu oikosulkuvirran laskentaan, jota suunnittelutoimisto Deltamarin Ltd tulee käyttämään jatkossa. Aluksi työssä tutkaillaan laivan sähköverkkoa tarkemmin esittäen pääkomponentit, kojeistot ja erilaiset verkkotyypit. Sen jälkeen perehdytään laivan sähköverkon oikosulkusuojaukseen ja oikosulkuvirtalaskentaan käyttäen IEC 61361-1 standardia (International Electrotechnical Commission). Lopuksi esitetään luotu IEC 61363-1 -standardin mukainen Excel-pohjainen laskentatyökalu oikosulkuvirran laskentaa varten.

2 LAIVAN SÄHKÖVERKKO

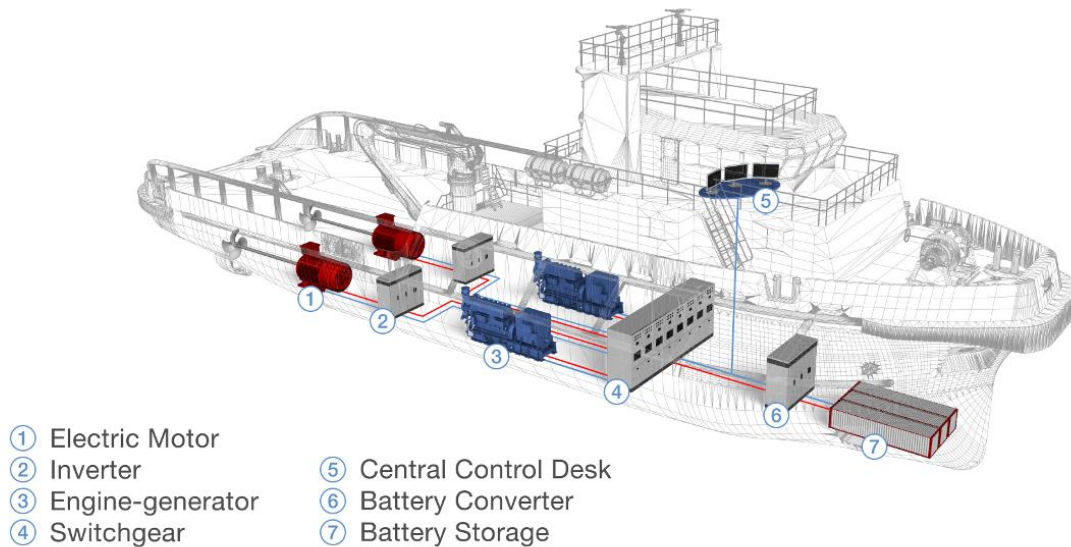
Nykyään laivoja voidaan pitää kelluvina kaupunkaina, joissa on oma sähkön tuotanto, joka tuottaa sähköä monenlaisille järjestelmille. Valaistus, lämmitys, jäähdytys, ilmanvaihto, pumpput, venttiilit, navigointi ja kommunikointi järjestelmät sekä lastiin liittyvät toiminnot ovat esimerkkejä laivan erilaisista järjestelmistä, jotka tarvitsevat sähköä toimiakseen. Laivan sähköverkon itsenäinen ja jatkuva toimivuus on ehdoton asia laivan toiminnalle. Maapuolen ja laivan sähköverkon välillä on tietynlaisia eroja. Laivoihin asennetut yksittäiset isotehoiset komponentit tuottavat erilaisia haasteita laivan sähköverkon suunnittelussa. Korkeat oikosulkuvirtatasot ja -voimat on laskettava ja käsiteltävä laivan toiminnallisuuden kannalta turvallisella tavalla. Valtakunnallisessa sähkönsiirto- ja jakeluverkossa sähköntuotanto voi olla siirtojohdoilla ja muuntajilla jopa satojen kilometrien päässä kuormituksista ja kulutuksesta. Laivasähköverkon ja valtakunnan sähköverkon välinen olennaisin ero on siinä, että laivasähköverkko on itsenäinen ja eristynyt verkko, jossa etäisyydet sähköntuotantopisteestä kuluttajiin ovat todella lyhyitä valtakunnan verkkoon nähden. Sähköä tuotetaan laivoissa lähellä kulutusta. Tuotannon ja kulutuksen välillä olevien lyhyiden etäisyyksien ansiosta laivan sähköverkon hallinnointia ja seurantaa on mahdollista integroida paremmin kuin valtakunnaverkossa. Maanpuoleisen sähköverkon ohjaus- ja valvontajärjestelmät on jaettu useammille erillisille sähköasemille, kun taas laivoissa ne on integroitu ja koordinoitu huomattavasti pienimmissä tiloissa. (ABB 2003: 15; Hyytiä 2012: 14.)

Nykyaikaisille laivoille on ominaista se, että niiden sähköverkot ovat monimutkaisia ja teknisesti haastavia itsenäisiä kokonaisuuksia. Laivoissa sähköjärjestelmät perustuvat vaihtosähköön ja perustaajuudeksi valitaan joko 50 Hz tai 60 Hz. Taajuudella määritetään vaihtosähkömoottoreiden ja generaattoreiden pyörimisnopeudet. Pohjois-Amerikassa ja mannertenvälisessä liikenteessä laivoissa käytetään yleensä korkeampaa taajuutta. Käyttämällä korkeampaa taajuutta saavutetaan mm. säästöjä laitteiden mitoituksessa. Alla olevaan taulukkoon 1 on koottu yleisimmät käytössä olevat jännitteet 50 Hz ja 60 Hz taajuudella. Esitetyt jännitteet ovat kahden vaiheen välillä olevia pääjännitteitä. (Stähle 2016: 3.)

Taulukko 1. Laivan jännitetasot 50 Hz ja 60 Hz taajuuksilla. (Hyytiä 2012: 14.)

Taajuus (Hz)	Jännite (V)						
	X	230	400	690	3300	6600	11000
50	X	230	400	690	3300	6600	11000
60	120	230	440	690	3300	6600	11000

Generaattorien lähelle ja erilliseen valvontahuoneeseen tai omaan huoneeseen sijoitettava päätaulu on laivan sähköverkon keskeisin laite, joka on laivan pääsähkönjakelujojoisto. Päätaulu, joka on yleensä jaettu kahteen osaan, sisältää monia lähtöjä suurille kuluttajille sekä useita tuloja generaattoreilta. Katkaisijoilla erotetaan päätaulun jaetut osat. Siirrettävästä tehosta riippuen, päätauluna toimii joko keskijännitejojoisto tai pienjännitejojoisto. Päätaulu syöttää muuntajia, joilla muunnetaan sähköön jännitettä matalammaksi pienkulutukselle. Lähtöjä jaetaan eteenpäin päätaulusta pienimmille sähkökeskuksille muuntajien kautta kuten esimerkiksi valaistuskeskuksille ja hätäkeskuksille. Suuritehoiset kuormat, kuten moottorit ja generaattorit, kytketään suoraan päätauluun. Säteittäisenä käytetyn laivan sähköverkon ansiosta pystytään rajoittamaan häiriöiden leviämistä ja suojaus onnistutaan toteuttamaan mutkattomasti. Sekä luokituslaitoksen vaatimusten, että turvallisuuden takia joudutaan tärkeimpien laitteiden syöttöjä kahdentamaan ja vetämään niiden kaapelointi laivan eri alueiden läpi. Luokituslaitoksen määräyksen mukaan laivalla pitää olla myös muusta sähköverkosta riippumaton hätägeneraattori, joka kytketään hätätaulujen kautta hätäjakeluverkkoon. Hätägeneraattoria mitoitetaan niin, että sähkökatkon aikana se pystyy syöttämään tärkeimpiä laitteistoja. Laivalle elintärkeät laitteet varustetaan myös UPS-laitteistolla (Uninterruptible Power Supply), jonka tarkoituksena on turvata katkoton sähkönsyöttö kriittisimmissäkin tilanteissa. Kuvassa 1 on esitetty laivan sähköverkko yksinkertaistettuna pääkomponentteineen. Dieselmootorit pyörittävät generaattoreita, jotka tuottavat sähköä. Tuotettu sähkö syötetään päätauluille, jotka syöttävät muuntajia. Muuntajat muuttavat jännitetasoa muille laivan sähkölaitteille kuten esim. taajuusmuuttajille. Taajuusmuuttajat ohjaavat propulsiomootoreita, jotka taas pyörittävät potkureita. (Hyytiä 2012: 14-15; Ståhle 2016: 2-4.)



Kuva 1. Laivan sähköverkon yksinkertainen rakenne. Tehonsiirto on kuvattu punaisella ja tiedonsiirto sinisellä. (Typhon Hil.)

Seuraavaksi käsitellään laivan sähköverkon oleelliset komponentit ja laivan pienjänniteverkon jakelujärjestelmät.

2.1 Dieselmootorit

Laivassa tarvittava sähköenergia tuotetaan generaattoreilla, joita pyörittää yleensä dieselmootorit tai raskasta polttoöljyä käyttävät polttomootorit. Viime aikoina erilaiset kaasumootorit ja kaasuturbiinit ovat myös yleistyneet laivan sähköntuotannossa. Yleensä laivoissa on 2-10 dieselmootoria, jotka määräävät pyörimisnopeudellaan laivan sähköverkon taajuuden. Riippuen laivan potkurikoneiston rakenteesta dieselmootorilla voi olla kaksi eri tehtävää; joko dieselmootori tuottaa kaiken sähkötehon pyörittämällä sähkögeneraattoreita, tai se voi pyörittää laivan potkuria mekaanisissa potkurikoneistoratkaisuissa. (Hyytiä 2012: 16; Stähle 2016: 5.)

2.2 Generaattorit

Laivoissa on kaksi tapa tuottaa sähköenergiaa. Laivan ollessa merellä sähköön tuotanto tapahtuu pyörivillä generaattoreilla dieselmootoreiden avulla. Laivan ollessa satama-alueella esimerkiksi huollossa, laiva kytketään kantaverkkoon erillisellä kytkennällä. Suurin osa sähköenergiasta tuotetaan vaihtosähkögeneraattoreilla, jotka jaetaan epätahtikoneisiin ja tahtikoneisiin, sen mukaan pyöriikö koneen roottori staattorikäänityksen kehittämän pyörivän magneettikentän kanssa eri vai samalla nopeudella. Sähköenergiaa tuotettaessa yleisin sähkökonetyyppi on tahtikone. Kone, joka muuttuvalla magneettikentällään synnyttää napojen välille jännitteen kutsutaan tahtikoneeksi. (Panu 2016: 6; Ståhle 2016: 5-6.)

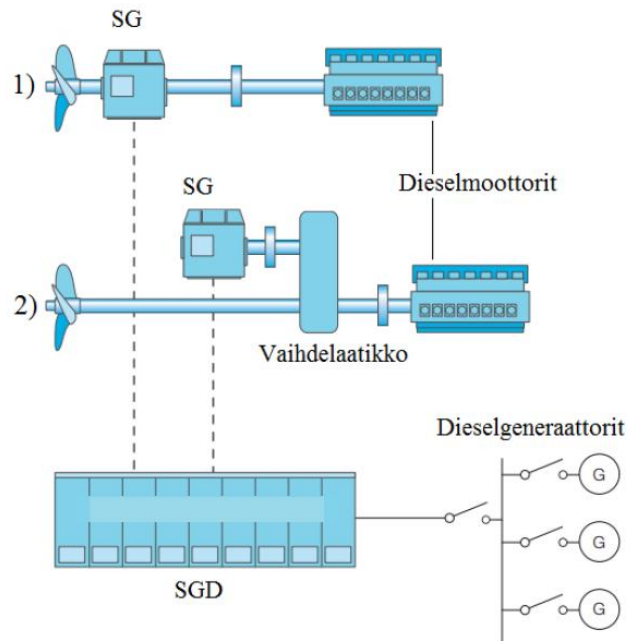
Epätahti- ja tahtikoneiden toiminta perustuu sekä pyörivään magneettikenttään koneen sisällä, että magneettikentän ja siinä olevan virrallisen johtimen välisiin vuorovaikutuksiin. Huolimatta vaihtosähkökoneiden eri tyypeistä, voidaan kaikista niistä erottaa koneiden perusosat kuten staattori, roottori akseleineen, laakerikilvet tai laakeriputket ja laakerit. Staattori, joka on sähkökoneen paikallaan oleva osa, sisältää käänityksen. Sähkökoneen pyörivä osa, roottori, sijaitsee staattorissa laakereiden varassa. Jotta roottori voisi pyöriä vapaasti, niin staattorin ja roottorin välissä on ilmapäli. Laakerit on kiinnitetty laakerikilpiin, jotka kannattavat roottoria. Laakerikilvet ovat taas kiinni koneen rungossa, jonka muodostaa staattori. (Korpinen 1998: 1; Panu 2016: 6; Ståhle 2016: 5-6.)

Isoissa aluksissa ja laivoissa tarvitaan suuria määriä tehoja, jota tuotetaan keskijännite generaattoreilla. IEC-standardin mukaan 11 kV jännitetaso valitaan, kun generaattoreiden kokonaisteho ylittää 20 MW ja 6,6 kV jännitetaso, kun generaattoreiden kokonaisteho on 4-20 MW:n luokkaa. Keskijännitegeneraattoreiden syöttämä teho vaihtelee 4-60 MW riippuen generaattoreiden määrästä ja suuruudesta. Keskijännitegeneraattorit ovat yleensä pienimmillään 4 MW:n luokkaa ja suurimmillaan ne voi olla noin 20 MW:n suuruisia. (ABB 2003: 19.)

Pienjänniteverkko löytyy jokaisesta aluksesta tai laivasta joko yksinään tai keskijännitteen alapuolella. Isoimmissa laivoissa keskijännite muunnetaan muuntajilla matalammaksi jännitetasoksi, joka syötetään pienjännitetauluille. Pienitehoisimmat laivat toimivat pienimmillä generaattoreilla ja kuluttajat näissä laivoissa ovat pienempiä. IEC-standardin mukaan 690 V jännitetaso valitaan, jos generaattoreiden kokonaisteho on alle 4 MW. Pienjännitegeneraattoreiden syöttämä kokonaisteho vaihtelee suuresti 1-4 MW tehoon riippuen generaattoreiden määrästä ja suuruudesta. Pienjännitegeneraattorit ovat yleensä pienimmillään 10,4 kW:n luokkaa ja suurimmillaan ne voi olla noin 1950 kW:n suuruisia. (ABB 2003: 19)

2.2.1 Akseligenaattorit

Generaattori, jonka roottori pyörii osana potkuriakselia, kutsutaan akseligenaattoriksi, SG (Shaft Generator). Akseligenaattorin sijaintia potkuriakselilla voidaan määrittää vapaasti esimerkiksi vaihteiston avulla. Taajuusmuuttajilla voidaan laajentaa akseligenaattoria ja tuottaa näin vakio jännitettä pyörimisnopeuden vaihdellessa. Akseligenaattori syöttää taajuusmuuttajaa, joka syöttää sähköä laivan sähköverkkoon. ABB:n tuottama taajuusmuuttaja akseligenaattorille on akseligenaattorikäyttö SGD (Shaft generator drive). Kuvasta 2 nähdään, kuinka akseligenaattori ja SGD on kytketty toisiinsa sekä kuinka akseligenaattori voidaan sijoittaa vapaasti potkuriakselille. (Stähle 2016: 8-9.)



Kuva 2. Akseligenaattorin sijaintimahdollisuudet ja SGD:n sijoittuminen: 1) suoraan potkuriakselille 2) vaihdelaatikon välityksellä potkuriakselille. (Stähle 2016: 9.)

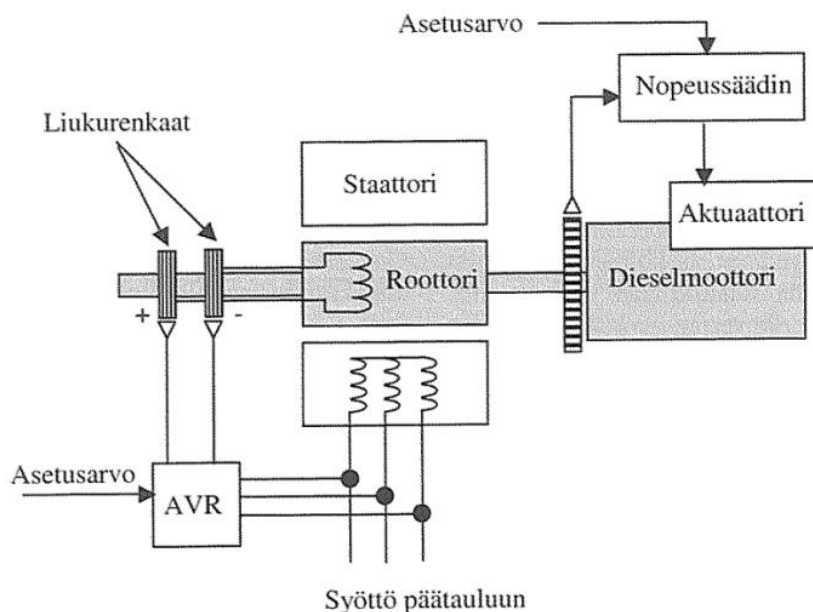
2.2.2 Hätägeneraattorit

Luokituslaitoksen määräyksestä kaikkien päägeneraattoreiden hajoamisen varalta, kaikissa laivoissa on hätägeneraattori, joka syöttää hätätaulujen kautta hätäjakeluverkkoa. Hätägeneraattori mitoitetaan, niin että se kykenee syöttämään tärkeimpiä laitteita ja koneita sähkökatkon aikana. Hätägeneraattorin käynnistys tapahtuu joko paineilmamootorilla tai akustosta. Polttoainetankeilla pitää olla riittävästi polttoainetta, jotta hätägeneraattorit toimisivat täydellä kuormalla tarvittavan ajan. Matkustajalaivoilta vaadittu toiminta-aika on 36 tuntia, lastilaivoilta 18 tuntia ja palvelualuksilta 12 tuntia. (Borstlap & Katen 2011: 84; Panu 2016: 7.)

2.2.3 Sähköntuotanto generaattoreilla

Sähkön tuottaminen ei onnistu pelkästään roottoria pyörittämällä, vaan jännitettä saadaan tuotettua pyörittämällä magneettikenttää staattorin sisällä. Tämän takia roottoria täytyy

magnetoida, jotta syntyisi magneettikenttä roottorin pyöriessä. Roottoria magnetoidaan magnetointivirralla ja sen syöttävää laitetta kutsutaan herätinkoneeksi. Erillisellä laitteistolla säädetään taajuutta, jännitettä, pätö- ja loistehoa. Kuvassa 3 esitetään kuinka AVR eli jännitteensäätäjä (Automatic Voltage Regulator) ja nopeudensäädin säätävät generaattoria. Dieselmoottori pyörittää akselia, johon on asennettuna pyörimisnopeuden mittausta ja roottori akselin päässä. Sähköverkon taajuutta säädetään pyörimisnopeuden perusteella, jotta se saadaan vastaamaan säätäjälle annettua asetusarvoa. AVR mittaa sähköverkon jännitteet staattorin sisällä olevasta roottorin käämityksistä. Roottorin magnetointivirta, joka vaikuttaa suoraan sähköverkossa olevaan jännitteeseen, säädetään olemassa olevan jännitteen perusteella. Dieselmoottojen pyörimisnopeuden perusteella kontrolloidaan sähköverkon taajuutta. Itse dieselmoottoria ohjataan nopeussäätimellä. Käytännössä polttoaineen syötöllä kontrolloidaan pyörimisnopeuteen vaikuttavaa momenttia. PID-säädin (Proportional-Integral-Derivative controller) tarkkailee verkon taajuutta ja ohjaa polttoaineen syöttöä. PID-säädin pyrkii kompensoimaan pyörimisnopeutta lisäämällä tai vähentämällä polttoaineen syöttöä voimakoneeseen, kun huomaa eron asetusarvossa. (Panu 2016: 7-8.)



Kuva 3. Generaattorin säätäjät ja AVR. (Panu 2016: 8.)

2.3 Sähkönjakelu

Sähkönjakelu alkaa päätauluista, joista sähköä jaetaan johdoilla muille kuluttajille. Laivan sähköverkossa toimiva päätaulu on vakiintunut nimitys vastaavasta laitteistosta kuin maapuolen kojeistosta. Päätaulut voivat sijaita joko omassa huoneessa tai valvontahuoneessa. Päätaulussa on sähköverkon suojareleet ja katkaisijat, sulakkeet ja kuparinen pääjännitekisko. Generaattoreilta syötetään suoraan sähköteho päätauluille. Toisaalta päätaulua voidaan pitää sähkön pääjakelukeskuksena, josta kaikki muut kuluttajat saavat tarvitsemansa tehonsa. Kuten maapuolen sähköverkoissa, laivan sähköverkossakin jokainen lähtö päätaululta kuluttajalle erotetaan katkaisijalla vikatilanteiden eristämiseksi kunnossa olevasta verkosta. Laivan sähköverkon tärkeimmät ja isoimmat kuluttajat liitetään suoraan päätaulun syöttöihin kuten esimerkiksi ohjauspotkurit, peräsinkoneen sähkölaitteet, propulsiion apulaitteet, palopumput, palohälytyslaitteet, tyhjennyspumput ja ankkurivintturit. Tärkeimpien kuluttajien ohessa myös vähemmän tärkeät kuluttajat liitetään joko suoraan päätauluun tai apujakelukeskuksiin. Verkon ylikuormitustilanteissa osa niistä voidaan sulkea ja säästää energiaa tärkeimmille kuluttajille. Yleensä ylikuormitustilanteissa ilmastointi ja tuuletus sammutetaan ensin ja sen jälkeen tarvittaessa keittiönkuluttajat ja lastinjäähdytys. (Panu 2016: 10.)

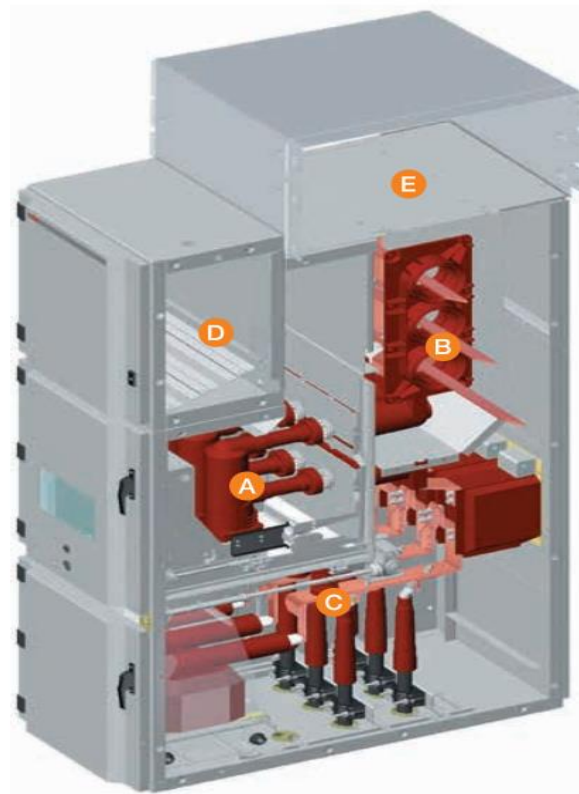
Laivoissa kuparikiskolla yhdistetään päätaulun kentät, johon generaattorit syöttävät sähkötehonsa, josta muut kuluttajat ottavat tarvitsemansa sähkötehonsa. Useimmiten päätaulu jaetaan kahteen tai useampaan osaan, jotka yhdistetään kiskokatkaisijoilla. Generaattorit ja kuluttajat jaetaan tasaisesti kahteen päätaulun, jotta vikatilanteissa osittainen toiminta olisi varmistettavissa. Yksittäisissä vikatilanteissa puolikkaalla päätaululla voidaan vielä operoida laivaa turvallisesti. Kaikki kuluttajat jaetaan eri ryhmiin toiminnallisuuden tai sijoituksen perusteella. (Panu 2016: 10.)

Isoissa laivoissa, joissa on keskijänneverkkoa, generaattorit syöttävät keskijännitetauluja, jotka ovat suuruudeltaan 1000-11 000 V:n kokoisia riippuen laivan koosta ja generaattoreiden määrästä. Keskijännitetaulu syöttää sähköpropulsiojärjestelmän keula- ja peräpotkurimoottoreita, muuntajia, ilmastointikompressoreita, pienjännitetauluja ja

muita suurempia laitteita. Kuvassa 4 (s. 26) on esitetty ABB:n valmistama UniGear ZS1-kojeistoa, joka toimii osana keskijännitetaulua. Tarvittaessa kuluttaja erotetaan pääkiskosta katkaisijalla, joka sijaitsee kohdassa A. Varsinainen jännitekisko sijaitsee kohdassa B ja kaapelit yleensä sijoitetaan kojeiston alaosaan kohtaan C. Jos pienjännittekiskoa on olemassa, se kulkee kohdassa D. Ilmanjäähdytystä varten on oma kanava kojeiston päällä ja kojeiston etuseinälle on sijoitettu päätaulun kaikki hallintalaitteet, kuten erilaiset mittarit ja painonapit. Keskijännitetaulu rakentuu näistä yksittäisistä kojeistoista. (Panu 2016: 10-11.)

Pienimmissä laivoissa, joissa ei ole keskijänniteverkkoa, generaattorit syöttävät suoraan pienjännitetauluja, jotka toimivat päätauluina. Näissä laivoissa pienjännitetaulut ovat vastuussa koko jakelusta. Yleensä päätaulun jännite on pienjänniteverkossa 400-690 V. Pienjännitetaulut syöttävät mm. moottorikäynnistinkeskuksia eli MCC:t (Motor control center), jakelukeskuksia eri järjestelmille ja muita pienempiä kuluttajia. Eri jakelukeskuksia ovat mm. voimakeskuksia PB (Power Board), valaistuskeskuksia HB (Heating Board), hätäkeskuksia EB (Emergency Board) ja hätävalaistuskeskuksia EL (Emergency Lighting Board).

Hätäkeskuksen tai vaihtoehtoisesti hätätaulun, jotka saavat syöttönsä hätägeneraattorilta tai akustosta, on tarkoitus toimia, jos normaalisyöttö päätauluista katkeaa. Hätäkeskus sijaitsee hätägeneraattorihuoneessa, jossa sijaitsee myös hätägeneraattorit. Hätäkeskus syöttää kriittisiä kuormituksia, kuten mm. merenkulkulaitteet, merenkulkuvalaistukset, ohjauslaitteet, palohälytyslaitteet, palonhavaitsemisjärjestelmä, sammutusjärjestelmä, hätä palopumppu, hätä pilssipumppu ja sisäinen viestintäjärjestelmä. Valvontahuone on äänieristetty ja ilmastoitu tila, josta laivan laitteistot voi hallita painikkeiden tai säätövipujen kautta. Valvontahuoneesta, joka sijaitsee konehuoneen vieressä, valvotaan mm. koneita, akkukoneita ja propulsiojärjestelmää. (Borstlap & Katen 2011: 83.)



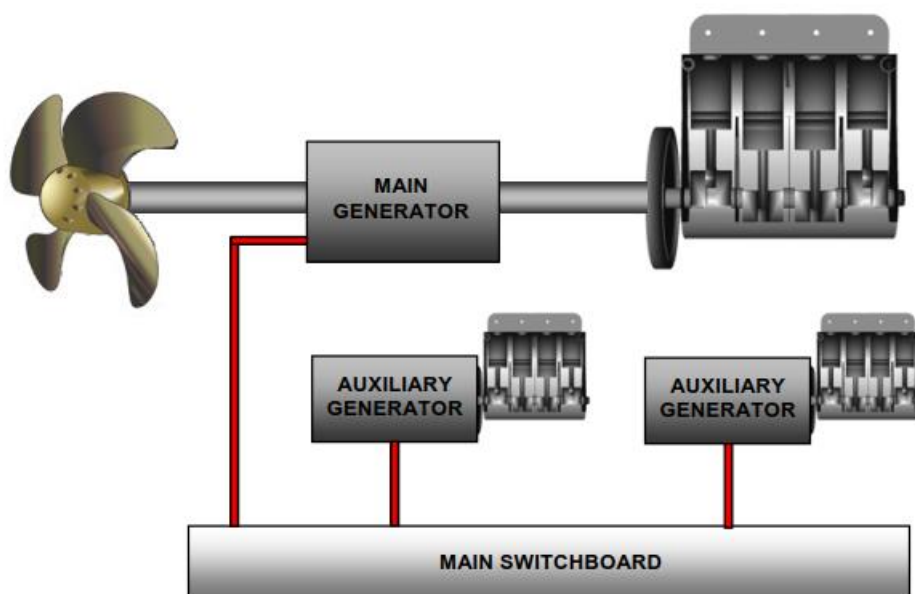
Unit compartments
 A Circuit-breaker compartment
 B Busbar compartment
 C Cable compartment
 D Low voltage compartment
 E Compact gas duct channel

Kuva 4. Keskijännitetaulun kojeisto ja sen osat. (ABB 2017: 11.)

2.4 Propulsiojärjestelmät

Laivoissa on tapana käyttää kahta erilaista propulsiojärjestelmää: mekaaninen propulsiojärjestelmä tai sähköinen propulsiojärjestelmä. Propulsiojärjestelmään sisältyy kuljetuskoneisto, joka muodostuu potkurimoottoreista ja koko voimansiirtoketjusta. Voimansiirtoketju muodostuu potkuriakseleista, laakereista, kytkimistä, vaiheista ja potkureista. Jos voimansiirto tapahtuu sähköisesti, niin kuljetuskoneistoon lasketaan generaattorit, sähkömoottorit sekä pääsähköverkkoon kuuluvat kaapelit ja laitteet. (Stähle 2016: 10.)

Mekaanisen propulsiojärjestelmän toiminta perustuu dieselmoottoreihin, jotka pyörittävät potkuriakselia ja vaihteiston välityksellä potkuria. Tätä järjestelmää kutsutaan myös dieselmekaaniseksi propulsiojärjestelmäksi (kuva 5). Tässä järjestelmässä dieselmoottorit jaetaan pää- ja apukoneisiin. Pääkoneet ovat vastuussa propulsiosta ja apukoneet sähköntuotannosta. Mekaanisen propulsiojärjestelmän edellytyksenä on se, että dieselmoottori ja potkuri sijoitetaan samalle linjalle ja tasolle. Mekaanisella propulsiolla varustetulla laivalla pitää olla erillinen peräsin. Mekaaninen järjestelmä on riippuvainen moottorin pyörimisnopeudesta. Dieselmoottorin hyötysuhde ja käynti eivät ole optimaalisia pienillä nopeuksilla ajettaessa. Toisaalta järjestelmä on hyvä, kun moottori säädetään optimaaliselle kierrosalueelle ja laiva ajetaan normaalilla avomerinopeudella. (Stähle 2016: 10.)

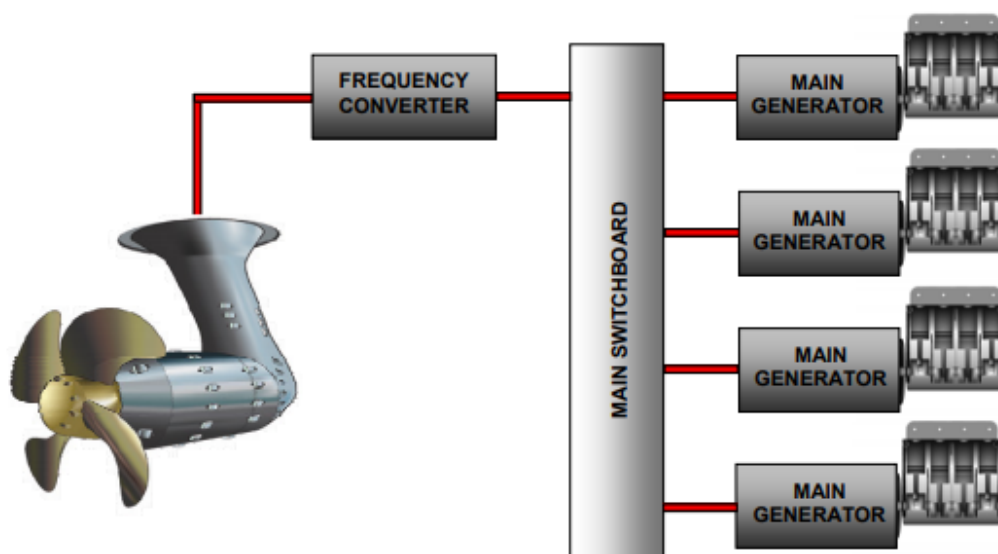


Kuva 5. Mekaanisen propulsiojärjestelmän periaate. (Ericsson & Fazlagic 2008: 40.)

Sähköisessä propulsiojärjestelmässä laivan propulsio toimii siten, että dieselmoottorit pyörittävät generaattoreita ja generaattoreiden tuottama sähköenergia saa propulsiojärjestelmän toimimaan. Kuten kuvasta 6 ilmenee, niin ensin mekaanisella energialla tuotetaan sähköenergiaa ja sen jälkeen sähköenergialla tuotetaan uudelleen mekaanista energiaa. Erona mekaaniseen propulsiojärjestelmään on se, että sähköisessä propulsiojärjestelmässä voidaan sijoittaa dieselmoottorit, generaattorit ja potkurikoneisto

eri tasoille, koska propulsioon tarvitsema teho siirretään sähköjohdoilla. Hyvänä puolena tässä on myös se, että dieselmoottorit ja generaattorit voidaan sijoittaa tiloihin, joita ei voisi muulla tavalla taloudellisesti hyödyntää. (Stähle 2016: 10.)

Sähköisellä propulsiojärjestelmällä on mahdollista vähentää sekä polttoaineen kulutusta että päästöjä vaihtelevassa kuormituksessa. Se myös mahdollistaa luotettavan propulsioon ja parantaa laivan ohjattavuutta. Olosuhteissa, joissa tehontarve vaihtelee, sähköinen järjestelmä on energiatehokkaampi kuin mekaaninen järjestelmä. Sähköisellä propulsiojärjestelmällä pienetkin kierrosnopeudet onnistutaan hyödyntämään paremmin ja taajuusmuuttajalla säätö onnistuu paremmin. (Stähle 2016: 10.)



Kuva 6. Sähköisen propulsiojärjestelmän periaate. (Ericsson & Fazlagic 2008: 41.)

2.5 Muuntaja

Muuntaja on teoreettisesti yksinkertainen vaihtosähkölaite, jota käytetään voimansiirrossa ja sähkönjakelussa. Muuntajan tärkein tehtävä on jännitetason asettaminen sopivaan arvoon voimansiirron ja sähkönjakelun kannalta. Taajuusmuuttajan syötön jännitetaso ja vaihekulma sovitetaan muuntajan avulla. Laivassa muuntajia

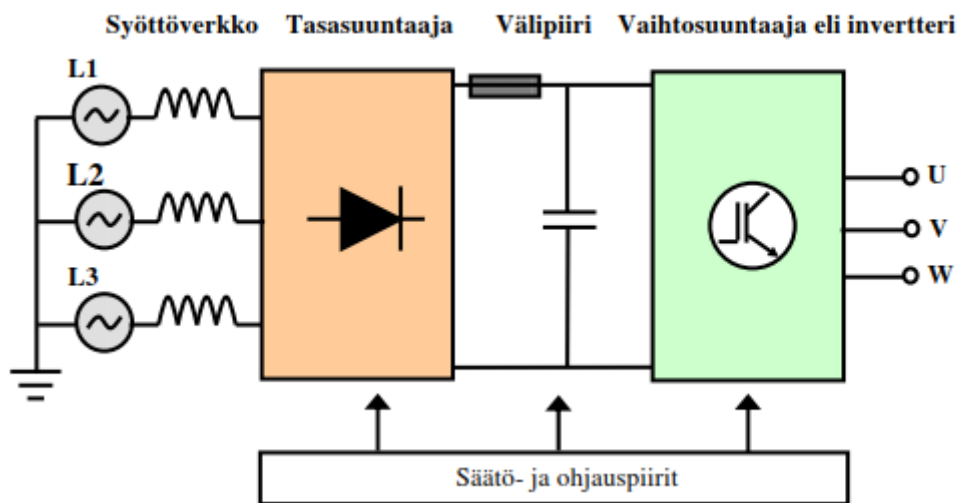
käytetään eri tarkoituksiin. Esimerkiksi propulsiolaitteistolle käytettävät muuntajat ovat erilaisia kuin jakeluun tarkoitettut muuntajat. Jakelumuuntajat jakavat sähkölaitteille sähköä jännitetason mukaan, kun taas propulsiomuuntajat muuttavat tarvittaessa jännitteen sopivaksi taajuusmuuntajille. Luokituslaitokset määräävät muuntajille omat ehtonsa. Laivoissa käytetään yleensä ilmajäähdytteisiä kuivamuuttajia. Muuntajaan on asennettava seuranta- ja hälytysjärjestelmä ja nesteen leimahduspiste on oltava riittävän korkea, jos muuntaja jäähdytetään jollakin nesteellä. (Panu 2016: 12; Ståhle 2016: 14.)

2.6 Taajuusmuuttaja

Laivan toiminnan kannalta taajuusmuuttajilla on yksi merkityksellisimmistä rooleista, sillä taajuusmuuttajilla syötetään propulsiomootoreita, pumppumootoreita, ilmastointia, vinssimootoreita sekä kansinosturimootoreita. Taajuusmuuttajilla muokataan sähkömoottorille käyttökelpoiseen muotoon ja kontrolloidaan moottorien pyörimisnopeutta. Tarkoitus on ohjata moottoria energiatehokkaasti ja mahdollisimman tarkasti. Nimensä mukaisesti taajuusmuuttaja muuttaa vaihtovirran ja –jännitteen taajuutta. Kuvan 7 mukaisesti taajuusmuuttajat voidaan toiminnan ja rakenteen kannalta jakaa kahteen osaan; pääpiiriin sekä ohjaus- ja säätöpiiriin. Pääpiiri koostuu tasasuuntaajasta, välipiiristä ja vaihtosuuntaajasta. (Koponen 2007: 44; Panu 2016: 14; Ståhle 2016: 14.)

Taajuusmuuttajia on olemassa joko välipiirillisinä tai suorina. Suorissa taajuusmuuttajissa vaihtosähköä ei tasasuunnata, vaan taajuusmuuttajaan syötetystä vaihtosähköstä muodostetaan uutta vaihtosähköä. Suurin osa teollisuudessa käytetyistä taajuusmuuttajista on kuitenkin välipiirillisiä. Niissä muodostetaan ensin vaihtosähköstä joko tasavirtaa tai tasajännitettä, jonka jälkeen se muutetaan halutun suuruiseksi ja taajuiseksi vaihtojännitteeksi. Välipiirilliset taajuusmuuttajat jaetaan virtavälipiirillisiin ja jännitevälipiirillisiin taajuusmuuttajiin. Virtavälipiirillinen taajuusmuuttaja, joka pienentää tasavirran aaltoisuutta, muodostuu tasa- ja vaihtosuuntayksiköstä sekä tasoituskuristimesta. Tasoituskuristin toimii energiavarastona, joka samalla pitää välipiirin virran tasaisena. Tämä mahdollistaa sen, että virtavälipiirillinen taajuusmuuttaja toimii virtalähteenä syöttäen moottorille sellaisen virran, että moottorin navoissa on

haluttu jännite. Jännitevälipiirillinen taajuusmuuttaja koostuu tasoituskuristimen lisäksi kondensaattorista, jolla saadaan tasajännitteen aaltoisuutta pienemmäksi. Nyt välipiirin kela ja kondensaattori toimivat energiavarastona. Jännitevälipiirillisissä taajuusmuuttajissa säädetään lähtöjännitteen amplitudia joko säätämällä välipiirin tasajännitettä tai muuttamalla lähtöjännitteen pulssikuviota, jota kutsutaan pulssinleveysmoduloinniksi. (Farin, Peltonen, Pykälä & Uski-Joutsenvuo 2009: 38; Kiiski 2012: 7-8.)



Kuva 7. Taajuusmuuttajan periaatekuva. (Koponen 2007: 44.)

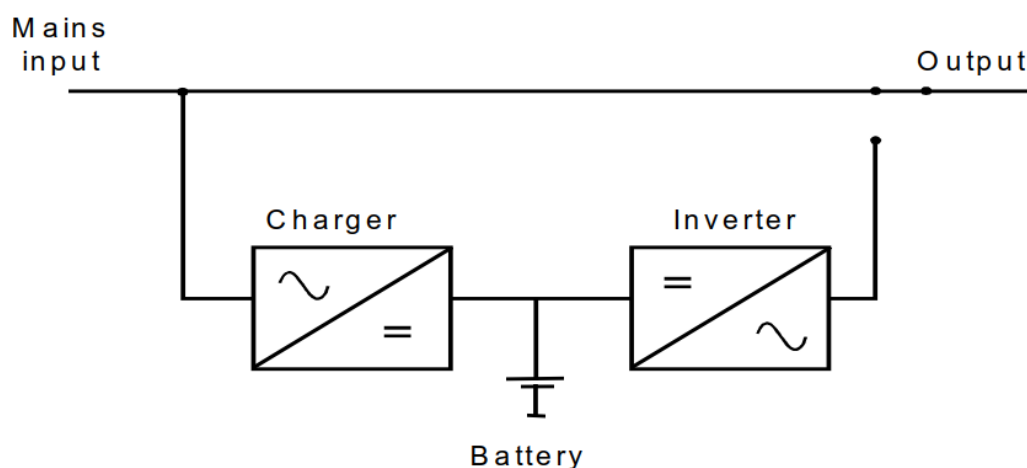
Taajuusmuuttajan säätötapoja voidaan jakaa kolmeen eri luokkaan: skalaariohjaus, vektorisäätö ja suora käämivuon ja vääntömomentti säätö eli DTC-tekniikka (Direct Torque Control). Näistä yksinkertaisin on skalaariohjaus, jossa staattorijännitteen tehollisarvoa ja taajuutta muuttamalla ohjataan pyörimisnopeutta. Skalaariohjauksessa nostetaan samassa suhteessa jännitettä ja taajuutta, kunnes molemmat saavuttavat nimellisarvonsa. Vektorisäätö on skalaariohjaukseen verrattuna suorituskykyisempi. Vektorisäädössä voidaan erikseen säätää moottorin pyörimisnopeutta ja vääntömomenttia. Yleensä vektorisäädössä on käytössä roottorivuo-orientoitu moottorimalli, sillä laskeminen on täten yksinkertaisinta. Suora käämivuon ja vääntömomentin säätö perustuu reaaliaikaisten säätöalgoritmien toteuttamiseen.

Tavoitteena on saavuttaa viiveetön momentin säätö, jonka avulla on mahdollista ohjata tarkasti moottorin nopeutta ja momenttia. (Karhunen 2016: 5; Panu 2016: 14)

2.7 UPS-laitteet

UPS-laite (Uninterruptible Power Supply) on staattinen ja tehoelektroninen laite, joka akkujensa avulla varmistaa katkottoman sähkönsyötön. Laivoissa kriittisimmät laitteet ja järjestelmät esimerkiksi merenkulkulaitteisto, automaatiojärjestelmät, tietoliikennejärjestelmät ja hälytys- ja turvajärjestelmät turvataan UPS-laitteilla. UPS-laitteiden tehtävänä on varmistaa häiriötön sähkönsyöttö kriittisille laitteille ja järjestelmille, joiden toiminta häiriintyy huomattavasti verkkojännitteen huonon laadun tai täydellisen katkeamisen vuoksi. UPS-laite muodostuu toiminnallisista kokonaisuuksista kuten tasasuuntaajasta, akusta, vaihtosuuntaajasta ja staattisesta ohituskytkimestä. UPS-laitteet luokitellaan neljään eri päätyyppiin niiden tekniikoiden perusteella: Off-line, linjainteraktiivinen, kaksimuunnostekniikan On-Line ja yksimuunnostekniikan On-Line. (ABB 2000: 92; Ylinen 2010: 18.)

Pienissä alle 2 kVA laitteissa käytetään Off-line tekniikkaa, missä akustoa pidetään valmiustilassa, mutta vaihtosuuntaaja ei aktiivisesti syötä normaalisti lähtöjännitettä. Kun verkkojännite ei ole saatavissa esim. sähkökatkoksen takia, niin kytketään vaihtosuuntaajaa syöttämään kuormaa aiheuttaen kytkentäaikaviivettä 2-10 ms (kuva 8). Off-line tekniikan etuna pidetään hyvää hyötysuhdetta ja kevyttä ja edullista rakennetta. (ABB 2000: 93)



Kuva 8. Off-line UPS. (ABB 2000: 93.)

Linjainteraktiivisella (Line Interactive) tekniikalla varustettu UPS soveltuu yksinkertaisten kuormien syöttämiseen. Verkkosähkö syötetään kuormille normaalitilanteessa suodatettuna, kun taas jännitekatkoksen aikana sähkönsyöttö tapahtuu akustosta vaihtosuuntaajan avulla. Linjainteraktiivinen tekniikka kykenee korjaamaan syöttöjännitettä paremmin kuin Off-Line tekniikalla varustettu UPS. Muuten Linjainteraktiivinen ja Off-Line tekniikka eivät eroa toisistaan.

2.8 Pienjänniteverkon jakelujärjestelmät

Maadoitusten tarkoituksena on ehkäistä suurten kosketusjännitteiden muodostumisen ja varmistaa riittävän suuren vikavirtatason. Järjestelmän maadoitustavan mukaan pienjänniteverkko jaetaan eri jakelujärjestelmiin. Kansainvälinen IEC-60364 –standardi erottelee kolme maadoitustapaa, jolla on kaksikirjaimiset koodit TN (Terra Neutral), TT (Terra Terra) ja IT (Isolated Terra). Kaksikirjaimisissa maadoituskoodissa ensimmäinen kirjain osoittaa maan ja tehonsyöttölaitteiston (generaattorin tai muuntajan) välistä yhteyttä eli jakelujärjestelmän maadoitustapaa:

- T: yksi piste on yhdistetty suoraan maahan
- I: mikään piste ei ole yhteydessä maahan (eristys) tai yksi piste on yhdistetty maahan korkean impedanssin kautta.

Toinen kirjain osoittaa maan ja syötettävän sähkölaitteen välistä yhteyttä:

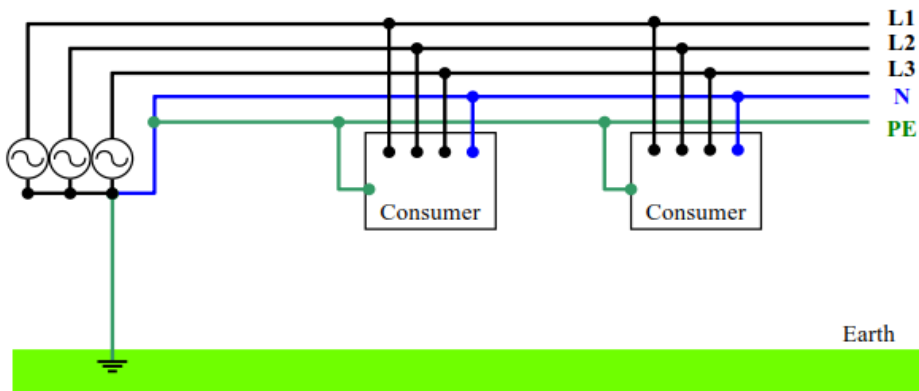
- T: suora yhteys maan kanssa jossakin pisteessä
- N: suora yhteys nollajohtimeen liittymiskohdassa, joka on kytketty maahan.

Suojajohtimen käytön mukaan TN-järjestelmät on jaoteltu TN-S (Terra Neutral-Separated) ja TN-C –järjestelmiin (Terra Neutral-Combined). Laivoissa maadoitus tapahtuu yleensä paikallisesti runkoon eli maana on laivan runko. Seuraavaksi käsitellään tarkemmin yllä mainitut jakelujärjestelmät. (Paju 2017: 13; ABB 2010: 5.)

2.8.1 TN-järjestelmä

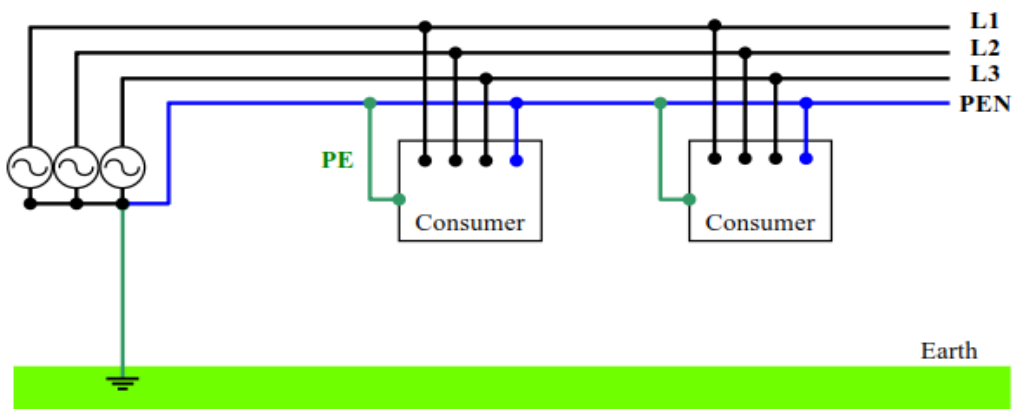
TN-järjestelmässä yksi piste on maadoitettu suoraan teholähteessä ja sähkölaitteiston jännitteelle alttiit osat on yhdistetty tähän pisteeseen suojamaadoitusjohtimilla. Nollajohtimen (N) ja suojamaadoitusjohtimen (PE) keskinäisen järjestelyn perusteella muodostetaan kolme eri TN-järjestelmää toisistaan. (SFS 2012: 71.)

TN-S –järjestelmässä on erillisen nollajohtimen lisäksi myös suojamaadoitusjohdin koko järjestelmän kaikissa osissa, joka tunnetaan 5-johdinjärjestelmänä. TN-S –järjestelmän kuorman epäsymmetrisyyden vuoksi on oltava nollajohdin. TN-S –järjestelmää käytetään joko yksi- tai kolmivaihejärjestelmässä. Yksivaihejärjestelmässä johtimia on kolme (L, N, PE) ja kolmivaihejärjestelmässä johtimia on viisi (3L, N, PE). Kuvassa 9 on esitetty TN-S –järjestelmän perusteellinen rakenne. (Kotovuori 2010: 22.)



Kuva 9. TN-S –jakelujärjestelmä. (Nobels: 21.)

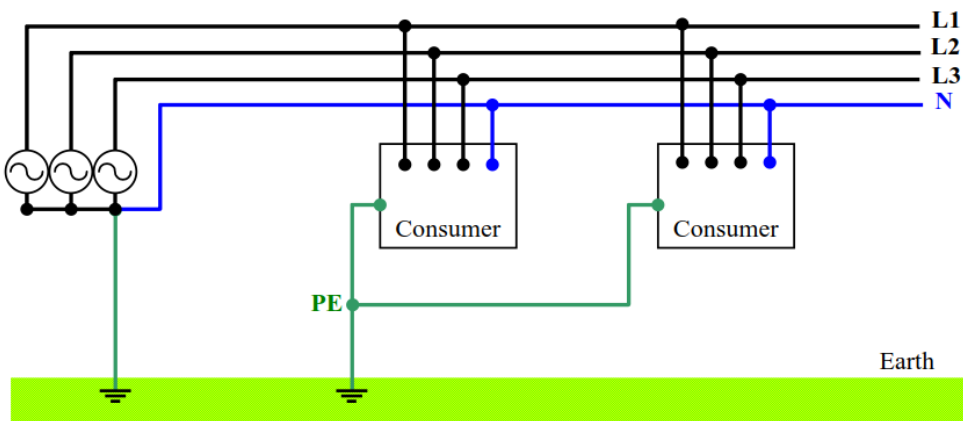
TN-C –järjestelmä on 4-johdinjärjestelmä, jossa nolla- ja suojamaadoitusjohdin on yhdistetty yhteen koko järjestelmässä. TN-C –järjestelmää käytetään kolmevaihejärjestelmässä, jossa on kolme vaihejohdinta ja yksi PEN-johdin. Kuvassa 10 on esitetty TN-C –järjestelmän perusteellinen rakenne. (Paju 2017: 13.)



Kuva 10. TN-C –jakelujärjestelmä. (Nobels: 21.)

2.8.2 TT-järjestelmä

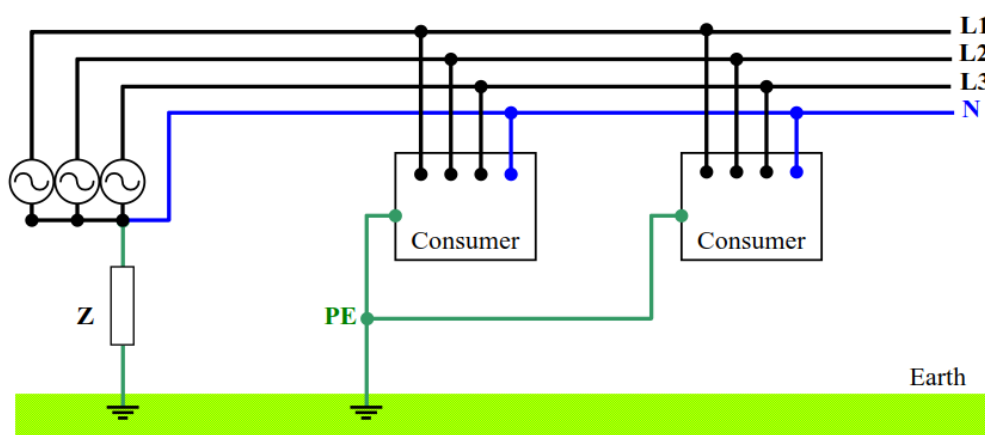
TT-järjestelmässä nollajohdin ja jännitteelle alttiit osat on yhdistetty maahan sähköisesti riippumattomiin maadoituselektrodeihin. TT-järjestelmässä vain yksi piste (generaattori tai muuntaja) maadoitetaan suoraan. Kuvassa 11 on esitetty TT-järjestelmän perusteellinen rakenne. (ABB 2010b: 443.)



Kuva 11. TT-jakelujärjestelmä. (Nobels: 21.)

2.8.3 IT-järjestelmä

IT-järjestelmä on käytetyin pienjänniteverkon jakelujärjestelmä laivoissa, mutta maapuolella sitä käytetään myös sairaaloissa. IT-järjestelmä eroaa muista jakelujärjestelmistä siten, että se on erotettu maasta, toisin sanoen se on kelluva järjestelmä. IT-järjestelmä eroaa muista jakelujärjestelmistä myös siten, että se tarjoaa parhaimman jatkuvuuden sähkönsyötölle, jossa ensimmäinen vika ei katkaise sähkönsyöttöä vaan katkaisija pysäyttää sähkönsyötön vasta toisen vian jälkeen. Tarvittaessa IT-järjestelmä voidaan muodostaa kytkemällä se maahan impedanssin välityksellä ja impedanssin suuruus valitaan käyttökohteen perusteella. Kuvassa 12 on esitetty IT-järjestelmän perusteellinen rakenne. (Paju 2017: 16; Schneider Electric 2015: E7.)



Kuva 12. IT-jakelujärjestelmä. (Nobles: 21.)

3 LUOKITUSLAITOKSET

Lontoossa sijaitsevat vakuutusyhtiöt kehittivät 1700-luvun toisella puoliskolla puolueettoman teknisen arviointijärjestelmän tarjotakseen vakuutusturvan laivoille. Vuonna 1760 muodostettiin Llyod's Register -nimiselle järjestölle hallitus tarjoamaan laivoille vakuutusturvia. Ensimmäiset aktiiviset vuodet on merkitty vuosille 1764-1766. Siihen aikaan tavoitteena oli luokitella vuosittain laivojen kuntoa. Laivan rungon kuntoa luokiteltiin kirjaimilla A, E, I, O tai U rakennustaidon ja rungon eheyden jatkuvuuden mukaan. Laitteiden kuntoa luokiteltiin kirjaimilla G (good), M (middle) tai B (bad) eli yksinkertaisesti hyvä, keskiverto tai huono. Myöhemmin G, M ja B kirjaimet korvattiin luvuilla 1, 2 ja 3. (IACS 2011: 3-4)

Käsite luokituksesta levisi hitaasti muihin maihin ja vakuutusmarkkinoille. Luokituslaitos BV (Bureau Veritas) perustettiin vuonna 1828 Antwerpenissa, Belgiassa, joka siirrettiin myöhemmin vuonna 1832 Pariisiin. 'Llyod's Register of British and Foreign Shipping' perustettiin uudelleen itsenäiseksi luokituslaitokseksi vuonna 1834 ja säännöt laivan rakentamiseen ja tarkastukseen julkaistiin samana vuonna. Italialainen RINA (Registro Italiano Navale) on perustettu vuonna 1861 ja yhdysvaltalainen ABS (American Bureau of Shipping) on perustettu vuonna 1862. Norjalaiset vakuutusyhtiöt kokosivat 1850-luvun loppupuolella yhteisiä sääntöjä laivanrakennukseen, mikä johdatti DNV-luokituslaitoksen (Det Norske Veritas) perustamiseen vuonna 1864. Saksalainen GL (Germanischer Lloyd) perustettiin 1867 ja japanilainen luokituslaitos ClassNK (Nippon Kaiji Kyokai) vuonna 1899. Nykyinen venäläinen luokituslaitos RS (Russian Maritime Register of Shipping) alkuperäisellä nimeltään River Register, perustettiin vuonna 1913. Muitakin luokituslaitoksia on perustettu myöhemmin esimerkiksi Puolassa vuonna 1936 (PRS, Polish Register of Shipping), entisessä Jugoslaviassa vuonna 1949 (Yugoslav Register of Shipping), joka sijaitsee nykyään Kroatiassa (CRS, Croatian Register of Shipping), Kiinassa vuonna 1956 (CCS, China Classification society), Koreassa vuonna 1960 (KR, Korean Register of Shipping) ja Intiassa vuonna 1975 (IRS, Indian Register of Shipping). (IACS 2011: 4)

Laivanrakentajille ja laivanvarustajille on tärkeä olla varma alustensa turvallisuudesta ja luotettavuudesta niiden koko elinkaaren ajan. Myös monet sidosryhmät kuten vakuutusyhtiöt, pankit, rahtaajat, laivojen miehistöt ja matkustajat, satamaviranomaiset rannikkoalueiden asukkaat laivareittien varrella haluavat tietoa laivan rakenteiden ja koneiston kunnosta. Tämä on ratkaistu perustamalla luokituslaitoksia, jotka pyrkivät varmistamaan sen, miten hyvin laiva tai alus täyttää niiden asettamat vaatimukset. Luokituslaitoksen asiantuntijat luokittavat aluksen hyväksyttyään laivan piirustukset ja tarkastettuaan laivan sääntöjen mukaisuuden. Laivan laivanvarustajille, laivanrakentajille, rahtaajille, lippuvaltioiden viranomaisille, vakuutuslaitoksille ja rahoittajille tiedotetaan laivan turvallisuudesta ja luotettavuudesta. Luokitus merkitään luokitustodistukseen ja luokituslaitoksen laivarekisteriin. Maailmanlaajuisesti luokituslaitoksia on yli 50, mutta ainoastaan 11 niistä kuuluu luokituslaitosten kattojärjestönä toimivaan IACS:ään (International Association of Classification Societies), joka on perustettu 7 johtavan luokituslaitoksen toimesta vuonna 1968. Kattojärjestön jäseniä ovat seuraavat 11 luokituslaitosta (Jaakkola 2010: 24; Bureau Veritas.):

- ABS (American Bureau of Shipping)
- BV (Bureau Veritas)
- CCS (China Classification Society)
- DNV (Det Norske Veritas)
- GL (Germanischer Lloyd)
- IRS (Indian Register of Shipping)
- KR (Korean Register of Shipping)
- LR (Lloyd's Register)
- NK (Nippon Kaiji Kyokai)
- RINA (Registro Italiano Navale)
- RS (Russian Maritime Register of Shipping).

Merenkulkua säännellään niin globaalilla, eurooppalaisella kuin kansallisella tasolla, jonka tavoitteena on kansainvälisen meriliikenteen ja kotimaanliikenteen turvallisuus ja ympäristöystävällisyys. Kansainvälisen sääntelyn pohjana ovat YK:n alaisen

kansainvälisen merenkulkujärjestön IMO:n (International Maritime Organization) yleissopimukset. Tärkeitä kansainvälisiä yleissopimuksia ovat meriturvallisuutta sääntelevä SOLAS (International Convention for the safety of Life at Sea) sekä ympäristönsuojelua sääntelevä MARPOL (International Convention for the Prevention of pollution from Ships). EU-sääntelyn päämääränä on varmistaa ihmisten ja tavaroiden vapaa liikkuvuus EU-alueella. Näiden lisäksi tarvitaan myös merenkulkua ja vesiliikennettä koskevaa maakohtaista lainsäädäntöä ja maakohtaisia määräyksiä. Maakohtaiset määräykset liittyvät pääsääntöisesti kotimaanliikenteessä liikennöivien laivojen teknistä turvallisuutta. Suomessa viranomaismääräyksiä antaa Trafi. (Trafi 2017.)

Valtioista riippumaton ulkopuolinen tarkastaja, IACS, on itsenäinen, ilman minkäänlaista roolia laivojen suunnittelussa, rakentamisessa, omistamisessa tai muissa vastaavissa toiminnoissa. Ihmishenkien, omaisuuden ja ympäristön suojelu on IACS:n päätavoite, joka toteutetaan edistämällä teknisten standardien kehittämistä ja käyttöönottoa. IACS antaa myös teknistä tukea ja tekee luokitustarkastuksia parantaakseen merenkulun turvallisuutta ja säännöstöä. Luokituslaitoksien lisäksi Vuonna 1974 kansainvälisen merenkulkujärjestön IMO:n julkaisema SOLAS sopimus toimii kaikkien luokituslaitosten sääntöjen perustana. Päätehtäväkseen IMO kehittää ja ylläpitää laivoja koskevaa säännöstöä, joka sisältää ohjeita turvallisuuteen, ympäristön suojeluun, laillisuuteen, tekniseen yhteistyöhön ja merenkulun turvallisuuteen. SOLAS-sopimuksen tavoitteena on auttaa minimiturvallisuustaso laivan rakenteille, varusteille ja toimintakyvylle. IACS, joka toimii IMO:ssa neuvonantajana, on ainoa valtioiden hallituksista riippumaton organisaatio, jolla on valtuudet kehittää sääntöjä ja panna ne käytäntöön. Suurin osa laivoista on rakennettu ja tarkastettu luokituslaitosten asettamien sääntöjen mukaan. Sertifikaattia voidaan hakea laivalle tai alukselle, joka on suunniteltu ja rakennettu luokituslaitoksen sääntöjen mukaan. (Jaakkola 2010: 25.)

Laivan omistaja valitsee jo suunnittelun alkuvaiheessa laivalleen luokituslaitoksen, joka on mukana laivan rakennusvaiheesta alkaen koko sen olemassaolon ajan. Yleensä vakuutusyhtiöiden vaatimuksesta luokituslaitos suorittaa arvostetun luokituksen. Luokituslaitoksen päämääränä on suorittaa puolueettomia tarkastuksia, tutkimuksia, luokituksia ja lakisääteisiä palveluita sekä tarjota tukea meriteollisuudelle ja sääntelyelimille. Näin pyritään ehkäisemään myös ympäristön saastumista ja parantamaan merenkulunturvallisuutta. Laivan luokittamisen tavoitteena on määrittää alusten turvallisuus ja merikelpoisuus. Laivan luokittamisella määritellään myös propulsio-, ohjaus-, sähköön tuotanto-, turva- ja apujärjestelmien toimivuus ja luotettavuus. (IACS 2011: 3; MV ESTONIAN onnettomuuden kansainvälinen tutkintakomissio 2000: 139-140.)

Luokituslaitoksilla on laivan sähköverkkoon koskevia yleisiä vaatimuksia, joilla pyritään turvaamaan matkustajia, miehistöä ja laivaa sähköisistä vaaroista. Alla on listattu muutamia yleisiä vaatimuksia (DNV GL 2018: 21, 24 & 25.):

- Laivassa on oltava kaksi molemminpuolisesti itsenäistä sähköntuotantojärjestelmää:
 - pääsähkönjakelujärjestelmä
 - hätäsähkönjakelujärjestelmä
- Kaikki kuluttajat, jotka ovat normaalikäytössä tarvittavia toimintoja, on syötettävä pääjakelujärjestelmästä riippumatta hätäjakelujärjestelmästä.
- Kaikki kuluttajat, jotka ovat hätäkäytössä tarvittavia toimintoja, on syötettävä hätäjakelujärjestelmästä riippumatta pääjakelujärjestelmästä.
- Vaihtosähkönjakelujärjestelmä on suunniteltava ja asennettava siten, että jännitteenvaihtelut päätauluissa rajoittuvat seuraavasti:
 - Jatkuvässä tilassa $\pm 2,5$ % järjestelmän nimellisjännitteestä
 - Muuttuvassa tilassa -15 %:sta +20 % järjestelmän nimellisjännitteestä
- Taajuusvaihtelut vaihtosähköjärjestelmissä on sallittu seuraavasti:

- Jatkuvassa tilassa ± 5 % järjestelmän nimellistaajuudesta
- Muuttuvassa tilassa ± 10 % järjestelmän nimellistaajuudesta
- Sähkölaitteen tuottama muuttuva jännite, taajuuden ja virtavaihtelut ei saa aiheuttaa toimintahäiriöitä muihin sähkölaitteisiin.

4 OIKOSULUN AIHEUTTAJAT JA VIKATYYPIT

Laivan toiminnallisuuden kannalta häiriötön sähkönjakelu on elintärkeää, koska sen keskeytyminen voi aiheuttaa vaaratilanteita ja merkittäviä kustannuksia. Laivan jakeluverkon suunnitteluun, komponentteihin ja suojaukseen panostetaan entistä enemmän, jotta laivan sähköverkosta saataisiin luotettava. Vikavirtojen aiheuttamista häiriöistä selviytyminen on tärkeä luotettavuuden kannalta laivan sähköverkolle. Laivan verkossa voi vikatyypeistä riippuen syntyä erisuuruisia virtoja, jotka on tunnistettava ja niiden vaikutusalue on rajoitettava mahdollisimman pieneksi vaaratilanteiden ehkäisemiseksi. (Salminen 2009: 1.)

Laivan sähköverkolle on ominaista melko korkeat oikosulkuvirrat, jotka johtuvat lyhyistä etäisyyksistä ja sähköä tuottavista generaattoreista sekä sähkömoottoreista, joilla on merkittävä rooli oikosulkuvirtojen syntymiseen. Myös vian ajankohta virran sinikäyrällä vaikuttaa oikosulkuvirran suuruuteen oikosulun alussa. Laivan sähköverkon toiminnan varmistamiseksi on tärkeä tietää verkon oikosulkuvirtojen arvot sekä eri komponenttien oikosulkukestoisuudet. Verkon eri komponenttien on kestettävä termiset ja mekaaniset vaikutukset, joita oikosulun synnyttämät virrat saavat aikaiseksi. Oikosulkuvirrat on määritettävä eri tilanteissa ja eri osissa verkkoa jonka perusteella laitteiden mitoittaminen, oikosulkusuojaus ja turvallisen käyttö voidaan toteuttaa. Oikosulkusuojauksen suunnittelun alussa määritetään tarkasteltavan verkon vikavirrat eri vikatapauksissa ja käytettävissä olevilla yhteyksillä. Verkon suojaus voidaan suunnitella selvitettyjen vikavirtojen avulla huomioiden eri komponenttien oikosulkukestoisuudet. (ABB 2000: 197; Salminen 2009: 1.)

4.1 Oikosulun aiheuttajat

Kansainvälisen IEC 60909- standardin mukaan oikosulku on vahingossa tai tarkoituksellisesti tapahtuva järjestelmän kahden tai useamman eri jännitteisen osan kytkeytyminen pienen resistanssin tai impedanssin kautta. Oikosulun syyt jaetaan kolmeen eri pääryhmään, vaikka syitä voi olla enemmän. Oikosulku voi tapahtua

pääeristyksen heiketessä, ylijännitteiden aiheuttamana tai virheellisten kytkentätoimenpiteiden aikaansaamana. Sähköverkon komponenttien eristyksen heikentyminen voi johtua esim. kiinteän tukieristimien likaantumisesta ajan myötä tai kosteudesta, jolloin eristeen pinnalla oleva lika alkaa johtaa vuotovirtoja, jotka voivat saada aikaan oikosulun syntymisen eristeen yli. Ylijännitteiden seurauksena voi syntyä myös oikosulkuja. Ylijännitteet jaetaan niiden muodon perusteella neljään eri ryhmään (Eronen 2014: 8-9; Salminen 2009: 3-4.):

- pienitaajuiset ylijännitteet
- loivat transienttiylijännitteet
- jyrkät transienttiylijännitteet
- erittäin jyrkät transienttiylijännitteet.

Ilmastollisista syistä oleva jyrkkä transienttiylijännite syntyy salaman suorasta tai epäsuorasta iskusta, jolloin ylijännite kulkeutuu johtavia rakenteita pitkin sähkölaitteistoon. Pientaajuinen ylijännite aiheuttaa harvoin oikosulkuja. Maasulku, kuorman irti kytkeytyminen, pitkän johdon tyhjäkäynti, verkon resonanssit ja ferroresonanssit, vajaanapainen toiminta ja generaattorin itseherääminen voivat aiheuttaa pientaajuisia ylijännitteitä. Pientaajuiset ylijännitteet aiheuttavat usein ensin maasulun, josta voi kehittyä lopulta oikosulku. Mutta merkittävin oikosulun aiheuttaja on virheelliset kytkentätoimenpiteet, jotka sattuvat inhimillisesti erilaisissa kytkentätilanteissa. Virheellisiin kytkentätoimenpiteisiin voidaan sisällyttää seuraavat seikat (Eronen 2014: 9.):

- ennenaikainen kytkeminen keskeneräiseen laitteistoon
- ennenaikainen kytkeminen työmaadoitettuun laitteistoon
- virran kytkeminen tai katkaisu siihen kykenemättömällä kytkinlaitteella
- virheellinen tahdistus.

Oikosulusta seuraa vähintäänkin sähköön käyttöhäiriö, jonka seurauksena sähkönjakelu todennäköisesti keskeytyy ainakin osassa verkkoa. Verkon vioittunut osa erotetaan katkaisijalla tai sulakkeella, jonka on pystyttävä katkaisemaan oikosulkuvirta. Oikosulkuvirran dynaamiset eli mekaaniset ja termiset eli lämmittävät vaikutukset ovat välittömiä ja ensisijaisia vaikutuksia, jotka esiintyvät vikapaikassa ja vikavirtapiirin

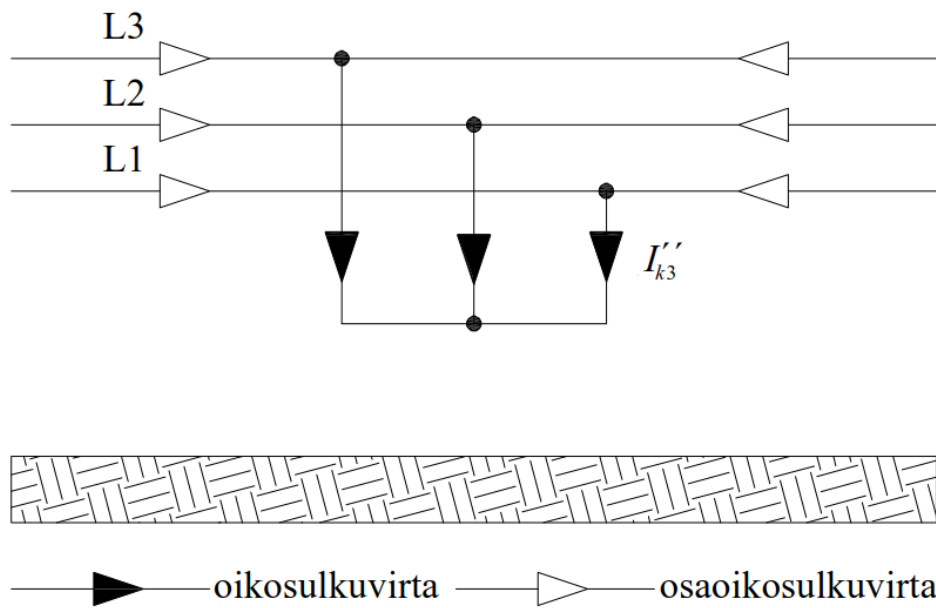
välittömässä yhteydessä. Oikosulkuvirran sisältämät sysäysvoimat aiheuttavat dynaamisia vaikutuksia, jotka rasittavat johtimia, tukieristimiä, kaapelivarusteita ja käämityksiä. Oikosulkuimpedansseissa syntyvät virtahäviöt saa aikaan termisiä vaikutuksia, jotka aiheuttavat virtapiirin osien nopean lämpenemisen. (Eronen 2014: 10.)

4.2 Oikosulkutyypit

Sähköverkossa tapahtuvalla oikosululla tarkoitetaan sitä, että verkon jännitteelliset osat ovat yhteyksissä muulla tavalla kuin sähkölähteen tai kuormituksen kautta. Syntymekanismin perusteella voidaan sähköverkon viat jakaa symmetrisiin ja epäsymmetrisiin tapauksiin. Kolmivaiheinen oikosulku, kaksivaiheinen oikosulku maasululla ja ilman sekä yksivaiheinen oikosulku eli maasulku ovat eri oikosulkutapauksia. (Salminen 2009: 4.)

4.2.1 Kolmivaiheinen oikosulku

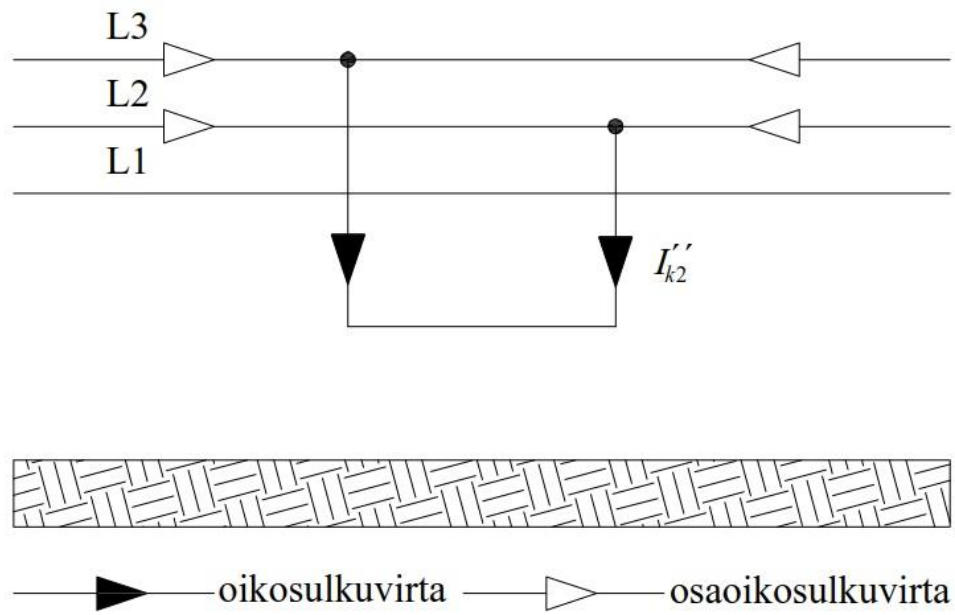
Kolmivaiheisessa oikosulussa kaikki vaiheet kytkeytyvät toisiinsa, jolloin verkon vaiheiden jännitteet putoavat vikapaikassa nolnaan. Tällöin kyseisessä kohdassa vaikuttaa oikosulkuvirta I_{k3} . Kuvasta 13 nähdään, että oikosulun syntyhetkellä jokainen vaihe alkaa syöttämään alkuoikosulkuvirtaa I_{k3}'' vikapaikkaan ja näin järjestelmä on kuormitettu symmetrisesti. Kolmivaiheinen oikosulku on oikosulkulaskennan perustapaus, koska se aiheuttaa yleensä suurimman vikavirran, jonka mukaan verkkoa mitoitetaan. Kolmivaiheista oikosulkuvirran arvoa tarvitaan verkon mitoittamisessa ja symmetrisyyden takia, sen laskenta on helpompaa kuin epäsymmetristen vikojen tapauksissa. Verkon komponenttien myötäimpedansseja eli verkon normaaleja oikosulkuimpedansseja voidaan käyttää laskettaessa kolmivaiheista oikosulkuvirtaa. (Eronen 2014: 11; Salminen 2009: 4-5.)



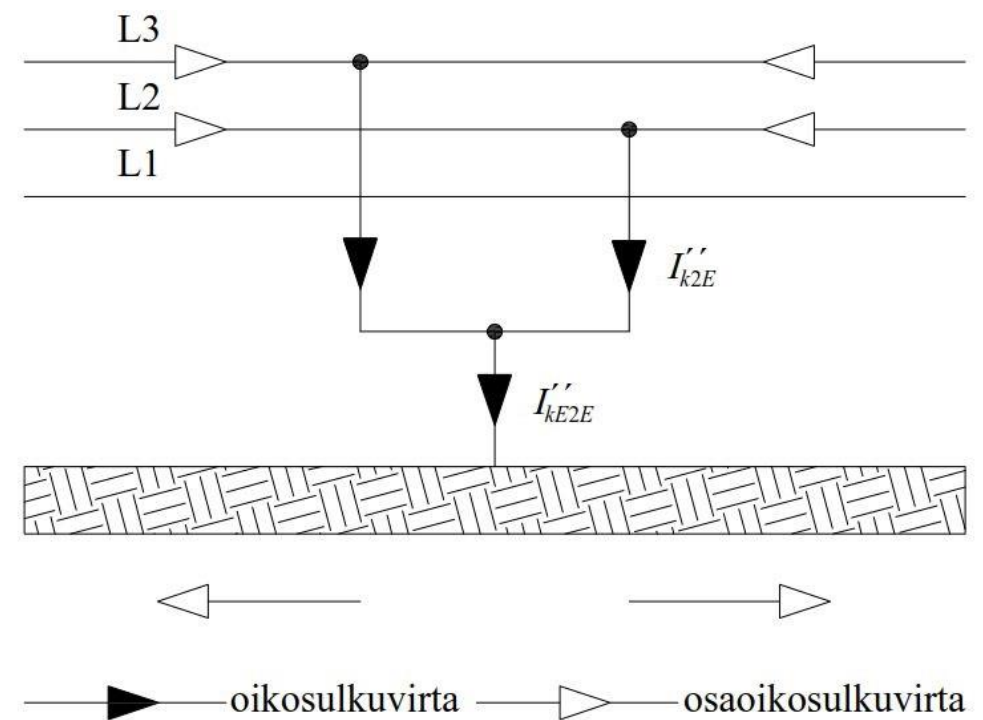
Kuva 13. Kolmivaiheinen oikosulku. (Salminen 2009: 5.)

4.2.2 Kaksivaiheinen oikosulku

Kaksivaiheisessa oikosulussa kaksi vaihetta yhdistyy yhteen ja vaiheiden jännitteet putoavat nolliksi, jos vikaimpedanssia ei esiinny. Kuvassa 14 havainnollistetaan tilannetta, jossa vian syntyessä vaihe 2 ja 3 syöttävät alkuoikosulkuvirtaa I''_{k2} . Kaksivaiheinen oikosulkuvirta on melkein aina pienempi kuin kolmivaiheinen oikosulkuvirta. Vain tahtikoneen läheisyydessä kaksivaiheisella oikosulkuvirralla on mahdollista kasvaa suuremmaksi. Tilanteessa, jossa kaksivaiheisen oikosulun aikana tapahtuu maakosketus, voi oikosulkuvirta pienentyä. Vikavirtojen suuruuteen vaikuttaa vikapaikassa esiintyvä koko verkon impedanssi ja mahdollisesti vikaimpedanssi. Vaiheissa esiintyvät vikavirrat voivat nousta yhtä suuriksi kuin pelkässä kaksivaiheisessa oikosulussa johtuen impedanssien suuruudesta. Kuvassa 15 on havainnollistettu kaksivaiheista oikosulua maasululla, jossa on esitettyä alkuoikosulkuvirrat I''_{k2E} ja I''_{kE2E} . (Salminen 2009: 5-7.)



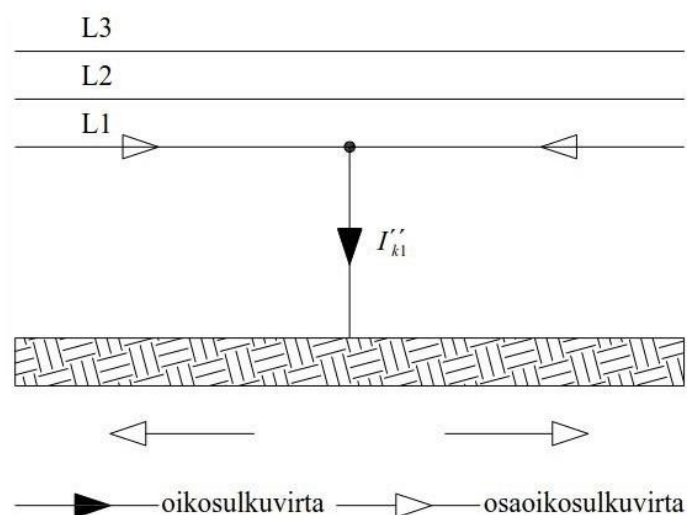
Kuva 14. Kaksivaiheinen oikosulku. (Salminen 2009: 5.)



Kuva 15. Kaksivaiheinen oikosulku maasululla. (Salminen 2009: 7.)

4.2.3 Yksivaiheinen oikosulku

Yksivaiheinen oikosulku eli maasulku on tilanne, jossa yksi vaihejohdin pääsee kosketuksiin maan kanssa eristysvian takia joko galvaanisesti tai valokaaren välityksellä. Maahan menevä virta riippuu huomattavasti verkon maadoitustavan mukaan. Yksivaiheinen vika, joka tapahtuu suoraan maadoitetussa verkossa, kutsutaan yksivaiheiseksi oikosuluksi, jonka täytyy kytkeä automaattisesti pois suuresta oikosulkuvirrasta johtuen. Yksivaiheinen oikosulku tuottaa yleensä pienimmän verkossa esiintyvän oikosulkuvirran muihin oikosulkuvirtoihin nähden. Maasta erotetussa tai sammutetussa verkossa yksivaiheinen oikosulkuvirta jää merkittävästi muita oikosulkuvirtoja pienemmäksi. Yksivaiheinen oikosulku ja alkuoikosulkuvirta I''_{k1} , joka kulkee maahan on esitetty kuvassa 16. (Eronen 2014: 13.)



Kuva 16. Yksivaiheinen oikosulku eli maasulku. (Salminen 2009:8.)

5 OIKOSULKUVIRRAN LASKENTA LAIVAN SÄHKÖVERKOLLE

Suunniteltaessa uutta laivaa kaikkien sääntelyvirastojen ja luokituslaitosten perusvaatimuksena on oikosulkuvirtalaskelma. Laivan sähköjärjestelmän luonnostaminen, suunnittelu ja käyttöönotto voi vaatia useita selvityksiä, jotta pystytään arvioimaan järjestelmän suoriutuvuutta, luotettavuutta, turvallisuutta sekä normaalissa tilassa että vikatilanteissa kuten oikosuluissa. Selvityksiä saatetaan tehdä kuormitusvirrasta, stabiiliudesta, moottorin käynnistyksestä, transienttitilasta, maadoituksesta tai yliaalloista. Laivan sähköjärjestelmän rakennetta on suunniteltava siten, että kaikki mahdolliset varotoimet estävät oikosulkuvirran syntyminen. Vaikka oikosulkutilanne on epätavallinen tilanne, niin oikosulkuvirtalaskelma on ehdoton laskelma, jolla varmistetaan sekä asianmukaista suunnittelua että laivan sähköverkkojärjestelmän turvallisen toimivuuden. Oikosulkuvirran laskennan päätarkoituksena on varmistaa, että sähköjärjestelmä ja sen komponentit kestävät oikosulkuvirran vaikutuksia oikosulkutilassa. Oikosulkusuojauksessa käytetään sulakkeita ja katkaisijoita suojauslaitteina. Oikosulkuvirran laskelmien päätarkoituksena on saada riittävän paljon tietoa, jotta suojauslaitteiden mitoittaminen onnistuisi varmemmin. Oikosulkusuojausta varten sähköverkkolaitteet on mitoittettava niin, että ne kestävät vikavirran tai katkaisijat ja sulakkeet katkaisevat vikavirran mahdollisimman nopeasti ja turvallisesti. (Dc Maritime Technologies Inc 2000: 3; IEC 1998: 12-13.)

Oikosulkuvirtoja laskettaessa on tärkeää ymmärtää yhden generaattorin tuottaman oikosulkuvirran eron useamman generaattorin tuottamasta oikosulkuvirrasta. Koneen sähköiset parametrit vaikuttavat ainoastaan oikosulkuvirran syntyymiseen, kun tarkastellaan eristyksissä olevaa konetta. (IEC 1998: 13-)

5.1 IEC 61361-1- standardi

Laivan sähköverkon oikosulkuvirran laskelmissa käytetään IEC 61363-1 -standardia, jota käytetään kolmivaiheisissa vaihtovirtajärjestelmissä. IEC 61363-1 -standarditutkimus mallintaa virtaa, joka kulkee sähköverkon epänormaaleissa tilanteissa aiheuttaen

oikosulkuvirtoja. Näiden vikavirtojen suuruudet on laskettava, jotta voidaan riittävän tarkasti määrittää taulujen maksimi kestovirrat. (SKM Power 2003: 2.)

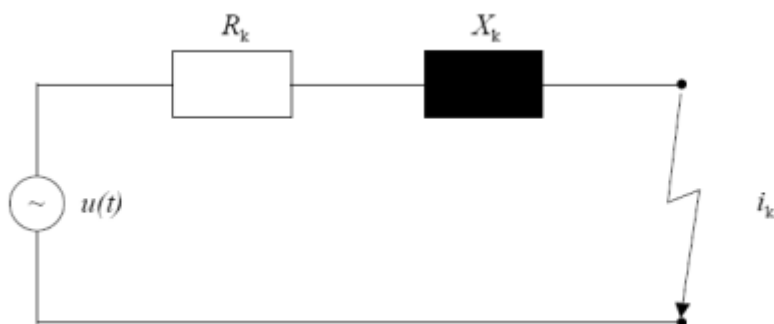
IEC 61363-1- standardiin perustuvat laskentamenetelmät on tarkoitettu symmetrisille oikosulkutilanteille kuten esimerkiksi kolmivaiheiselle oikosululle, oikosulkutilanteelle, jossa verkko on oikosulussa laivan runkoon tai tilanteelle, jossa kaikki vaiheet menevät oikosulkuun samanaikaisesti. Epäsymmetrisiä oikosulkutilanteita ei oteta huomioon tässä standardissa. Standardissa käytetyt laskentamenetelmät ja yhtälöt ovat riittävän tarkkoja laskettaessa oikosulkuvirran ensimmäisen 100 ms:n arvoja. Laskentamenetelmiä ja yhtälöitä voidaan käyttää myös laskettaessa oikovirtoja yli 100 ms:n arvoille, jos generaattorit ovat suoraan kytkettyinä kiskoon. 100 ms jälkeiselle ajanjaksolle jännitteensäätimen säätövaikutukset saattavat olla vallitsevia. Tässä standardissa ei kuitenkaan oteta huomioon laskelmia, jotka sisältävät jännitteensäätimen vaikutuksia. Standardin edellytyksenä on seuraavat asiat:

- Verkon taajuuden oltava 50 tai 60 Hz
- Verkossa on oltava yksi tai monta eri jännitetasoa
- Verkon on muodostuttava generaattoreista, moottoreista, muuntajista, muuntajista, kaapeleista ja taajuusmuuttajista
- Verkon nollajohtimen on oltava laivan rungossa kiinni impedanssin välityksellä
- Verkon nollajohtimen on oltava eristettynä laivan rungosta (IEC 1998: 5.)

Standardin tarkoituksena on esittää yhtälöitä sähköjärjestelmän aktiivisille komponenteille oikosulkuvirran laskentaan ja osoittaa kuinka tietty yhtälö voidaan yksinkertaistaa laskettaessa oikosulkuvirran arvoja sähköjärjestelmän eri kohdissa. Laskelma antaa arvion mahdollisesta oikosulkuvirrasta, kun järjestelmän aktiiviset komponentit tuottavat maksimaalisen panoksensa. (IEC 1998: 5.)

5.2 Oikosulkuvirran luonne

Yksivaiheisen oikosulkuvirran luonnetta ja käyttäytymistä voidaan tutkia kuvan 17 oikosulkupiirin sijaiskytkennän avulla, jossa syöttävän verkon jännitelähteeksi on valittu ideaalinen sinimuotoinen jännite.



Kuva 17. Oikosulkupiirin yksivaiheinen sijaiskytkentä. (Welling 2010: 15.)

Kuvan 17 oikosulkupiirille voidaan kirjoittaa seuraava yhtälö:

$$\hat{u} \sin(\omega t + \alpha) = R_k i_k + L_s \frac{di_k}{dt} \quad (1)$$

missä $\hat{u}$ = sinimuotoinen jännite, ω = kulmataajuus, t = aika oikosulun alkuhetkestä, α = jännitteen vaihekulma oikosulun alkuhetkellä, R_k = oikosulkupiirin resistanssi, i_k = oikosulkuvirta ja L_k = oikosulkupiirin induktanssi.

Vastaavasti yhtälöstä (1) saadaan ratkaistua oikosulkupiirin oikosulkuvirta i_k ajan t funktiona:

$$i_k(t) = \frac{\hat{u}}{Z_k} \left[\sin(\omega t + \alpha - \varphi_k) - e^{\frac{-t}{\tau}} \sin(\alpha - \varphi_k) \right], \quad (2)$$

missä Z_k = oikosulkupiirin vaiheimpedanssi, φ_k = impedanssin vaihekulma ja τ = piirin aikavakio. Yllä olevat voidaan esittää myös piirin resistanssin ja reaktanssin avulla seuraavilla yhtälöillä:

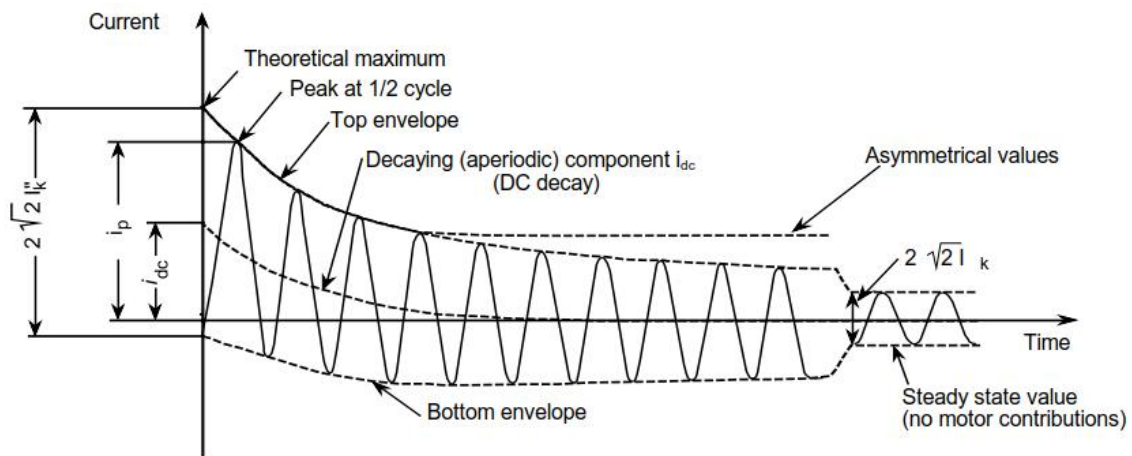
$$Z_k = \sqrt{R_k^2 + X_k^2}, \quad (3)$$

$$\varphi_k = \arctan \frac{X_k}{R_k} \quad (4)$$

$$\text{ja } \tau = \frac{X_k}{\omega R_k} = \frac{L_k}{R_k}. \quad (5)$$

Kolmivaiheiselle sähköverkolle on ominaista joko symmetriset tai epäsymmetriset oikosulut. Yhtälöstä 2 voidaan nähdä, että oikosulkuvirran suuruus riippuu millä ajan hetkellä verkko oikosulkeutuu. Virran vaihtelu johtuu yhtälössä 2 esiintyvistä sinimuotoisista termeistä, joista ensimmäinen, $\sin(\omega t + \alpha - \varphi_k)$, on oikosulkuvirran vaihtovirtakomponentti ja toinen, $e^{\frac{-t}{\tau}} \sin(\alpha - \varphi_k)$, on oikosulkuvirran tasavirtakomponentti. Oikosulun symmetria riippuu tasavirtakomponentin suuruudesta ja toisaalta tasavirtakomponentin suuruuteen vaikuttaa oikosulkuvirran syntyhetki. Tasavirtakomponenttia ei esiinny ollenkaan, kun oikosulku tapahtuu hetkellä, jolloin jännitteen ja verkon impedanssien vaihekulmien erotus on 0° tai 180° . Tällöin vaihtovirtakomponentti vaikuttaa ainoastaan oikosulkuvirran suuruuteen ja verkkoon syöttävä oikosulkuvirta on symmetrinen. Oikosulun tapahtuessa muulla ajanhetkellä, tasavirtakomponentti vaikuttaa syntyvän virran suuruuteen ja näin oikosulkuvirta on epäsymmetrinen. Tutkittaessa yhtälöä 2 huomataan, että virta saavuttaa huippuarvonsa, jos jännitteen ja impedanssin vaihekulmien erotus on $\pm 90^\circ$ kytkentähetkellä. Kyseisellä hetkellä tasavirtakomponentin alkuarvo on yhtä suuri kuin vaihtovirtakomponentin huippuarvo. Tämä ilmenee kuvassa 18, kun tarkastellaan oikosulkutapahtuman alkuhetkeä. (Eronen 2014: 15; Salminen 2009: 13; Welling 2010: 16.)

Kuten kuvasta 18 nähdään, niin tasavirtakomponentti i_{dc} alkaa heiketä eksponentiaalisesti heti alkuhetkestä ja päättyy lopulta nollaan. Tämän jälkeen piirissä esiintyy pelkästään symmetrinen vaihtovirta. Tasavirtakomponentin heikentyminen johtuu verkon resistanssista ja reaktanssista, joiden suhde määrää kuinka nopeasti heikentyminen tapahtuu. Tämä pätee ideaalisessa piirissä, missä verkon impedanssi ei muutu oikosulkutapahtuman aikana.



Kuva 18. Oikosuljetun piirin virta, jossa tasavirtakomponentti heikkenee. Kuvassa I_k'' on alkuoikosulkuvirta, i_p on sysäysoikosulkuvirta ja I_k on jatkuva tilan oikosulkuvirta.

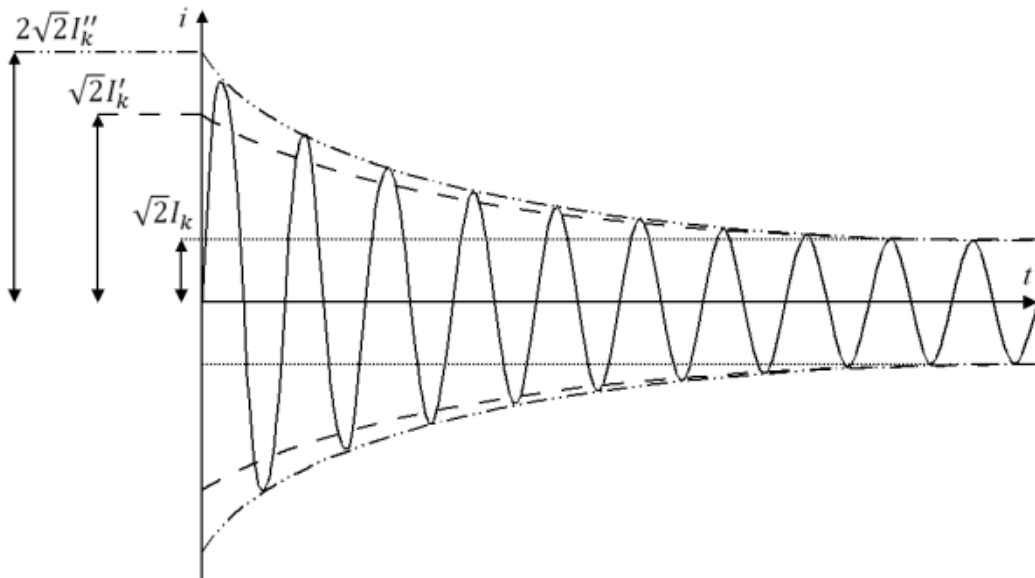
Todellisessa verkossa tilanne voi poiketa ideaalitapauksesta, sillä impedanssin suuruus voi muuttua oikosulun alkuhetkestä eteenkin, jos tahtikoneiden lähellä tapahtuu oikosulku. Tämä johtuu tahtikoneen sisäisistä reaktanssimuutoksista oikosulun aikana. Tahtikoneen syöttämän oikosulkuvirran osuus ja tahtikoneen vaikutus tasavirtakomponenttiin kasvaa sitä myötä, mitä lähempänä tahtikoneita oikosulku tapahtuu. Vaihtovirtakomponentin heikentyminen johtuu tahti- ja epätahtikoneista, joista syötetään oikosulkuvirtaa. Tämä tarkoittaa sitä, että sähkökoneen sisäinen impedanssi kasvaa oikosulun aikana. (Salminen 2009: 14.)

Kuvasta 18 nähdään myös, kuinka vaihtovirtakomponentti käyttäytyy oikosulun alkuhetkellä. Alkutilan oikosulkuvirta I_k'' , joka on vaihtovirtakomponentin tehollisarvo oikosulun syntyhetkellä, heikkenee nopeasti muutostilan oikosulkuvirraksi I_k' . Muutostilan oikosulkuvirta, joka on vaihtovirtakomponentin tehollisarvo, on oikosulun alkuhetken ja pysyvän tilan välimuoto. Muutostilassa oikosulkuvirta heikkenee vielä enemmän kuin aikaisemmin, jonka jälkeen se saavuttaa pysyvän tilan. Kun kaikki muutosilmiöt ovat heikentyneet, saavutetaan jatkuva tila, jolloin oikosulkuvirtaa kutsutaan jatkuvan tilan oikosulkuvirraksi I_k . Jatkuvan tilan virran laskeminen on yleensä vaikea, koska se riippuu monista muuttujista kuten esimerkiksi tahtikoneiden magnetoinnista, generaattoreiden ja muuntajien automaattisista jännitteensäädöistä.

Kuvasta 18 havaitaan myös sysäysoikosulkuvirran i_p , joka on suurin mahdollinen oikosulkuvirran hetkellisarvo. Oikosulun syntyhetkestä menee noin 10ms, kun ilmenee suurin oikosulkuvirran hetkellisarvo. Oikosulun syntyhetki, sitä edeltävä verkon kuormitus tilanne ja pyörivät tahti- ja epätahtikoneet vaikuttavat sysäysoikosulkuvirran suuruuteen. Sysäysoikosulkuvirta on laskettavissa alkuoikosulkuvirran tehollisarvon ja sysäyskertoimen κ avulla seuraavasti (Eronen 2014: 18-19.):

$$i_p = \kappa \sqrt{2} I_k'' \quad (6)$$

Toisaalta kuvassa 19 esiintyvässä tahtigeneraattorin syöttämässä symmetrisessä oikosulkuvirrassa ei esiinny tasavirtakomponenttia mutta alkutilan oikosulkuvirta, joka on suurimmillaan alkuhetkellä, heikkenee alkutilasta jatkuvaan tilaan asti. Kuten aikaisemmin todettiin, niin tasavirtakomponenttia ei esiinny, jos syntyhetkellä jännitteen vaihekulma oikosulun alkuhetkellä ja impedanssin vaihekulman erotus on nolla tai 180 astetta eli $\alpha - \varphi_k = 0^\circ$ tai 180° . (Eronen 2014: 17.)



Kuva 19. Tahtigeneraattorin epäsymmetrinen oikosulkuvirta. (Eronen 2014: 17.)

5.3 Oikosulkuvirran laskentamenetelmät ja yhtälöt

Laivan oikosulkuvirran määrittämiselle käytetään useita eri laskentamenetelmiä. Käyttötarpeen mukaan on olemassa ns. yksinkertaisia menetelmiä, joilla voidaan laskea nopeasti alustava ja suuntaa-antavat oikosulkuvirran arvot laivan kojeistoille. Mitä yksinkertaisempi laskentamenetelmä on, sitä epätarkempi se vastaavasti on. Yksi yksinkertaisimmista oikosulkuvirran laskentamenetelmistä on kertoa generaattoreiden nimellisvirtojen summa luvulla 10 ja summata se verkkoon liitettyjen moottoreiden nimellisvirtojen ja luvun 4:n tuloon eli:

$$I_k = 10 \cdot \sum I_{rG} + 4 \cdot \sum I_{rM}, \quad (7)$$

missä I_k = jatkuvan tilan oikosulkuvirta, I_{rG} = generaattorin nimellisvirta ja I_{rM} = moottoreiden nimellisvirta. Tämä laskelma antaa likimääräisen symmetrisen oikosulkuvirran tehollisarvon, josta määritetään oikosulkuvirran minimiarvo. Oikosulkuvirran minimiarvoa käytetään sähkökojeistolle maksimiarvona, jonka kohdalla sähkökojeiston suojauksen on viimeistään katkaistava virta. Eli toisin sanoen, oikosulkuvirran minimiarvo valitaan sähkökojeistoille maksimiarvoksi. Sähkökojeistot mitoitetaan joko symmetrisen tai epäsymmetrisen oikosulkuvirran mukaan, joten on tarpeen määrittää myös epäsymmetrisen oikosulkuvirran keskiarvo, epäsymmetrisen oikosulkuvirran maksimiarvo ja epäsymmetrisen oikosulkuvirran huippuarvo. Epäsymmetriset arvot lasketaan kertomalla symmetrinen oikosulkuvirran arvo seuraavilla kertoimilla:

- Epäsymmetrisen oikosulkuvirran keskiarvo = 1,4 * symmetrisen oikosulkuvirran arvo
- Epäsymmetrisen oikosulkuvirran maksimiarvo = 1,8 * symmetrisen oikosulkuvirran arvo
- Epäsymmetrisen oikosulkuvirran huippuarvo = 2,6 * symmetrisen oikosulkuvirran arvo. (Dc Maritime Technologies Inc 2000: 9-10.)

5.3.1 IEC 61363-1 –standardiin perustuva laskentamenetelmä

Helppoista ja yksinkertaisista laskentamenetelmistä huolimatta laivan sähköverkon oikosulkuvirtoja laskettaessa käytetään IEC 61363-1 -standardia. Standardiin perustuvaa menetelmää pidetään parhaana, sillä se sisältää vähiten laskentavaiheita ja antaa tarkimman oikosulkuvirran arvon sähköverkon kojeistoille. Tällä menetelmällä saadaan arvioitua myös matalin oikosulkuvirran arvo, jota voidaan käyttää turvallisesti katkaisijoiden ja sulakkeiden mitoittamiseen. Standardiin IEC 61363-1 perustuva menetelmä sisältää tiettyjä oletuksia, jotka lisäävät epätarkkuuksia, mutta näiden epätarkkuuksien voidaan arvioida vaikuttavan tulokseen alle 10 %. IEC-menetelmä perustuu oikosulkuvirran ylemmän käyrän arviointiin erillisiin aikavälein maksimiarvojen saamiseksi. Kun oikosulkuvirran arvot on saatu laskettua päätauluille, muille keskuksille lasketaan oikosulkuvirrat käyttäen kaapelien resistanssien ja reaktanssien arvoja, jotta saadaan sopiva impedanssin arvo, jonka perusteella saadaan kokonaisuikosulkuimpedanssin arvo. Lisäksi ylimääräisen syöttökaapelin aiheuttamat muutokset piirin aikavakiossa pitää sisällyttää impedanssin arvoon. (Dc Maritime Technologies Inc 2000: 30-31.)

Laivan sähköjärjestelmän oikosulkuvirran laskennassa moottorin kuormitukset voidaan joko keskittää päätauluun tai sähköjärjestelmän eri keskuksiin. Suuret moottorit on kuitenkin aina käsiteltävä oikosulkuvirtaa eksponentiaalisesti heikentävänä komponenttina. Generaattorin tuottama oikosulkuvirta lasketaan seuraavista perusyhtälöistä, missä vaihtovirtakomponentille I_{ac} ja tasavirtakomponentille I_{dc} on omat yhtälöt 8 ja 9:

$$I_{ac}(t) = (I_k'' - I_k') \left(\frac{-t}{T_d''} \right) + (I_k' - I_k) \left(\frac{-t}{T_d'} \right) + I_k \quad (8)$$

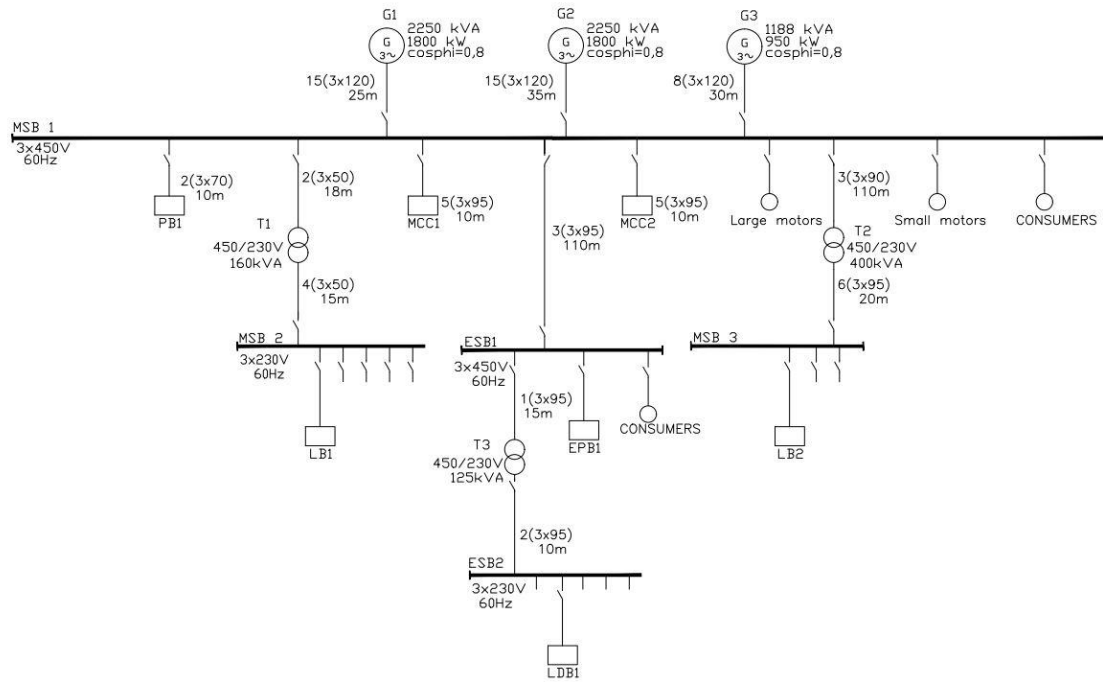
$$I_{dc}(t) = \sqrt{2} (I_k'' - I_N \sin \phi_n) \left(\frac{-t}{T_{dc}} \right), \quad (9)$$

missä T_d'' = generaattorin alkutilan aikavakio, T_d' = generaattorin muutostilan aikavakio, T_{dc} = generaattorin tasavirran aikavakio, t = oikosulun kesto aika ja I_N = nimellisvirta. Oikosulkuvirran jatkuvan tilan arvo I_k tulisi saada laitetoimittajalta. (Dc Maritime Technologies Inc 2000: 31.)

Alkutilan oikosulkuvirran I_k'' ja muutostilan oikosulkuvirran I_k' arvot riippuvat generaattorin alkutilan ja muutostilan impedansseista sekä generaattorin lähtöjännitteestä. Impedanssiarvot saadaan generaattorin valmistajalta. Jännitteet on laskettava koneen nimellisjännitteestä, jota nostetaan sisäisen impedanssin ylittämiseksi. Jännitteet ovat näin ollen jakaantuneet alkutilan ja muutostilan arvoihin ja sisäisen impedanssin voittamiseksi vaadittu osuus riippuu järjestelmän virrasta juuri ennen oikosulkua. Laskennassa yleensä oletetaan, että kone pyörii täydellä kuormalla juuri ennen oikosulkua. Näin varmistetaan, että laskettaessa saadaan korkein mahdollinen oikosulkuvirta arvo. (Dc Maritime Technologies Inc 2000: 31.)

5.3.2 Oikosulkuvirtalaskelma

Seuraavaksi lasketaan standardin IEC 61363-1 mukaan laivan sähköverkolle oikosulkuvirrat. Malliksi on valittu kuvan 20 mukainen sähköverkko, jossa sähkö laivan sähköverkolle tuotetaan kolmella generaattorilla. Generaattorit syöttävät päätaulua, jonka jännitetaso on 450 V ja taajuus 60 Hz. Päätaulu syöttää kahta 230 V:n valaistuspäätaulua muuntajilla ja yhtä 450 V:n hätätaulua ilman muuntajaa. Tarkoituksena on käydä vaihe vaiheelta läpi kaikki laskentavaiheet ja laskea oikosulkuvirrat päätaululle, alataululle, hätätaululle ja jakelukeskuksille. Tällä esimerkkilaskelmalla havainnollistetaan työssä toteutettavaa Excel-laskentamenetelmää. Taulukossa 2 on selitetty mitä kussakin vaiheessa lasketaan.



Kuva 20. Yksiviivakaavio laivan sähköverkosta. (Terasaki Electric Co. LTD.)

Taulukko 2. IEC 61363-1 standardiin perustuva vaiheittainen oikosulkuvirtalaskenta.

Vaihe	Selitys
1	Generaattoreiden oikosulkuvirtalaskelmat
1.1	Generaattoreiden vakiot
1.2	Kaapeleiden impedanssilaskelma
1.3	Generaattoreiden ja kaapeleiden yhteiset vakioarvot
1.4	Oikosulkuvirranlaskenta
2	Moottoreiden oikosulkuvirtalaskelma
2.1	Moottoreiden vakioarvot
2.2	Moottoreiden syöttämä oikosulkuvirta päätaululle
3	Oikosulkuvirta generaattoreille ja päätaulun kiskolle
3.1	Päätaulun oikosulkuvirran laskeminen
3.2	Generaattorin oikosulkuvirran laskeminen
4	Ekvivalenttigeneraattori
4.1	Vakioarvot M_* ja N_*
4.2	Ekvivalenttigeneraattorin aikavakiot
4.3	Ekvivalenttigeneraattorin impedanssit
5	Alakeskusten oikosulkuvirtojen mitoitus
5.1	Vakioarvot
5.2	Alakeskuksien jännitteiden määrittäminen
5.3	Oikosulkuvirtojen määrittäminen alakeskuksille
6	Oikosulkuvirrat muuntajan toisiopuolella
6.1	Impedanssien laskenta ja vakioarvojen määrittäminen
6.2	Muuntajien jännitteiden määrittäminen
6.3	Oikosulkuvirtojen määrittäminen

Vaihe 1

Ensimmäisessä vaiheessa lasketaan generaattoreiden tuottamia oikosulkuvirtoja päätaulua kohti.

Vaihe 1.1

Laskelmassa käytettävät generaattoreiden vakioarvot on esitetty taulukossa 3.

Taulukko 3. Generaattoreiden vakiot. (Terasaki Electric CO. LTD.)

Vakiot	Gen. 1	Gen. 2	Gen. 3
Nimellisteho S_N (VA)	$2250 \cdot 10^3$	$2250 \cdot 10^3$	$1188 \cdot 10^3$
Nimellisjännite U_N (V)	450	450	450
Nimellisvirta I_N (A)	2886,8	2886,8	1524,2
Tehokerroin $\cos \varphi$	0,8	0,8	0,8
Staattorin resistanssi R_a (%)	0,97	0,97	0,93
Synkroninen reaktanssi X_d (Ω)	245,80	245,8	194,00
Alkutilan reaktanssi X_d'' (%)	16,70	16,70	12,20
Muutostilan reaktanssi X_d' (%)	22,00	22,00	17,20
Alkutilan aikavakio T_d'' (s)	0,0093	0,0093	0,0062
Muutostilan aikavakio T_d' (s)	0,4260	0,4260	0,3240
Tasavirran aikavakio T_{dc}	0,0640	0,0640	0,0320
Jatkuvan tilan oikosulkuvirta I_{kd} (A)	8660,3	8660,3	4572,6

Vaihe 1.2

Seuraavaksi lasketaan generaattoreiden ja päätaulun välisten kaapeleiden impedanssit. Kaapelin resistanssi R ja reaktanssi X lasketaan yhtälöiden 10 ja 11 mukaisesti:

$$R = \frac{\text{kaapelin resistanssi} \left(\frac{\Omega}{\text{km}} \right) \cdot \text{kaapelin pituus} (m)}{\text{kaapeleiden määrä} \cdot 1000} \quad (10)$$

$$X = \frac{\text{kaapelin reaktanssi} \left(\frac{\Omega}{\text{km}} \right) \cdot \text{kaapelin pituus} (m)}{\text{kaapeleiden määrä} \cdot 1000}. \quad (11)$$

Esimerkki tapauksessa kaapeleiden resistanssia R ja reaktanssia X ei tarvitse laskea (kts. Taulukko 4), koska ne on annettu kaapelinvalmistajan toimesta.

Taulukko 4. Kaapeleiden impedanssit. (Terasaki Electric CO. LTD.)

Kaapeleiden impedanssit $Z = R + X$	Gen. 1	Gen. 2	Gen. 3
Kaapelin resistanssi R (Ω)	0,00026	0,00036	0,00058
Kaapelin reaktanssi X (Ω)	0,00015	0,00021	0,00033

Vaihe 1.3

Seuraavaksi muunnetaan alkutilan reaktanssien X_d'' , muutostilan reaktanssien X_d' , synkronisen reaktanssien X_d ja staattoreiden resistanssien R_a suhteellisarvot ohmeiksi yhtälöiden 12, 13, 14 ja 15 mukaisesti:

$$X_d'' = \frac{U_N^2 \cdot X_d''(\%) }{100 \cdot S_N}, \quad (12)$$

$$X_d' = \frac{U_N^2 \cdot X_d'(\%) }{100 \cdot S_N}, \quad (13)$$

$$X_d = \frac{U^2 \cdot X_d(\%) }{100 \cdot S_N} \text{ ja} \quad (14)$$

$$R_a = \frac{U^2 \cdot R_a(\%) }{100 \cdot S_N}, \quad (15)$$

jossa suhteellisarvot X_d'' , X_d' , X_d ja R_a ovat annettu prosentteina.

Ensimmäisen generaattorin alkutilan reaktanssi X_{d1}'' lasketaan seuraavasti:

$$X_{d1}'' = \frac{U_{N1}^2 \cdot X_{d1}''(\%)}{100 \cdot S_{N1}} = \frac{450^2 \cdot 16,70}{100 \cdot 2250 \cdot 10^3} = 0,01503 \, \Omega. \quad (12)$$

Vastaavasti toiselle ja kolmannelle generaattorille saadaan alkutilan reaktansseiksi $X_{d2}'' = 0,01503 \, \Omega$ ja $X_{d3}'' = 0,02079 \, \Omega$.

Ensimmäisen generaattorin muutostilan reaktanssi X_{d1}' lasketaan seuraavasti:

$$X_{d1}' = \frac{U_{N1}^2 \cdot X_{d1}'(\%)}{100 \cdot S_{N1}} = \frac{450^2 \cdot 22}{100 \cdot 2250 \cdot 10^3} = 0,0198 \, \Omega. \quad (13)$$

Vastaavasti toiselle ja kolmannelle generaattorille saadaan $X_{d2}' = 0,0198 \, \Omega$ ja $X_{d3}' = 0,0293 \, \Omega$.

Ensimmäisen generaattorin synkroninen reaktanssi X_{d1} saadaan seuraavasti:

$$X_{d1} = \frac{U_{N1}^2 \cdot X_{d1}(\%)}{100 \cdot S_{N1}} = \frac{450^2 \cdot 245,80}{100 \cdot 2250 \cdot 10^3} = 0,2212 \, \Omega. \quad (14)$$

Vastaavasti toiselle ja kolmannelle generaattorille saadaan $X_{d2} = 0,2212 \, \Omega$ ja $X_{d3} = 0,3307 \, \Omega$.

Ensimmäisen generaattorin staattorin resistanssi R_{a1} lasketaan seuraavasti:

$$R_{a1} = \frac{U^2 \cdot R_{a1}(\%)}{100 \cdot S_{N1}} = \frac{450^2 \cdot 0,97}{100 \cdot 2250 \cdot 10^3} = 8,73 \cdot 10^{-4} \, \Omega. \quad (15)$$

Vastaavasti toiselle ja kolmannelle generaattorille saadaan $R_{a2} = 8,73 \cdot 10^{-4} \, \Omega$ ja $R_{a3} = 1,5852 \cdot 10^{-3} \, \Omega$.

Seuraavaksi lasketaan generaattoreiden ja kaapeleiden yhteiset vakioarvot. Vakioarvot ovat alkutilan impedanssi Z_e'' , muutostilan impedanssi Z_e' , alkutilan aikavakio T_e'' , muutostilan aikavakio T_e' ja tasavirran aikavakio T_{dce} . Generaattoreiden 1, 2 ja 3 alkutilan arvoilla saadaan seuraavat tulokset yhteisille vakioarvoille:

$$Z_{e1}'' = \sqrt{(R_a + R_1)^2 + (X_{d1}'' + X_1)^2} = \sqrt{(8,73 \cdot 10^{-4} + 2,6 \cdot 10^{-4})^2 + (0,01503 + 1,5 \cdot 10^{-4})^2} = 0,01522 \Omega. \quad (16)$$

Vastaavasti saadaan muiden generaattoreiden alkutilojen impedansseiksi $Z_{e2}'' = 0,01529 \Omega$ ja $Z_{e3}'' = 0,02124 \Omega$. Muutostilan impedanssi ensimmäiselle generaattorille ja kaapelille

$$Z_{e1}' = \sqrt{(R_{a1} + R_1)^2 + (X_{d1}' + X_1)^2} = \sqrt{(8,73 \cdot 10^{-4} + 2,6 \cdot 10^{-4})^2 + (0,0198 + 1,5 \cdot 10^{-4})^2} = 0,01998 \Omega. \quad (17)$$

Vastaavasti muiden generaattoreiden ja kaapeleiden muutostilojen impedanssit $Z_{e2}' = 0,02004 \Omega$ ja $Z_{e3}' = 0,02973 \Omega$. Alkutilan aikavakio ensimmäiselle generaattorille ja kaapelille

$$T_{e1}'' = \frac{\{(R_{a1} + R_1)^2 + (X_{d1}'' + X_1)^2\} \cdot X_{d1}' \cdot T_{d1}''}{\{(R_{a1} + R_1)^2 + (X_{d1}'' + X_1)(X_{d1}' + X_1)\} \cdot X_{d1}''} = 0,0094 \text{ s}. \quad (18)$$

Vastaavasti muiden generaattoreiden ja kaapeleiden alkutilojen aikavakiot $T_{e2}'' = 0,0094 \text{ s}$ ja $T_{e3}'' = 0,0062 \text{ s}$. Ensimmäisen generaattorin ja kaapelin muutostilan aikavakio

$$T_{e1}' = \frac{\{(R_{a1} + R_1)^2 + (X_{d1}' + X_1)^2\} \cdot X_{d1} \cdot T_{d1}'}{\{(R_{a1} + R_1)^2 + (X_{d1}' + X_1)(X_{d1} + X_1)\} \cdot X_{d1}'} = 0,4301 \text{ s}. \quad (19)$$

Vastaavasti muiden generaattoreiden muutostilojen aikavakiot $T'_{e2} = 0,4315$ s ja $T'_{e3} = 0,3289$ s. Ensimmäisen generaattorin ja kaapelin tasavirran aikavakio

$$T_{dce1} = \frac{T_{dc1} + \left(\frac{X_1}{2\pi f R_{a1}}\right)}{1 + \left(\frac{R_1}{R_{a1}}\right)} = 0,0498 \text{ s.} \quad (20)$$

Vastaavasti muiden generaattoreiden ja kaapeleiden tasavirtojen aikavakiot $T_{dce2} = 0,0458$ s ja $T_{dce3} = 0,0239$ s.

Vaihe 1.4

Seuraavaksi lasketaan alkutilan E''_{q0} ja muutostilan jännitettä E'_{q0} yhtälöistä 21 ja 22. Generaattoreiden 1, 2 ja 3 alkutilan arvoilla saadaan seuraavat tulokset:

$$E''_{q01} = \sqrt{\left\{\left(\frac{U_{N1}}{\sqrt{3}} \cdot \cos \phi + (R_{a1} + R_1) \cdot I_{N1}\right)^2 + \left(\frac{U_{N1}}{\sqrt{3}} \cdot \sin \phi + (X''_{d1} + X_1) \cdot I_{N1}\right)^2\right\}} = 290,6 \text{ V.} \quad (21)$$

Vastaavasti muiden generaattoreiden alkutilan jännitteet: $E''_{q02} = 290,9$ V ja $E''_{q03} = 282,8$ V. Muutostilan jännite on

$$E'_{q01} = \sqrt{\left\{\left(\frac{U_{N1}}{\sqrt{3}} \cdot \cos \phi + (R_{a1} + R_1) \cdot I_{N1}\right)^2 + \left(\frac{U_{N1}}{\sqrt{3}} \cdot \sin \phi + (X'_{d1} + X_1) \cdot I_{N1}\right)^2\right\}} = 300,2 \text{ V.} \quad (22)$$

Vastaavasti muiden generaattoreiden muutostilojen jännitteet: $E'_{q02} = 300,6$ V ja $E'_{q03} = 291,6$ V.

Seuraavaksi lasketaan generaattorin oikosulkuvirrat päätaulua kohti. Lasketaan järjestyksessä generaattorin alkutilan oikosulkuvirta I''_{kd} , muutostilan oikosulkuvirta I'_{kd} , oikosulkuvirran vaihtovirtakomponentti $I_{acG}(t)$ puolen jakson kohdalla $\frac{T}{\pi}$ eli $t =$

0,0083 s, oikosulkuvirran tasavirtakomponentti I_{dcG} ja sysäysoikosulkuvirta i_p . Ensimmäisen generaattorin alkutilan oikosulkuvirta lasketaan seuraavasti:

$$I''_{kd1} = \frac{E''_{q01}}{Z_{e1}} = \frac{290,6}{0,01522} = 19093,3 \text{ A.} \quad (23)$$

Vastaavasti muiden generaattoreiden alkutilan oikosulkuvirrat: $I''_{kd2} = 19025,5 \text{ A}$ ja $I''_{kd3} = 13314,5 \text{ A}$. Muutostilan oikosulkuvirta on

$$I'_{kd1} = \frac{E'_{q01}}{Z'_{e1}} = \frac{300,2}{0,01998} = 15025,0 \text{ A,} \quad (24)$$

vastaavasti muiden generaattoreiden muutostilan oikosulkuvirrat: $I'_{kd2} = 15000 \text{ A}$ ja $I'_{kd3} = 9808,3 \text{ A}$. Ensimmäisen generaattorin oikosulkuvirran vaihtovirtakomponentti

$$I_{acG1}(t = 0,0083) = (I''_{kd1} - I'_{kd1}) \cdot e^{\frac{-t}{T''_{d1}}} + (I'_{kd1} - I_{kd1}) \cdot e^{\frac{-t}{T_{d1}}} + I_{kd1} \\ = 16568 \text{ A.} \quad (25)$$

Vastaavasti muiden generaattoreiden oikosulkuvirtojen vaihtovirtakomponentit $I_{acG2}(t = 0,0083) = 16520 \text{ A}$ ja $I_{acG3}(t = 0,0083) = 10592,2 \text{ A}$. Ensimmäisen generaattorin tasavirtakomponentti:

$$I_{dcG1}(t = 0,0083) = \sqrt{2} \cdot (I''_{kd1} - I_{N1} \sin \phi) \cdot e^{\frac{-t}{T_{dce1}}} = 20770,7 \text{ A.} \quad (26)$$

Vastaavasti muiden generaattoreiden tasavirtakomponentit: $I_{dcG2}(t = 0,0083) = 20389,5 \text{ A}$ ja $I_{dcG3}(t = 0,0083) = 12375,7 \text{ A}$. Ensimmäisen generaattorin sysäysoikosulkuvirta $i_{pG1}(t = 0,0083) = \sqrt{2}I_{acG1}(t) + i_{dcG1}(t) = \sqrt{2} \cdot 16580 + 20770,7 = 44218,36 \text{ A,}$ (27)

vastaavasti muiden generaattoreiden sysäysoikosulkuvirrat: $i_{pG2}(t = 0,0083) = 43778,0 \text{ A}$ ja $i_{pG3}(t = 0,0083) = 27355,33 \text{ A}$.

Vaihe 2

Moottorikuormat voidaan jakaa isoihin ja pieniin moottorikuormiin. Kummassakin on laskettu yhteen arvioitujen moottoreiden nimelliskoko. Toisessa vaiheessa lasketaan isojen ja pienien moottorikuormien tuottamia oikosulkuvirtoja päätaulua kohti. Moottorikuormien tuottamia oikosulkuvirtoja lasketaan suuntaa antavalla menetelmällä, sillä sekä tässä tapauksessa että yleensä suunnittelun alkuvaiheessa moottoreiden kaikki tiedot eivät ole saatavilla. Moottoreiden lähtöarvot on esitetty taulukossa 5. Suuntaa antavassa menetelmässä voidaan käyttää suurille ja pienille moottoreille taulukon 6 mukaiset vakioarvot.

Vaihe 2.1

Moottoreiden oikosulkuvirtalaskennassa tarvittavat lähtöarvot on esitetty taulukoissa 5 ja 6.

Taulukko 5. Moottoreiden tiedot. (Terasaki Electric CO. LTD.)

Vakiot	Suuri	Pieni
Nimellisjännite U_{rM} (V)	450	450
Nimellisvirta I_{rM} (A)	735,8	2922,7
Nimellisteho P_M (kW/kVA)	428/574	1700/2278
Taajuus f (Hz)	60	60

Taulukko 6. Moottoreiden vakioarvot. (IEC 1998: 55.)

Vakiot	Suuri	Pieni
Alkutilan impedanssi Z_M'' (p.u.)	0,16	0,2
Alkutilan reaktanssi X_M'' (p.u.)	0,15	0,188
Staattorin resistanssi R_s (p.u.)	0,034	0,043
Roottorin resistanssi R_r (p.u.)	0,021	0,027
Moottorin resistanssi R_M (p.u.)	0,055	0,07
Alkutilan aikavakio T_M'' (s), 60 Hz	0,01867	0,01867
Alkutilan aikavakio T_M'' (s), 50 Hz	0,0224	0,0224
Tasavirran aikavakio T_{dcM} (s), 60 Hz	0,01173	0,01173
Tasavirran aikavakio T_{dcM} (s), 50 Hz	0,01408	0,01408

Vaihe 2.2

Huomioimatta esikuomitettua virtaa ja käyttämällä yllä olevia vakioarvoja päädytään alla oleviin yhtälöihin, joilla voidaan laskea oikosulkuvirrat sekä pienille että suurille moottoreille. Suurille moottoreille voidaan määrittää moottorin alkutilan oikosulkuvirta

I''_{M1} , moottorin oikosulkuvirran vaihtovirtakomponentti I_{acM1} ja moottorin oikosulkuvirran huippuarvo eli sysäysosikosulkuvirta i_{pM1} . Pienille moottoreille voidaan vastaavasti määrittää alkutilan oikosulkuvirta I''_{M2} , moottorin oikosulkuvirran vaihtovirtakomponentti I_{acM2} ja moottorin sysäysosikosulkuvirta i_{pM2} . (IEC 1998: 55.)

Suurten moottoreiden kuormille on olemassa seuraavat yhtälöt:

$$I''_{M1} = 6,25 \cdot I_{rM}, \quad (28)$$

joten suurten moottoreiden kuormalle saadaan alkutilan oikosulkuvirraksi: $I''_{M1} = 6,25 \cdot 735,8 = 4598,75 \text{ A}$;

oikosulkuvirran vaihtovirtakomponentti puolen jakson $T/2$ kohdalla saadaan yhtälöstä:

$$I_{acM1} = 4 \cdot I_{rM} \quad (29)$$

joten suurten moottoreiden kuormalle saadaan oikosulkuvirran vaihtovirtakomponentiksi:

$$I_{acM1} = 4 \cdot 735,8 = 2943,2 \text{ A};$$

$$i_{pM1} = 10 \cdot I_{rM}, \quad (30)$$

joten suurten moottoreiden kuormalle saadaan oikosulkuvirran huippuarvoksi eli sysäysarvoksi: $i_{pM1} = 10 \cdot 735,8 = 7358 \text{ A}$.

Vastaavasti pienten moottoreiden kuormalle on olemassa seuraavat yhtälöt:

$$I''_{M2} = 5 \cdot I_{rM}, \quad (31)$$

joten pienten moottoreiden kuormalle saadaan alkutilan oikosulkuvirraksi: $I''_{M2} = 5 \cdot 2922,7 = 14613,5 \text{ A}$;

oikosulkuvirran vaihtovirtakomponentti puolen jakson $T/2$ kohdalla saadaan yhtälöstä:

$$I_{acM2} = 3,2 \cdot I_{rM}, \quad (32)$$

joten pienten moottoreiden kuormalle saadaan oikosulkuvirran vaihtovirtakomponentiksi: $I_{acM2} = 3,2 \cdot 2922,7 = 9352,6 \text{ A}$;

$$i_{pM2} = 8 \cdot I_{rM}, \quad (33)$$

joten pienten moottoreiden kuormalle saadaan oikosulkuvirran huippuarvoksi eli sysäysarvoksi: $i_{pM2} = 8 \cdot 2922,7 = 23381,6 \text{ A}$.

Vaihe 3

Kolmannessa vaiheessa lasketaan oikosulkuvirrat generaattoreille ja päätaulun kiskolle.

Vaihe 3.1

Tässä vaiheessa lasketaan oikosulkuvirrat päätaulun kiskolle. Menetelmässä lasketaan yhteen generaattoreiden ja moottoreiden oikosulkuvirtojen vaihtovirtakomponentit sekä erikseen oikosulkuvirtojen sysäysarvot. Generaattorit ja moottorit syöttävät oikosulkuvirran vaihtovirtakomponenttia seuraavasti päätaulun kiskolle:

$$I_{acbusbar} = \sum I_{acG} + \sum I_{acM},$$

missä $\sum I_{acG}$ on generaattoreiden oikosulkuvirtojen vaihtovirtakomponenttien summa ja $\sum I_{acM}$ on moottoreiden oikosulkuvirtojen vaihtovirtakomponenttien summa.

Eli tässä tapauksessa oikosulkuvirran vaihtovirtakomponentin arvo on seuraava:

$$I_{acbusbar} = \sum I_{acG} + \sum I_{acM} = I_{acG1} + I_{acG2} + I_{acG3} + I_{acM1} + I_{acM2} = 16580 + 16538,2 + 10592,2 + 2943,2 + 9352,6 = 56006,2 \text{ A}. \quad (34)$$

Vastaavasti lasketaan generaattoreiden ja moottoreiden sysäysoikosulkuvirtojen summa seuraavasti:

$$i_{pbusbar} = \sum i_{pG} + \sum i_{pM}, \quad (35)$$

missä $\sum i_{pG}$ on generaattoreiden sysäysoikosulkuvirtojen summa ja i_{pM} moottoreiden sysäysoikosulkuvirta.

Eli tässä tapauksessa sysäysoikosulkuvirtojen summaksi saadaan:

$$i_{pbusbar} = \sum i_{pG} + \sum i_{pM} = i_{pG1} + i_{pG2} + i_{pG3} + i_{pM1} + i_{pM2} = 44218,36 + 43778 + 27355,33 + 7358 + 23381,6 = 146091 \text{ A.}$$

Vaihe 3.2

Tässä vaiheessa lasketaan oikosulkuvirrat generaattoreiden navoille. Jokaiselle generaattorille lasketaan erikseen sekä oikosulkuvirran vaihtovirtakomponentin arvo että sysäysoikosulkuvirran arvo. Näin saadaan selville oikosulkuvirrat generaattoreiden navoilla. Generaattoriin napaan aiheuttama oikosulkuvirran vaihtovirtakomponentin arvo saadaan siten, että vähennetään päätaulun kiskolle aiheuttamasta oikosulkuvirran vaihtovirtakomponenttista generaattorin oikosulkuvirran vaihtovirtakomponentin arvo. Oikosulkuvirran vaihtovirtakomponentti ensimmäisen generaattorin navalle lasketaan seuraavasti:

$$I_{acP1} = I_{acbusbar} - I_{acG1} = 56006,2 - 16580 = 39426,2 \text{ A}, \quad (36)$$

vastaavasti toiselle ja kolmannelle generaattoreille saadaan seuraavat tulokset:

$$I_{acP2} = 39468 \text{ A ja } I_{acP3} = 45414 \text{ A.}$$

Generaattoriin aiheuttama sysäysoikosulkuvirran arvo saadaan siten, että vähennetään päätaulun kiskolle aiheuttamasta sysäysoikosulkuvirrasta generaattorin

sysäysoikosulkuvirran arvo. Sysäysoikosulkuvirta ensimmäisen generaattorin navalle lasketaan seuraavasti:

$$i_{pP1} = i_{pbusbar} - i_{pG1} = 146091 - 44218,36 = 101872,64 \text{ A}, \quad (37)$$

vastaavasti toiselle ja kolmannelle generaattoreille saadaan seuraavat tulokset:

$$i_{pP2} = 102313 \text{ A ja } i_{pP3} = 118735,67 \text{ A}.$$

Vaihe 4

Sähköverkossa olevat generaattorit ja moottorit voidaan ajatella yhdeksi isoksi ekvivalenttigenaattoriksi. Ekvivalenttigenaattorille määritetään vakioarvot ja lasketaan sen tuottama oikosulkuvirrat. Ensin määritetään ekvivalenttigenaattorin nimellisteho, joka muodostuu generaattoreiden ja moottoreiden nimellistehojen summasta seuraavan yhtälön mukaisesti:

$$P_{N*} = P_{G1} + P_{G2} + P_{G3} + P_{M1} + P_{M2} = 8540 \text{ kVA eli } 6832 \text{ kW}. \quad (38)$$

Tämän jälkeen voidaan laskea ekvivalenttigenaattorille nimellisvirran yhtälön 39 mukaisesti:

$$I_{N*} = \frac{P_{N*}}{U_{N*} \cdot \sqrt{3}} = \frac{8540 \cdot 10^3}{450 \cdot \sqrt{3}} = 10956,83 \text{ A}, \quad (39)$$

Vaihe 4.1

Tämän jälkeen määritetään vakiot M_* ja N_* . Ensin lasketaan ekvivalenttigenaattorin alkutilan oikosulkuvirta I''_{k*} , muutostilan oikosulkuvirta I'_{k*} ja jatkuvan tilan oikosulkuvirta I_{k*} . Ekvivalenttigenaattorin alkutilan oikosulkuvirta I''_{k*} muodostuu generaattoreiden ja moottoreiden alkutilan oikosulkuvirtojen summasta alla esitetyn yhtälön mukaisesti:

$$I''_{k*} = I''_{kd1} + I''_{kd2} + I''_{kd3} + I''_{M1} + I''_{M2} = 70645,55 \text{ A.} \quad (40)$$

Vastaavasti muutostilan oikosulkuvirta I'_{k*} , saadaan summaamalla generaattoreiden muutostilan oikosulkuvirrat:

$$I'_{k*} = I'_{kd1} + I'_{kd2} + I'_{kd3} = 39833,3 \text{ A,} \quad (41)$$

ja vastaavasti jatkuvan tilan oikosulku I_{k*} lasketaan summaamalla generaattoreiden jatkuvan tilan oikosulkuvirrat:

$$I_{k*} = I_{kd1} + I_{kd2} + I_{kd3} = 21893,2 \text{ A.} \quad (42)$$

Vakiot M_* ja N_* lasketaan seuraavasti:

$$M_* = I''_{k*} - I'_{k*} = 30812,5 \text{ A;} \quad (43)$$

$$N_* = I'_{k*} - I_{k*} = 17940,1 \text{ A.} \quad (44)$$

Vaihe 4.2

Seuraavaksi lasketaan ekvivalenttigeneraattorille aikavakiot. Aluksi lasketaan alkutilan aikavakio T''_{d*} . Aikavakion määrittäminen edellyttää funktion $K''_*(t) = \sum K''_G(t) + \sum K''_M(t)$ laskemista. Jokaiselle generaattorille lasketaan erikseen oma $K''_G(t)$ puolen jakson ajalle $\frac{T}{2}$, jolloin $t = 0,0083$ s. Vastaavasti jokaiselle moottorille lasketaan myös erikseen oma $K''_M(t)$ puolen jakson ajalle $t = 0,0083$ s. Ensimmäiselle generaattorille $K''_1(t)$ lasketaan seuraavasti:

$$K''_{G1}(t = 0,0083) = (I''_{kd1} - I'_{kd1}) \cdot e^{-\frac{t}{T''_d}} + I'_{kd1} = (19093,3 - 15025,0) \cdot e^{-\frac{0,0083}{0,0093}} + 15025,0 = 16769,18. \quad (45)$$

Vastaavasti $K''_{G2}(t = 0,0083) = 16649,01$ ja $K''_{G3}(t = 0,0083) = 10727,6$.

Seuraavaksi lasketaan suurille ja pienille moottoreille funktion $K_M''(t)$ arvo. Suurille moottoreille lasketaan seuraavasti yhtälön 46 mukaisesti:

$$K_{M1}''(t = 0,0083) = I_{M1}'' \cdot e^{-\frac{t}{T_{M1}''}} = 4598,9 \cdot e^{-\frac{0,0083}{0,01867}} = 2948,3; \quad (46)$$

vastaavasti pienille moottoreille $K_{M2}''(t = 0,0083) = 9368,8$. Näin $K_*(t)$ voidaan määrittää yhtälön 47 mukaisesti:

$$K_*(t = 0,0083) = K_{G1}''(t) + K_{G2}''(t) + K_{G3}''(t) + K_{M1}''(t) + K_{M2}''(t) = 56462,9. \quad (47)$$

Tämän jälkeen voidaan ekvivalenttigeneraattorille määrittää alkutilan aikavakio T_{d*}'' arvo alla esitetyn yhtälön mukaisesti:

$$T_{d*}'' = \frac{-t}{\ln\left(\frac{K_*(t) - I_{K*}'}{M_*}\right)} = \frac{-0,0083}{\ln\left(\frac{56462,9 - 39833,3}{30812,5}\right)} = 0,0135 \text{ s}. \quad (48)$$

Tämän jälkeen määritetään ekvivalenttigeneraattorille muutostilan aikavakio T_{d*}' . Muutostilan aikavakion määrittämiseksi pitää aluksi selvittää ekvivalenttigeneraattorin oikosulkuvirran vaihtovirtakomponentti $I_{ac*}(t)$. Jokaiselle generaattorille on laskettu erikseen oikosulkuvirran vaihtovirtakomponentti $I_{acG}(t)$ puolen jakson ajalle $t = 0,0083$ s yhtälössä 25 sivulla 63. Moottoreille on laskettu myös erikseen oikosulkuvirran vaihtovirtakomponentti $I_{acM}(t)$ ajalla $t = 0,0083$ s yhtälöissä 29 ja 32 sivuilla 66 ja 67. Ensimmäiselle generaattorille lasketaan oikosulkuvirran vaihtovirtakomponentti $I_{acG1}(t)$ puolen jakson kohdalla seuraavan yhtälön mukaisesti:

$$I_{acG1}(t = 0,0083) = (I_{kd1}'' - I_{kd1}') \cdot e^{-\frac{t}{T_{d1}''}} + (I_{kd1}' - I_{kd1}) \cdot e^{-\frac{t}{T_{d1}'}} + I_{kd1} = \\ (19093,3 - 15025,0) \cdot e^{-\frac{0,0083}{0,0093}} + (15025,0 - 8660,3) \cdot e^{-\frac{0,0083}{0,4260}} + 8660,3 = 16568 \text{ A}.$$

Vastaavasti $I_{acG2}(t = 0,0083) = 16520 \text{ A}$ ja $I_{acG3}(t = 0,0083) = 10593 \text{ A}$.

Suurien ja pienten moottoreiden oikosulkuvirtojen vaihtovirtakomponenttien määrittämiseen pätee sivulla 66 ja 67 esitetyt yhtälöt 29 ja 32. Yhtälöt 30 ja 33 pätevät puolen jakson kohdalla $\frac{T}{2}$, jolloin $t = 0,0083$ s. Yhtälöistä saadut tulokset suurille ja pienille moottoreille pätevät tässä tapauksessa. Suurille M_1 ja pienille M_2 moottoreille oikosulkuvirran vaihtovirtakomponentit lasketaan alla esitettyjen yhtälöiden mukaisesti:

$$I_{acM1}(t = 0,0083) = 4 \cdot I_{rM1} = 4 \cdot 735,8 = 2943,2 \text{ A ja}$$

$$I_{acM2}(t = 0,0083) = 3,2 \cdot I_{rM2} = 3,2 \cdot 2922,7 = 9352,6 \text{ A.}$$

Ekvivalenttigeneraattorin oikosulkuvirran vaihtovirtakomponentti muodostuu generaattoreiden ja moottoreiden oikosulkuvirran vaihtovirtakomponenttien summasta seuraavan yhtälön mukaisesti:

$$I_{ac*}(t = 0,0083) = I_{acG1}(t) + I_{acG2}(t) + I_{acG3}(t) + I_{acM1}(t) + I_{acM2}(t) = 55986,3 \text{ A.} \quad (49)$$

Ekvivalenttigeneraattorille voidaan laskea muutostilan aikavakio T'_{d*} seuraavan yhtälön mukaisesti:

$$T'_{d*} = \frac{-t}{\ln \left(\frac{I_{ac*}(t) - \left(M_* \cdot e^{\frac{-t}{T'_{d*}}} + I_{k*} \right)}{N_*} \right)} = \frac{-0,0083}{\ln \left(\frac{55986,3 - \left(30812,5 \cdot e^{\frac{-0,0083}{0,0135}} + 21893,2 \right)}{17940,1} \right)} = 0,2886 \text{ s.} \quad (50)$$

Seuraavaksi määritetään ekvivalenttigeneraattorille tasavirran aikavakio T_{dc*} . Tasavirran aikavakion määrittämiseksi määritetään aluksi ekvivalenttigeneraattorin oikosulkuvirran tasavirtakomponentti $I_{dc*}(t)$. Jokaiselle generaattorille on laskettava erikseen oikosulkuvirran tasavirtakomponentti $I_{dcG}(t)$ puolen jakson ajalle $t = 0.0083$ s. Generaattoreille on aikaisemmin sivulla 63 laskettu oikosulkuvirran tasavirtakomponentit puolen jakson kohdalle yhtälön 26 mukaisesti. Generaattoreiden oikosulkuvirtojen tasavirtakomponenttien arvot ovat $I_{dcG1}(t = 0,0083) = 20770,7 \text{ A}$, $I_{dcG2}(t =$

0,0083) = 20389,5 A ja $I_{dcG3}(t = 0,0083) = 12375,7$ A. Seuraavaksi lasketaan suurten moottoreiden oikosulkuvirtojen tasavirtakomponentit $I_{dcM1}(t)$ puolen jakson ajalle $t = 0,0083$ s yhtälön 51 mukaisesti:

$$I_{dcM1}(t = 0,0083) = \sqrt{2} \cdot (I_{M1}'' + I_{rM1} \cdot \sin \phi) \cdot e^{\frac{-t}{T_{dcM}}} = \sqrt{2} \cdot (4598,75 + 735,8 \cdot \sin 0,6435) \cdot e^{\frac{-0,0083}{0,01173}} = 3512,9 \text{ A}, \quad (51)$$

vastaavasti saadaan pienille moottoreille $I_{dcM2}(t = 0,0083) = 11407,8$ A.

Tämän jälkeen voidaan määrittää ekvivalenttigeneraattorin oikosulkuvirran tasavirtakomponentin $I_{dc*}(t)$ arvo ajalla $t = 0,0083$ alla esitetyn yhtälön 52 mukaisesti:

$$I_{dc*}(t) = I_{dcG1}(t) + I_{dcG2}(t) + I_{dcG3}(t) + I_{dcM1}(t) + I_{dcM2}(t) = 68498 \text{ A}. \quad (52)$$

Tämän jälkeen voidaan laskea ekvivalenttigeneraattorille tasavirran aikavakio T_{dc*} alla esitetyn yhtälön mukaisesti:

$$T_{dc*} = \frac{-t}{\ln\left(\frac{I_{dc*}}{\sqrt{2} \cdot I_{k*}}\right)} = \frac{-0,0083}{\ln\left(\frac{68498}{\sqrt{2} \cdot 70645,55}\right)} = 0,022 \text{ s}. \quad (53)$$

Vaihe 4.3

Tässä vaiheessa määritetään ekvivalenttigeneraattorille impedanssit puolen jakson ajalle $t = 0,0083$ s. Ekvivalenttigeneraattorin alkutilan impedanssi Z_*'' , muutostilan impedanssi Z_*' ja jatkuvan tilan impedanssi Z_* määritetään alla esitettyjen yhtälöiden 54, 55 ja 56 mukaisesti:

$$Z_*'' = \frac{U_{N*}}{\sqrt{3} \cdot I_{k*}} = \frac{450}{\sqrt{3} \cdot 70645,55} = 0,0037 \Omega, \quad (54)$$

$$Z_*' = \frac{U_{N*}}{\sqrt{3} \cdot I_{k*}} = \frac{450}{\sqrt{3} \cdot 39833,3} = 0,0065 \Omega \text{ ja} \quad (55)$$

$$Z_* = \frac{U_{N*}}{\sqrt{3} \cdot I_{K*}} = \frac{450}{\sqrt{3} \cdot 21893,2} = 0,0119 \, \Omega. \quad (56)$$

Jotta voidaan laskea vastaavat arvot resistanssille ja reaktanssille, pitää määrittää vakion c_3 arvo. Vakio c_3 määritetään alla esitetyn yhtälön 57 mukaisesti:

$$c_3 = \frac{1}{(2 \cdot \pi \cdot f \cdot T_{dc*})} = \frac{1}{(2 \cdot \pi \cdot 60 \cdot 0,022)} = 0,12 \quad (57)$$

Tämän jälkeen voidaan laskea ekvivalenttillegeneraattorille alkutilan reaktanssin X_*'' , resistanssin R_* , muutostilan reaktanssin X_*' ja jatkuvan tilan reaktanssin X_* arvot alla esitettyjen yhtälöiden mukaisesti:

$$X_*'' = \frac{Z_*''}{\sqrt{(1+c_3^2)}} = \frac{0,0037}{\sqrt{(1+0,12^2)}} = 0,0036 \, \Omega, \quad (58)$$

$$R_* = c_3 \cdot X_*'' = 0,12 \cdot 0,0036 = 0,00043 \, \Omega, \quad (59)$$

$$X_*' = \sqrt{(Z_*'^2 - R_*^2)} = \sqrt{(0,0065^2 - 0,00043^2)} = 0,0065 \, \Omega \text{ ja} \quad (60)$$

$$X_* = \sqrt{(Z_*^2 - R_*^2)} = \sqrt{(0,0119^2 - 0,00043^2)} = 0,012 \, \Omega. \quad (61)$$

Vaihe 5

Kuvasta 20 (sivu 56) nähdään, että päätaululla on neljä alakeskusta, jotka ovat suoraan ilman muuntajia kiinni päätaulussa. Hätäkeskus ESB1, moottorikeskukset MCC1 ja MCC2 sekä jakokeskus PB1 ovat kuvassa 20 näkyviä alakeskuksia. Taulukossa 7 on esitetty alakeskuksien nimellisarvot. Alla olevassa taulukoissa 8 ja 9 on esitetty tarvittavat lähtöarvot kaapeleille ja ekvivalenttigeneraattorille, joiden avulla oikosulkuvirran laskenta alakeskuksille tapahtuu. Kaapeleiden impedanssien laskenta voidaan jättää välistä, koska ne on annettu lähtötiedoissa. Muuten kaapeleiden impedanssilaskennalle pätee vaiheessa 1.2 esitetty yhtälö.

Taulukko 7. Alakeskuksien nimellisarvot. (Terasaki Electric CO. LTD)

	ESB1	MCC1	MCC2	PDB
Nimellisjännite U_N (V)	450	450	450	450
Nimellisvirta I_N (A)	630	800	800	400

Taulukko 8. Päätaulusta alakeskuksiin lähtevien kaapeleiden lähtöarvot.(Terasaki Electric CO. LTD)

	ESB1	MCC1	MCC2	PDB
Kaapelin koko (mm ²)	95	95	95	95
Kaapelin pituus (m)	110	10	15	70
Kaapeleiden määrä	3	5	5	2
Kaapelin resistanssi R (Ω)	0,00715	0,00039	0,00059	0,00683
Kaapelin reaktanssi X (Ω)	0,00331	0,00018	0,00027	0,00316

Taulukko 9. Ekvivalenttigeneraattorin alkuarvot. (Terasaki Electric CO. LTD)

Nimellisjännite U (V)	450
Taajuus f (Hz)	60
Alkutilan impedanssi Z''_* (Ω)	0,0037
Muutostilan impedanssi Z'_* (Ω)	0,00065
Jatkuvan tilan impedanssi Z_* (Ω)	0,0119
Alkutilan reaktanssi X''_* (Ω)	0,0036
Muutostilan reaktanssi X'_* (Ω)	0,0065
Jatkuvan tilan reaktanssi X_* (Ω)	0,012
Resistanssi R_* (Ω)	0,00043
Alkutilan aikavakio T''_{d*} (s)	0,0135
Muutostilan aikavakio T'_{d*} (s)	0,2886
Tasavirran aikavakio T_{dc*}	0,022
Tehokerroin $\cos \phi$	0,8
$\sin \phi$	0,6

Vaihe 5.1

Tämän jälkeen lasketaan ekvivalenttigeneraattorille ja kaapeleille yhteiset vakioarvot jokaiselle alakeskukselle erikseen käyttäen taulukkojen 8 ja 9 lähtöarvoja. Alkutilan impedanssi Z''_{e*} , muutostilan impedanssi Z'_{e*} , alkutilan aikavakio T''_{e*} , muutostilan aikavakio T'_{e*} ja tasavirran aikavakio T_{dce*} ovat ekvivalenttigeneraattorin ja kaapeleiden yhteisiä vakioarvoja. Vakioarvot lasketaan vuorotellen jokaiselle alakeskukselle aloittaen hätätaulusta ESB1 alla esitettyjen yhtälöiden mukaisesti seuraavasti: Alkutilan impedanssi

$$Z''_{e*ESB1} = \sqrt{(R_* + R_{ESB1})^2 + (X''_* + X_{ESB1})^2} = 0,01026 \, \Omega, \quad (62)$$

vastaavasti muiden alakeskusten alkutilojen impedanssit: $Z''_{e*MCC1} = 0,00387 \, \Omega$, $Z''_{e*MCC2} = 0,00400 \, \Omega$ ja $Z''_{e*PDB} = 0,00992 \, \Omega$. Muutostilan impedanssi saadaan yhtälöstä

$$Z'_{e*ESB1} = \sqrt{(R_* + R_{ESB1})^2 + (X'_* + X_{ESB1})^2} = 0,01240 \, \Omega. \quad (63)$$

Vastaavasti muiden alakeskusten muutostilojen impedanssit: $Z'_{e*MCC1} = 0,00673 \, \Omega$, $Z'_{e*MCC2} = 0,00685 \, \Omega$ ja $Z'_{e*PDB} = 0,01208$. Alkutilan aikavakio saadaan yhtälöstä

$$T''_{e*ESB1} = \frac{\{(R_* + R_{ESB1})^2 + (X''_* + X_{ESB1})^2\} \cdot X'_* \cdot T''_{d*}}{\{(R_* + R_{ESB1})^2 + (X''_* + X_{ESB1}) \cdot (X'_* + X_{ESB1})\} \cdot X'_*} = 0,0205 \, \text{s}. \quad (64)$$

Vastaavasti muiden alakeskusten alkutilojen aikavakiot: $T''_{e*MCC1} = 0,0141 \, \text{s}$, $T''_{e*MCC2} = 0,0143 \, \text{s}$ ja $T''_{e*PDB} = 0,0203 \, \text{s}$. Muutostilan aikavakio saadaan yhtälöstä

$$T'_{e*ESB1} = \frac{\{(R_* + R_{ESB1})^2 + (X'_* + X_{ESB1})^2\} \cdot X'_* \cdot T'_{d*}}{\{(R_* + R_{ESB1})^2 + (X'_* + X_{ESB1}) \cdot (X'_* + X_{ESB1})\} \cdot X'_*} = 0,3944 \, \text{s}. \quad (65)$$

Vastaavasti muiden alakeskusten muutostilojen aikavakiot: $T'_{e*MCC1} = 0,2942 \, \text{s}$, $T'_{e*MCC2} = 0,2969 \, \text{s}$ ja $T'_{e*PDB} = 0,3906 \, \text{s}$. Tasavirran aikavakio saadaan yhtälöstä

$$T_{dce*ESB1} = \frac{T_{dc*} + \left(\frac{X_{ESB1}}{2\pi f R_*}\right)}{1 + \left(\frac{R_{ESB1}}{R_*}\right)} = 0,0024 \, \text{s}. \quad (66)$$

Vastaavasti muiden alakeskusten tasavirtojen aikavakiot: $T_{dce*MCC1} = 0,0121 \, \text{s}$, $T_{dce*MCC2} = 0,0099 \, \text{s}$ ja $T_{dce*PDB} = 0,0025 \, \text{s}$.

Vaihe 5.2

Tässä vaiheessa määritetään jokaiselle alakeskukselle alkutilan jännite E'' ja muutostilan jännite E' aloittaen hätätaulusta ESB1: Hätätaulun alkujännite

$$E''_{ESB1} = \sqrt{\left\{\left(\frac{U_{NESB1}}{\sqrt{3}} \cdot \cos \phi + (R_* + R_{ESB1}) \cdot I_{NESB1}\right)^2 + \left(\frac{U_{NESB}}{\sqrt{3}} \cdot \sin \phi + (X''_* + X_{ESB1}) \cdot I_{NESB}\right)^2\right\}} = 266,24 \text{ V}, \quad (67)$$

vastaavasti muiden alakeskuksien alkutilojen jännitteet: $E''_{MCC1} = 262,15 \text{ V}$, $E''_{MCC2} = 262,33 \text{ V}$ ja $E''_{PDB} = 263,75 \text{ V}$. Hätätaulun muutostilan jännite

$$E'_{ESB1} = \sqrt{\left\{\left(\frac{U_{NESB1}}{\sqrt{3}} \cdot \cos \phi + (R_* + R_{ESB1}) \cdot I_{NESB1}\right)^2 + \left(\frac{U_{NESB}}{\sqrt{3}} \cdot \sin \phi + (X'_* + X_{ESB1}) \cdot I_{NESB}\right)^2\right\}} = 267,34 \text{ V}, \quad (68)$$

vastaavasti muiden alakeskuksien muutostilojen jännitteet: $E'_{MCC1} = 263,57 \text{ V}$, $E'_{MCC2} = 263,74 \text{ V}$ ja $E'_{PDB} = 262,62 \text{ V}$.

Vaihe 5.3

Tämän jälkeen voidaan laskea alakeskuksille oikosulkuvirrat sivulla 63 esitettyjen yhtälöiden 23-27 mukaan. Määritetään alakeskuksille ekvivalenttigeneraattorin tuottamat alkutilan oikosulkuvirrat I''_{k*} , muutostilan oikosulkuvirrat I'_{k*} , oikosulkuvirtojen vaihtovirtakomponentit I_{ac*} , oikosulkuvirtojen tasavirtakomponentit I_{dc*} ja sysäysoikosulkuvirrat i_{p*} . Hätätaulun alkutilan oikosulkuvirta

$$I''_{k*ESB1} = \frac{E''_{ESB1}}{Z''_{e*ESB1}} = \frac{266,24}{0,01026} = 25949,3 \text{ A},$$

vastaavasti muiden alakeskuksien alkutilan oikosulkuvirrat: $I''_{k*MCC1} = 67739,0 \text{ A}$, $I''_{k*MCC2} = 65582,5 \text{ A}$ ja $I''_{k*PDB} = 26587,7 \text{ A}$. Hätätaulun muutostilan oikosulkuvirta

$$I'_{k*ESB1} = \frac{E'_{ESB1}}{Z'_{e*ESB1}} = \frac{267,34}{0,01240} = 21559,7 \text{ A},$$

vastaavasti muiden alakeskuksien muutostilan oikosulkuvirrat: $I'_{k*MCC1} = 39163,4 \text{ A}$, $I'_{k*MCC2} = 38502,2 \text{ A}$ ja $I'_{k*PDB} = 21740,1 \text{ V}$. Laskettaessa ekvivalenttigeneraattorin oikosulkuvirran vaihtovirtakomponenttia $I_{ac*}(t)$ voimme todeta, että ekvivalenttigeneraattorin jatkuvan oikosulkuvirran I_{k*} arvolla on lopputulokseen häviävän pieni vaikutus. Riippumatta oikosulkuvirran I_{k*} arvosta yhtälön $I_{ac*}(t)$ eksponenttifunktio kerroin $e^{\frac{-t}{T}}$ on noin 1. Tällöin ekvivalenttigeneraattorin jatkuvan oikosulkuvirran I_{k*} arvolla ei ole suurta merkitystä laskettaessa oikosulkuvirran vaihtovirtakomponenttia $I_{ac*}(t)$, koska alakeskukset ovat kuitenkin tietyn matkan päästä päätaulusta ja näin jatkuvan tilan oikosulkuvirran vaikutus pienenee. Tämä sama pätee, kun lasketaan oikosulkuvirran vaihtovirtakomponentteja muuntajan toisiopuolelle. Laskettaessa oikosulkuvirran vaihtovirtakomponentteja alakeskuksille voimme olettaa jatkuvan oikosulkuvirran arvoksi $I_{k*} = 0 \text{ A}$ jokaisen alakeskuksen kohdalla. Näin ollen hätätaululle kohdistuva oikosulkuvirran vaihtovirtakomponentti on

$$I_{ac*ESB1}(t = 0,0083) = (I''_{k*ESB1} - I'_{k*ESB1}) \cdot e^{\frac{-t}{T_{e*ESB1}}} + (I'_{k*ESB1} - I_{k*ESB1}) \cdot e^{\frac{-t}{T_{e*ESB1}}} + I_{k*ESB1} = 24038,84 \text{ A},$$

vastaavasti muiden alakeskuksien oikosulkuvirtojen vaihtovirtakomponentit: $I_{ac*MCC1}(t) = 53935,55 \text{ A}$, $I_{ac*MCC2}(t) = 52596,61 \text{ A}$ ja $I_{ac*PDB}(t) = 24503,77 \text{ A}$. Hätätaulun oikosulkuvirran tasavirtakomponentti

$$I_{dc*ESB1}(t = 0,0083) = \sqrt{2} \cdot (I''_{k*ESB1} - I_{NESB1} \cdot \sin \phi) \cdot e^{\frac{-t}{T_{dc*ESB1}}} = 1138,50 \text{ A},$$

vastaavasti muiden alakeskuksien oikosulkuvirtojen tasavirtakomponentit: $I_{dc*MCC1}(t) = 47902,80 \text{ A}$, $I_{dc*MCC2}(t) = 39811,38 \text{ A}$ ja $I_{dc*PDB}(t) = 1347,100 \text{ A}$. Hätätaulun sysäysoikosulkuvirta

$$i_{p*ESB1}(t) = \sqrt{2} \cdot I_{ac*ESB1}(t) + I_{dc*ESB1}(t) = 35134,55 \text{ A},$$

vastaavasti muiden alakeskuksetien sysäysoikosulkuvirrat: $i_{p*MCC1}(t) = 124179,19 \text{ A}$,
 $i_{p*MCC2}(t) = 114194,22 \text{ A}$ ja $i_{p*PDB}(t) = 36000,66 \text{ A}$.

Vaihe 6

Käytännössä lasketaan oikosulkuvirrat muuntajan toisiopuolella sijaitseville taulun kiskoille. Muuntaja T1 sijaitsee päätaulun ja MSB2 taulun välissä, muuntaja T2 sijaitsee päätaulun ja MSB3 taulun välissä ja muuntaja T3 sijaitsee hätätaulun ESB1 ja hätätaulun ESB2 välissä. Taulukossa 10 on esitetty muuntajan alkuarvot. Taulukossa 11 on esitetty muuntajan kaapelitiedot ja taulukossa 12 on esitetty muuntajan kaapeleiden impedanssitiedot.

Taulukko 10. Muuntajan alkuarvot. (Terasaki Electric CO. LTD)

Muuntaja	T1	T2	T3
Nimellisteho S_T (kVA)	160	400	125
Ensiön nimellisjännite U_{rp} (V)	450	450	450
Toision nimellisjännite U_{rs} (V)	230	230	230
Muuntajan resistanssi R_T (p.u)	1,75	1,30	1,84
Muuntajan reaktanssi X_t (p.u)	3,03	3,78	2,97
Ensiön nimellisvirta I_{Np} (A)	205	513	160
Toision nimellisvirta I_{Ns} (A)	401,6	1004,1	313,8
Tehollisarvo $\cos \phi$	0,8	0,8	0,8
$\sin \phi$	0,643	0,643	0,643

Taulukko 11. Muuntajan kaapelitiedot. (Terasaki Electric CO. LTD)

Muuntaja	T1	T2	T3
Ensiön kaapelin koko (mm ²)	50	95	95
Ensiön kaapelin pituus (m)	18	110	15
Ensiön kaapeleiden määrä	2	3	1
Toision kaapelin koko (mm ²)	50	95	95
Toision kaapelin pituus (m)	15	20	10
Toision kaapeleiden määrä	4	6	2

Taulukko 12. Kaapeleiden impedanssi. (Terasaki Electric CO. LTD)

Muuntaja	T1	T2	T3
Ensiökaapelin resistanssi R_{cp} (Ω)	0,00352	0,00715	0,00293
Ensiökaapelin reaktanssi X_{cp} (Ω)	0,00084	0,00331	0,00136
Toisiökaapelin resistanssi R_{cs} (Ω)	0,00561	0,00249	0,00373
Toisiökaapelin reaktanssi X_{cs} (Ω)	0,00134	0,00115	0,00173
Ylemmän piirin resistanssi R_o	-	-	0,00715
Ylemmän piirin reaktanssi X_o	-	-	0,00331

Vaihe 6.1

Laskettaessa oikosulkuvirtoja muuntajien tosiopuolelle on muutettava muuntajien sisäiset resistanssit ja reaktanssit suhteellisuusarvoista ohmeiksi sivulla 59 esitetyn yhtälön 15 mukaan. Muuntajan T1 resistanssi

$$R_{T1} = \frac{U_{rpT1}^2 \cdot R_{T1}(\%) }{100 \cdot S_{T1}} = \frac{450^2 \cdot 1,75}{100 \cdot 160 \cdot 1000} = 0,02215 \, \Omega,$$

vastaavasti muuntajien T2 ja T3 resistanssit: $R_{T2} = 0,00658 \, \Omega$ ja $R_{T3} = 0,02981 \, \Omega$. Muuntajan T1 reaktanssi

$$X_{T1} = \frac{U_{rpT1}^2 \cdot X_{T1}(\%) }{100 \cdot S_{T1}} = \frac{450^2 \cdot 3,03}{100 \cdot 160 \cdot 1000} = 0,03835 \, \Omega,$$

vastaavasti muuntajien T2 ja T3 reaktanssit: $X_{T2} = 0,01914 \, \Omega$ ja $X_{T3} = 0,04811 \, \Omega$.

Jotta jokaisen muuntajan kokonaisresistanssit ja -reaktanssit saadaan laskettua, summataan muuntajan sisäiseen resistanssiin sekä ensiö- ja toisiökaapeleiden että ylemmän piirin resistanssit. Nyt lasketaan muuntajan T1 kokonaisresistanssi

summaamalla sisäinen resistanssi, ensiökaapelin ja toisiokaapelin sekä ylemmän piirin resistanssit yhteen alla esitetyn yhtälön 69 mukaisesti:

$$R_{tot1} = R_{T1} + R_{cp1} + R_{cs1} + R_{o1} = 0,02215 + 0,00352 + 0,00561 + 0 = 0,03128 \Omega. \quad (69)$$

Vastaavasti muuntajien T2 ja T3 kokonaisresistanssit: $R_{tot2} = 0,01622 \Omega$ ja $R_{tot3} = 0,04362 \Omega$. Samalla periaatteella voimme laskea muuntajien kokonaisreaktanssit. Muuntajan T1 kokonaisreaktanssi lasketaan alla esitetyn yhtälön 70 mukaisesti:

$$X_{tot1} = X_{T1} + X_{cp1} + X_{cs1} + X_{o1} = 0,03835 + 0,00084 + 0,00134 + 0 = 0,04053 \Omega. \quad (70)$$

Vastaavasti muuntajien T2 ja T3 kokonaisreaktanssit: $X_{tot2} = 0,02360 \Omega$ ja $X_{tot3} = 0,05451 \Omega$.

Tässä vaiheessa muuntajien toisiopuolen oikosulkuvirtoja laskettaessa on ekvivalenttigeneraattorin ja muuntajien kaapeleille laskettava yhteiset vakioarvot - jokaiselle muuntajalle erikseen. Alkutilan impedanssi Z''_{e*T} , muutostilan impedanssi Z'_{e*T} , alkutilan aikavakio T''_{e*T} , muutostilan aikavakio T'_{e*T} ja tasavirran aikavakio T_{dce*T} ovat ekvivalenttigeneraattorin ja muuntajien kaapeleiden yhteisiä vakioarvoja. Vakioarvot lasketaan alla esitettyjen yhtälöiden mukaisesti: Alkutilan impedanssi muuntajan T1 kohdalla

$$Z''_{e*T1} = \sqrt{(R_* + R_{tot1})^2 + (X''_* + X_{tot1})^2} = 0,05434 \Omega. \quad (71)$$

Vastaavasti muuntajien T2 ja T3 kohdalla alkutilan impedanssit: $Z''_{e*T2} = 0,03189 \Omega$ ja $Z''_{e*T3} = 0,07292 \Omega$. Muutostilan impedanssi muuntajan T1 kohdalla

$$Z'_{e*T1} = \sqrt{(R_* + R_{tot1})^2 + (X'_* + X_{tot1})^2} = 0,05672 \Omega. \quad (72)$$

Vastaavasti muuntajien T2 ja T3 kohdalla muutostilan impedanssit: $Z'_{e*T2} = 0,03440 \Omega$ ja $Z'_{e*T3} = 0,07525 \Omega$. Alkutilan aikavakio muuntajan T1 kohdalla

$$T''_{e*T1} = \frac{\{(R_* + R_{tot1})^2 + (X''_* + X_{tot1})^2\} \cdot X'_* \cdot T''_{d*}}{\{(R_* + R_{tot1})^2 + (X''_* + X_{tot1}) \cdot (X'_* + X_{tot1})\} \cdot X''_*} = 0,02336 \text{ s.} \quad (73)$$

Vastaavasti muuntajien T2 ja T3 kohdalla alkutilan aikavakiot: $T''_{e*T2} = 0,02262 \text{ s}$ ja $T''_{e*T3} = 0,02362 \text{ s}$. Muutostilan aikavakio muuntajan T1 kohdalla

$$T'_{e*T1} = \frac{\{(R_* + R_{tot1})^2 + (X'_* + X_{tot1})^2\} \cdot X''_* \cdot T'_{d*}}{\{(R_* + R_{tot1})^2 + (X'_* + X_{tot1}) \cdot (X''_* + X_{tot1})\} \cdot X'_*} = 0,49315 \text{ s.} \quad (74)$$

Vastaavasti muuntajien T2 ja T3 kohdalla muutostilan aikavakiot: $T'_{e*T2} = 0,46740 \text{ s}$ ja $T'_{e*T3} = 0,50299 \text{ s}$. Jatkuvan tilan aikavakio muuntajan T1 kohdalla

$$T_{dce*T1} = \frac{T_{dc*} + \left(\frac{X_{tot1}}{2\pi f R_*}\right)}{1 + \left(\frac{R_{tot1}}{R_*}\right)} = 0,0037 \text{ s.} \quad (75)$$

Vastaavasti muuntajien T2 ja T3 kohdalla jatkuvan tilan aikavakiot: $T_{dce*T2} = 0,0043 \text{ s}$ ja $T_{dce*T3} = 0,0035 \text{ s}$.

Vaihe 6.2

Yllä olevien vakioarvojen avulla voidaan määrittää muuntajille alkutilan jännite E''_T ja muutostilan jännitte E'_T . Muuntajan T1 alkutilan jännite

$$E''_{T1} = \sqrt{\left\{\left(\frac{U_{rpT1}}{\sqrt{3}} \cdot \cos \phi + (R_* + R_{T1}) \cdot I_{npT1}\right)^2 + \left(\frac{U_{rpT1}}{\sqrt{3}} \cdot \sin \phi + (X''_* + X_{tot1}) \cdot I_{npT1}\right)^2\right\}} = 270,5 \text{ V.} \quad (76)$$

Vastaavasti muuntajille T2 ja T3 alkutilan jännitteet: $E''_{T2} = 275,1 \text{ V}$ ja $E''_{T3} = 271,0 \text{ V}$. Muuntajan T1 muutostilan jännite

$$E'_{T1} = \sqrt{\left\{\left(\frac{U_{rpT1}}{\sqrt{3}} \cdot \cos \phi + (R_* + R_{T1}) \cdot I_{npT1}\right)^2 + \left(\frac{U_{rpT1}}{\sqrt{3}} \cdot \sin \phi + (X'_* + X_{tot1}) \cdot I_{npT1}\right)^2\right\}} = 270,8 \text{ V.} \quad (77)$$

Vastaavasti muuntajille T2 ja T3 muutostilan jännitteet: $E'_{T2} = 276,0 \text{ V}$ ja $E'_{T3} = 271,3 \text{ V}$.

Vaihe 6.3

Tässä vaiheessa lasketaan ensin oikosulkuvirrat muuntajien ensiöpuolelle, jonka jälkeen voidaan laskea oikosulkuvirrat muuntosuhteella muuntajan toisiopuolelle. Yllä olevien vakioarvojen ja jännitearvojen avulla voidaan laskea oikosuluvirrat ensiöpuolelle alla esitettyjen yhtälöiden 78, 79, 80, 81 ja 82 mukaisesti. Muuntajan T1 alkutilan oikosulkuvirta

$$I''_{kT1} = \frac{E''_{T1}}{Z''_{e*T1}} = 4977,9 \text{ A.} \quad (78)$$

Vastaavasti muuntajien T2 ja T3 alkutilan oikosulkuvirrat: $I''_{kT2} = 8626,52 \text{ A}$ ja $I''_{kT3} = 3716,4 \text{ A}$. Muuntajan T1 muutostilan oikosulkuvirta

$$I'_{kT1} = \frac{E'_{T1}}{Z'_{e*T1}} = 4774,33 \text{ A.} \quad (79)$$

Vastaavasti muuntajien T2 ja T3 muutostilan oikosulkuvirrat: $I'_{kT2} = 8023,3 \text{ A}$ ja $I'_{kT3} = 3605,3 \text{ A}$. Oikosulkuvirtojen vaihtovirtakomponenttien laskennassa (kts. sivu 79) oletetaan, että jokaisen muuntajan jatkuvan tilan oikosulkuvirta $I_{kT} = 0 \text{ A}$. Muuntajan T1 ensiöpuolen oikosulkuvirran vaihtovirtakomponentti

$$I_{acT1}(t = 0,0083) = (I''_{kT1} - I'_{kT1}) \cdot e^{\frac{-t}{T''_{e*T1}}} + (I'_{kT1} - I_{kT1}) \cdot e^{\frac{-t}{T'_{e*T1}}} + I_{kT1} = 4837,34 \text{ A.} \quad (80)$$

Vastaavasti muuntajien T2 ja T3 ensiön vaihtovirtakomponentit: $I_{acT2}(t) = 8300,12 \text{ A}$ ja $I_{acT3}(t) = 3624,47 \text{ A}$. Muuntajan T1 ensiöpuolen oikosulkuvirran tasavirtakomponentti

$$I_{dcT1}(t = 0,0083) = \sqrt{2} \cdot (I_{kT1}'' - I_{Np} \sin \phi) \cdot e^{\frac{-t}{T_{dcT1}}} = 728,54 \text{ A.} \quad (81)$$

Vastaavasti muuntajien T2 ja T3 tasavirtakomponentit: $I_{dcT2}(t) = 1707,191 \text{ A}$ ja $I_{dcT3}(t) = 477,94 \text{ A}$. Muuntajan T1 ensiöpuolen sysäysoskuvirta

$$i_{pT1}(t = 0,0083) = \sqrt{2} \cdot I_{acT1}(t = 0,0083) + I_{dcT1}(t = 0,0083) = 7569,57 \text{ A.} \quad (82)$$

Vastaavasti muuntajien T2 ja T3 sysäysoskuvirrat: $i_{pT2}(t) = 13445,200 \text{ A}$ ja $i_{pT3}(t) = 5603,71 \text{ A}$.

Muuntajien muuntosuhteella määritetään muuntajan toisiopuolelle oikosulkuvirtojen vaihtovirtakomponentit ja sysäysoskuvirrat. Muuntajan muuntosuhde lasketaan muuntajan ensiö- ja toisiojännitteiden suhteiden avulla seuraavasti: $\mu = \frac{U_1}{U_2} = \frac{450}{230} = 1,9565$. Muuntajien toisiopuolen oikosulkuvirtojen vaihtovirtakomponentit ja sysäysoskuvirrat lasketaan alla esitetyn yhtälöiden 84 ja 85 mukaisesti. Muuntajan T1 toisiopuolen oikosulkuvirran vaihtovirtakomponentti

$$I_{ac2T1}(t = 0,0083) = I_{acT1}(t) \cdot 1,9565 = 4837,34 \cdot 1,9565 = 9464,26 \text{ A.} \quad (83)$$

Vastaavasti muuntajien T2 ja T3 toisio vaihtovirtakomponentit: $I_{ac2T2}(t) = 16239,18 \text{ A}$ ja $I_{ac2T3}(t) = 7091,275 \text{ A}$. Muuntajan T1 toisiopuolen sysäysoskuvirta

$$i_{p2T1}(t = 0,0083) = i_{pT1}(t) \cdot 1,9565 = 7569,57 \cdot 1,9565 = 14809,86 \text{ A.} \quad (84)$$

Vastaavasti muuntajien T2 ja T3 toisio sysäysoskuvirrat: $i_{p2T2}(t) = 26305,53 \text{ A}$ ja $i_{p2T3}(t) = 10963,66 \text{ A}$. Taulukossa 13 on esitetty laskelman kaikki oikosulkuarvot.

Taulukko 13. Esimerkkilaskelman oikosulkuarvot.

Oikosulkuarvot	
I_{acG1}	16 568 A
I_{acG2}	16 520 A
I_{acG3}	10 592,2 A
I_{dcG1}	20 770,7 A
I_{dcG2}	20 389,5 A
I_{dcG3}	12 375,7 A
i_{pG1}	44 218,36 A
i_{pG2}	43 778,0 A
i_{pG3}	27 355,33 A
I_{acM1}	2943,2 A
I_{acM2}	9 352,64 A
i_{pM1}	7 358 A
i_{pM2}	14 613,5 A
$I_{acbusbar}$	56 006,2 A
$i_{pbusbar}$	14 6091 A
I_{acP1}	39 426,2 A
I_{acP2}	39 468 A
I_{acP3}	45 414 A
i_{pP1}	101 872,64 A
i_{pP2}	102 313 A
i_{pP3}	118 735,67 A
I''_{k*ESB1}	25 949,3 A

I''_{k*MCC1}	67 739,0 A
I''_{k*MCC2}	65 582,5 A
I''_{k*PDB}	26 587,7 A
I'_{k*ESB1}	21 559,7 A
I'_{k*MCC1}	39 163,4 A
I'_{k*PDB}	21 740,1 A
$I_{ac*ESB1}$	24 038,84 A
$I_{ac*MCC1}$	53 935,55 A
$I_{ac*MCC2}$	52 596,61 A
I_{ac*PDB}	24 503,77 A
$I_{dc*ESB1}$	1138,50 A
$I_{dc*MCC1}$	47 902,80 A
$I_{dc*MCC2}$	39 811,38 A
I_{dc*PDB}	1347,100 A
i_{p*ESB1}	35 134,55 A
i_{p*MCC1}	124 179,19 A
i_{p*MCC2}	114 194,22 A
i_{p*PDB}	36 000,66 A
I''_{kT1}	4 977,9 A
I''_{kT2}	8 626,52 A
I''_{kT3}	3 605,3 A
I'_{kT1}	4 774,33 A
I'_{kT2}	8023,3 A
I'_{kT3}	3 605,3

I_{acT1}	4 837,34 A
I_{acT2}	8 300,12 A
I_{acT3}	3624,47 A
I_{dcT1}	728,54 A
I_{dcT2}	1707,191 A
I_{dcT3}	477,94 A
i_{pT1}	7569,57 A
i_{pT2}	13 445,200 A
i_{pT3}	5 603,71 A
I_{ac2T1}	9464,26 A
I_{ac2T2}	16 239,18 A
I_{ac2T3}	7 091,275 A
i_{p2T1}	14 809,86 A
i_{p2T2}	26 305,53 A
i_{p2T3}	10 963,66 A

6 EXCEL-POHJAINEN KENTATYÖKALU

OIKOSULKUVIRRRAN

LAS-

Diplomityön yhtenä päätavoitteena oli luoda tilaajalle Excel-pohjainen oikosulkuvirran laskentatyökalu. Laskentatyökalun avulla on tarkoitus laskea alustavat oikosulkuvirrat laivan sähköverkon päätauluille, muuntajan ensiö- ja toisiopuolille sekä alakeskuksille. Laadittu laskentaohjelma on yksinkertainen, mutta sitä voidaan jatkossa kehittää monimutkaisempien alusten oikosulkuvirtojen laskentaan. Laskentaohjelmaan syötetään tarvittavat generaattoreiden, moottoreiden, muuntajien, kaapeleiden, alakeskuksien, ekvivalenttigeneraattorin ja kaapeleiden impedanssiarvot. Ohjelma perustuu luvussa 5 esitettyihin kaavoihin ja yhtälöihin.

Laskentaohjelma koostuu yhdeksästä eri välilehdestä, missä eri vaiheet on sijoitettu omalle välilehdelle. Kuten kuvasta 21 nähdään, ensimmäiseen välilehteen syötetään **Syötöt** -sanan alapuolelle generaattoreiden, moottoreiden, alakeskuksien, muuntajien, kaapeleiden ja kaapeleiden impedanssien arvot. Kun lähtöarvot on syötetty, samalle välilehdelle ilmestyy **Tulokset** -sanan alapuolelle oikosulkuvirta-arvot. Ensimmäisestä välilehdestä on jätetty pois oikosulkuvirtojen laskennan kaikki välivaiheet, sillä käyttäjän kannalta ne ovat tarpeettomia. Muissa välilehdeissä näkyy myös laskelmien välivaiheet, josta voi tarkistaa ovatko lasketut oikosulkuvirta tulokset oikein vai ei. Toisessa ja kolmannessa välilehdessä näkyy generaattoreiden lähtöarvot ja generaattoreiden oikosulkuvirrat päätaulun pääkiskolle. Neljännessä välilehdessä on moottorin liittyvät laskelmat ja välivaiheet. Viidennessä välilehdessä on laskettu päätaululle kohdistuvat oikosulkuvirrat. Kuudennessa välilehdessä on laskettu ekvivalenttigeneraattorille tarpeelliset laskelmat, jonka avulla voidaan seitsemännessä ja kahdeksannessa välilehdessä laskea alakeskuksille ja muuntajille oikosulkuvirta-arvot. Muuntosuhteella laskentaohjelma laskee myös muuntajien toisiopuolelle oikosulkuvirrat.

Näillä alustavilla laskelmilla ja arvoilla voidaan suunnitelun alkuvaiheessa todeta, kuinka suuria kojeistoja laivan sähköverkko tarvitsee suojatakseen verkkoa oikosulkutilanteissa.

Syötöt

Generaattoreiden tiedot:						
	Gen.1	Gen.2	Gen.3	Gen.4	Gen.5	Gen.6
S_N (kVA)	2250	2250	1188			
U_N (V)	450	450	450			
I_N (A)	2886,8	2886,8	1524,2			
R_s (%)	0,97	0,97	0,93			
X_s (%)	245,8	245,8	194			
X'_{s1} (%)	16,7	16,7	12,2			
X'_{s2} (%)	22	22	17,2			
T'_{s1} (s)	0,0093	0,0093	0,0062			
T'_{s2} (s)	0,426	0,426	0,324			
T_{s0} (s)	0,064	0,064	0,032			
I_{s0} (A)	8660,3	8660,3	4572,6			
$\cos \varphi$	0,8	0,8	0,8			
τ (Hz)	60	60	60			
$\sin \varphi$	0,6	0,6	0,6			
t (s)	0,0083	0,0083	0,0083			

Kaapeleiden impedanssit:						
	Gen.1	Gen.2	Gen.3	Gen.4	Gen.5	Gen.6
R (Ω)	0,00026	0,00036	0,00058	0,0003	0,0004	0,0006
X (Ω)	0,00015	0,00021	0,00033	0,0002	0,0002	0,0003

Moottoreiden tiedot:		
	Suuri	Pieni
U_N (V)	450	450
I_N (A)	735,8	2922,7
P_N (kVA)	574	2278
τ (Hz)	60	60
T'_{s1} (p.u.)	0,16	0,2
X'_{s1} (p.u.)	0,15	0,188
R_s (p.u.)	0,034	0,043
R_s (p.u.)	0,021	0,027
R_{s0} (p.u.)	0,055	0,07
T'_{s1} (s), 60 Hz	0,01867	0,01867
T'_{s1} (s), 30 Hz	0,0224	0,0224
T_{s0} (s), 60 Hz	0,01173	0,01173
T_{s0} (s), 30 Hz	0,01408	0,01408
t (s)	0,0083	0,0083
$\sin \varphi$	0,6	0,6
$\cos \varphi$	0,8	0,8

Erivaihtajageneraattori:

U_N	450 V
f	60 Hz
$\cos \varphi$	0,8
$\sin \varphi$	0,6

Alakeskukset

	ESB1	MCC1	MCC2	POB
U_N	450	450	450	450
I_N	630	800	800	400
f	60	60	60	60

Päästulusta alakeskuksiin lähtevät kaapelit:

	ESB1	MCC1	MCC2	POB
Koko (mm ²)	95	95	95	95
Pituus (m)	110	10	15	70
Määrä	3	5	5	2
Resistanssi (Ω)	0,00715	0,00039	0,00059	0,0068
Reaktanssi (Ω)	0,00331	0,00018	0,00027	0,0032

Tulokset

Generaattorin oikosulkuvirrat

I_{s01}	16567,96 A
I_{s02}	16520,15 A
I_{s03}	10650,53 A
I_{s04}	#DIV/0! A
I_{s05}	#DIV/0! A
I_{s06}	#DIV/0! A
I_{s01}	20771,04 A
I_{s02}	20394,07 A
I_{s03}	12892,77 A
I_{s04}	#DIV/0! A
I_{s05}	#DIV/0! A
I_{s06}	#DIV/0! A
I_{p01}	44201,68 A
I_{p02}	43757,08 A
I_{p03}	27954,9 A
I_{p04}	#DIV/0! A
I_{p05}	#DIV/0! A
I_{p06}	#DIV/0! A

Moottoreiden oikosulkuvirrat

I_{s01}	2943,2 A
I_{s02}	9352,64 A
I_{p01}	7358 A
I_{p02}	23381,6 A
I_{s03}	3512,886 A
I_{s04}	11407,38 A

Generaattoreiden ja moottoreiden oikosulkuvirtojen vaihtovirtak

$$I_{s0\text{kesk}} = \sum I_{s0i} + \sum I_{s0m} = 56034,5 \text{ A}$$

Generaattoreiden ja moottoreiden sysäys-oikosulkuvirrat päästaulu

$$I_{s0\text{kesk}} = \sum I_{p0i} + \sum I_{p0m} = 146653 \text{ A}$$

Oikosulkuvirran vaihtovirtakomponenttiarvot generaattoreiden ne

I_{s01}	39466,52 A
I_{s02}	39514,34 A
I_{s03}	45383,95 A
I_{s04}	#DIV/0! A
I_{s05}	#DIV/0! A
I_{s06}	#DIV/0! A

Sysäys-oikosulkuarvot generaattoreiden nsvoille:

I_{p01}	102451,6 A
I_{p02}	102096,2 A
I_{p03}	118698,4 A
I_{p04}	#DIV/0! A
I_{p05}	#DIV/0! A
I_{p06}	#DIV/0! A

EG:n tuottamat oikosulkuvirrat Alakeskuksille:

I_{s0}^{*ESB1}	25871,88 A
I_{s0}^{*MCC1}	66964,19 A
I_{s0}^{*MCC2}	64792,06 A
I_{s0}^{*POB}	21878,42 A

I_{s0}^{*ESB1}	21558,93 A
I_{s0}^{*MCC1}	39149,57 A
I_{s0}^{*MCC2}	38509,41 A
I_{s0}^{*POB}	21878,42 A

I_{s0}^{*ESB1}	24054,67 A
I_{s0}^{*MCC1}	53593,57 A
I_{s0}^{*MCC2}	52288,03 A
I_{s0}^{*POB}	24557,9 A

Kuva 21. Excel-oikosulkuvirtalaskelma.

7 POHDINTA JA JOHTOPÄÄTÖKSET

Laivan suunnittelussa laivan sähköverkon oikosulkulaskelma on yksi dokumenteista, jotka luokituslaitokset vaativat nähtäväksi ja hyväksyväksi. Työn tarkoituksena oli tutustua laivan sähköverkkoon ja perehtyä laivan sähköverkon oikosulkulaskentaan sekä laatia IEC 61363-1 standardiin perustuvan mahdollisimman yksinkertaisen laskentaohjelman,, jolla suunnittelu ja konsultointiyritys Deltamarin pystyy jatkossa käyttämään suunnittelun alkuvaiheessa.

Tarkoituksena on käyttää laadittua laskentaohjelmaa jatkossa konsepti- ja perussuunnittelun apuna määritettäessä nopeasti oikosulkutasoja. Deltamarinin käytössä olevat laitetoimittajien ilmaiset ohjelmat ovat turhan monimutkaisia ja vaativat yleensä enemmän tietoa kuin projektin alussa on, joten laaditulla laskentaohjelmalla voidaan laskea laivan sähköverkoille alustavat oikosulkuarvot helpommin vähemmillä lähtötiedoilla. Tarkempia laskelmia tehtäessä on käytettävä kaupallisia ohjelmia, joilla pystytään mitoittamaan koko sähköverkko sekä katkaisijat.

Laivapuolella käytetty IEC 61363-1 standardi eroaa maapuolella käytettävästä IEC 60909 standardista monella eri tavalla. IEC 61363-1 standardissa määritellään ainoastaan symmetriset kolmivaiheiset oikosulkuvirrat, kun taas IEC 60909 -standardi käsittelee myös epäsymmetriset vikatilanteet mm. kaksivaiheinen vika, maasulku ja kaksivaiheinen vika maayhteydellä. Laskennallisesti IEC 60909 käyttää oikosulkuvirran ratkaisemiseen Theveninin teoreemaan pohjautuvaa piirianalyysimenetelmää, missä tarkasteltava verkko palautetaan jäykän jännitelähteen ja yhden impedanssin sarjaan kytkennäksi. IEC 61363-1 puolestaan ottaa huomioon kaikki verkossa esiintyvät jännitelähteet erikseen ja määrittelee niille lähdejännitteet E'' , E' ja E sekä aikavakiot T_d'' , T_d' ja T_{dc} . Eri lähteistä yhdistämällä muodostetaan ekvivalenttigeneraattori, jonka tuottama oikosulkuvirta on eri lähteiden summa eri ajanhetkillä. Toisin sanoen IEC 60909 standardissa jännitelähde on aina jäykkä eikä muutu ajan mukana, kun taas IEC 61363 standardin mukaisessa verkossa jännitelähde on pyörivä kone ja sen tuottama oikosulkuvirta muuttuu ajan funktiona. IEC 60909 standardissa alkutilan arvo I_k'' ja jatkuvan tilan arvo I_k saadaan laskemalla $I_k'' = \frac{U}{Z_k}$

tai $I_k = \frac{U}{Z_k}$. IEC 61363-1 standardin tuloksissa taas oikosulkuvirta on $I_{ac}(t)$ eli virran arvo on ajan funktio. Periaattessa I_k'' ja $I_{ac}(t)$ ovat numeroarvoltaan samat, jos IEC 60909 standardin määritelmiä korjauskertoimia ei otettaisi huomioon. Syy, miksi näitä kahta eri standardia on käytetty on ollut se, että IEC 60909 on ”varovaisempi” eli antaa korkeampia oikosulkuvirtoja kuin IEC 61363-1. Tämä taas laivapuolella johtaa helposti siihen, että kojeistoja ja niiden kojeita jouduttaisiin ylimitoittamaan aika paljon. (Grönlund 2019.)

Tämä työ helpottaa ja nopeuttaa konseptisuunnittelijoita laskemaan ja arvioimaan oikosulkuvirran maksimirajoja, jonka avulla voidaan valita sopivat sähkökojeistot laivoille. Laskentaohjelman etuna on, että käyttäjä itse voi valita generaattoreiden määrän; tosin maksimi generaattorimäärä on kuusi. Jatkossa laskentaohjelmaa voidaan syventää ja parantaa vastaamaan useamman tyyppin laivojen oikosulkulaskentaa. Kaiken kaikkiaan työstä on ollut hyötyä yritykselle ja jatkossa laskentaohjelmaa käytetään varmasti, jotta oikosulkuvirtojen laskenta saadaan tarkemmaksi.

8 YHTEENVETO

Laivan sähköverkon virheetön toimivuus on tärkeä laivan toiminnalle. Laivan sähköverkko suunnitellaan siten, että se kykenee toimimaan itsenäisenä yksikkönä merellä ja satamassa. Laivoissa on oma sähköverkko, sähköntuotanto, jakelu ja sähköverkkoon kytketyt kuluttajat. Laivan omat polttomoottorit pyörittävät laivan omia generaattoreita, jotka tuottavat laivan tarvitsemaa sähköä. Moottorit voivat toimia dieselillä, nesteytetyllä maakaasulla tai akuilla. Tuotettu sähkö syötetään generaattoreilta korkea- tai matalajännitekojeistoihin, joita laivoissa kutsutaan päätauluiksi, ja siitä edelleen laivan sähkön jakeluverkkoon. Päätaulu syöttää muuntajia, joilla jännite muunnetaan sopivaksi ja se siirretään laivan kuluttajille.

Laivan toiminnallisuuden kannalta häiriötön sähkönsyöttö on elintärkeä, sillä häiriöt voivat aiheuttaa sekä suuria kustannuksia että vaaratilanteita, jos sähkönsyöttö keskeytyy. On kiinnitettävä erityistä huomiota laivan jakeluverkon suunnitteluun ja suojaukseen, jotta sähköverkko toimisi moitteettomasti ja luotettavasti. Luotettavuuden kannalta on tärkeä selviytyä turvallisesti sähköverkkoon ilmenevistä vikavirroista. Verkon toiminnallisuuden kannalta on tärkeä, että verkko on suunniteltu siten, että vikatyypeistä riippuen verkossa ilmenevät erisuuruiset virrat pystytään tunnistamaan ja rajoittamaan niiden vaikutusalue mahdollisimman pieneksi haittojen ehkäisemiseksi. Verkon komponenttien, kuten esimerkiksi polttomoottoreiden ja generaattoreiden takia, sähköverkolle on ominaista korkeat oikosulkuvirrat. Tämä johtuu verkkoa syöttävistä generaattoreista, pyörivistä sähkömoottoreista ja lyhyistä etäisyyksistä. Laivaverkon toiminnan varmistamiseksi on tärkeä tietää verkon oikosulkuvirtojen suuruus sekä verkon komponenttien oikosulkukestoisuudet. Vian sattuessa verkon eri osien pitää kestää vian synnyttämien virtojen aikaansaamat mekaaniset ja termiset vaikutukset. Selvitettyjen oikosulkuvirtojen avulla verkon oikosulkusuojaus pystytään suunnittelemaan valitsemalla eri komponenttien oikosulun kestoisuuksien mukaan.

Tämän diplomityö tarkoituksena oli tutkia laivan sähköverkkoa, luokituslaitoksien vaatimuksia ja säännöksiä, oikosulkuvirran laskentaa sekä lopuksi esittää Microsoft Excel -ohjelmalla tuotettu laskentatyökalu oikosulkuvirran laskentaan, jota suunnittelutoimisto

Deltamarin Ltd tulee käyttämään jatkossa. Aluksi tutkittiin laivan sähköverkkoa tarkemmin esittäen pääkomponentit, kojeistot ja erilaiset verkkotyypit. Sen jälkeen perehdyttiin laivan sähköverkon oikosukusuojaukseen ja oikosulkuvirtalaskentaan käyttäen IEC 61361-1 standardia (International Electrotechnical Commission). Lopuksi esitettiin luotu IEC 61363-1 -standardin mukainen Excel-pohjainen laskentatyökalu oikosulkuvirran laskentaa varten.

LÄHDELUETTELO

ABB (2000). *Teknisiä tietoa ja taulukoita*. 9.painos. Vaasa. ISBN: 951-99366-0-2

ABB (2010a). *Eristystason valvontareleet, CM-sarja* [Online]. Saatavissa:

ABB (2010b). *Electrical installation handbook. Protection, control and electrical devices. Technical guide – 6th edition 2010* [Online]. Saatavissa: <https://library.e.abb.com/public/ae2141fea4bfa9d748257a700024a579/1SDC010002D0206.pdf>

ABB (2017). *Medium voltage products. UniGear ZS1. Medium voltage, arc-proof, air insulated switchgear up to 24 kV insulated voltage* [Online]. Saatavissa: https://library.e.abb.com/public/3fcc775aa9664ccb9faaa61a9df4879/Catalogue%20UG%20ZS1_RevH_en.pdf

ABB AS (2003). *Maritime Electrical Installations And Diesel Electric Propulsion* [Online]. Saatavissa: http://www.trpa.org/wp-content/uploads/ABB-AS_2003.pdf

Borstlap, R. & H. Katen (2011). *Ships' Electrical System* [Online]. Dokmar Maritime. ISBN 978-9071500176. Saatavissa: https://kupdf.com/download/ships-electrical-system-rene-borstlap-hans-ten-katen-v1_590210d3dc0d60ec44959eb7_pdf

Brunvoll. *Diesel Mechanical propulsion* [Online]. Saatavissa: <http://scanapropulsion.com/products/>

Bureau Veritas. *Laivojen ja meriteknisten rakenteiden luokitus* [Online]. Saatavissa: http://www.bureauveritas.fi/wps/wcm/connect/bv_fi/local/services+sheet/laivojen_ja_meriteknisten_rakenteiden_luokitus

DC Maritime Technologies Inc.(2000). *Electrical system – All you wanted to know about short-circuits but where afraid to ask!* [Online]. Saatavissa: http://www.idc-online.com/technical_references/pdfs/electrical_engineering/SCC.pdf

- DNV GL.(2018). *Rules for classification. Ships – Part 4 Systems and components, Chapter 8 Electrical installations.* [Online]. Saatavissa: <https://rules.dnvgl.com/docs/pdf/dnvgl/ru-ship/2017-01/DNVGL-RU-SHIP-Pt4Ch8.pdf>
- Ericsson, P. & I. Fazlagic (2008). *Shore-side power supply. A feasibility study and a technical solution for an on-shore electrical infrastructure to supply vessels with electric power while in port.* Chalmers University of Technology. Department of Energy and Environment. Master of Science Thesis.
- Eronen, P. (2014). *Tehtaan keskijännitejakelun selektiivisyydestä tarkastelu.* Tampereen teknillinen yliopisto. Sähkötekniikan tiedekunta. Diplomityö.
- Farin, J., L. Peltonen, M. Pykälä & S. Uski-Joutsenvuo (2009). *Taajuusmuuttajien rakenne, mitoitus ja säätö generaattorikäytöissä* [Online]. VTT. Tutkimusraportti. Saatavissa: <http://www.vtt.fi/inf/julkaisut/muut/2009/TAMU-loppuraportti.pdf>
- Grönlund, Esko (2019). Tapaaminen. Sähköpostiviesti Reza Ghafarille 15.01.2019.
- Gustafsson, J., A. Heikkilä, E. Hillgren, T. Karvonen, A. Keltaniemi & A. Lappalainen (2013). *Eurooppalaisen meriteollisuuden rakennemuutoksen haasteet ja hyvät käytännöt* [Online]. Maritime Hubs. ISBN 978-952-216-438-4. Saatavissa: https://www.utu.fi/fi/yksikot/mkk/hankkeet/Documents/MaritimeHubs_loppujulkaisu.pdf
- Hyytiä, K. (2012). *Laivan sähköverkon simulointi.* Aalto-yliopisto. Sähkötekniikan korkeakoulu. Sähkötekniikan laitos. Diplomityö.
- IACS (2011). *Classification societies – what, why and how?* [Online]. International Association of Classification Societies. Information paper. Saatavissa: <http://www.iacs.org.uk/media/3785/iacs-class-what-why-how.pdf>

- IEC (1998). *Electrical installations of ships and mobile and fixed offshore units – Part 1: Procedures for calculating short-circuit currents in three-phase a.c.* [Online]. Saatavissa: https://kupdf.com/download/iec-61363-1-shortcircuit-calcs_59f9addfe2b6f5f812869600_pdf
- Jaakkola, J. (2010). *Erään keskijännitekojeiston luokituksen muuttaminen – meriluokitusvaatimukset standardeissa ja laivaluokituslaitosten ohjeissa.* Vaasan yliopisto. Teknillinen tiedekunta. Diplomityö.
- Karhunen, T. (2016). *Taajuusmuuttajan virranmittaus magneettiiriittömällä Hall-anturilla.* Aalto-yliopisto. Sähkötekniikan korkeakoulu. Sähkötekniikan ja automaation laitos. Diplomityö.
- Kiiski, T. (2012). *Taajuusmuuttajien luotettavuus, huolettavuus ja kunnossapito teollisessa ympäristössä.* Tampereen teknillinen yliopisto. Sähkötekniikan koulutusohjelma. Diplomityö.
- Koponen, A. (2007). *Taajuusmuuttajien käytön ongelmakohdat kiinteistöautomaatiossa* [Online]. Teknillinen korkeakoulu. Sähkö- ja tietoliikennetekniikan osasto. Diplomityö. Saatavissa: <http://lib.tkk.fi/Dipl/2007/urn007838.pdf>
- Korpinen, L. (1998). *Sähkövoimatekniikkaopus: Sähkökoneet, osa 1* [Online]. Saatavissa: http://www.leenakorpinen.fi/archive/svt_opus/10sahkokoneet_1osa.pdf
- Kotovuori, T. (2010). *Esityksien ja yleisötapauksien tilapäinen pienjänniteverkko.* Tampereen teknillinen yliopisto. Sähköenergiatekniikan laitos. Diplomityö.

MV ESTONIAN onnettomuuden kansainvälinen tutkintakomissio (2000). *Loppuraportti MV ESTONIAN onnettomuudesta 28.päivänä syyskuuta 1994* [Online]. Raportti. Saatavissa:

http://turvallisuustutkinta.fi/material/attachments/otkes/tutkintaselostukset/fi/vesiliikenneonnettomuuksientutkinta/mvestonia/1izoaJRIP/Estonia_loppuraportti.pdf

NauticEXPO. *Ship propulsion system* [Online]. Saatavissa:

<http://www.nauticexpo.com/prod/stadt/product-32120-200622.html>

Nissilä, J., T. Oravasaari & J. Paavola (2015). Mahdollisuuksien meri – 23 suositusta Suomen meriklusterin osaamisen kehittämiseksi [Online]. Teoksessa: *Kymenlaakson ammattikorkeakoulun julkaisuja sarja B. Tutkimuksia ja raportteja nro 147*. Kymenlaakson ammattikorkeakoulu. ISBN 978-952-306-136-1 (PDF). Saatavissa: <http://www.theseus.fi/handle/10024/104062>

Nobels, T. *Industrial Electricity*.

Paju, J. (2017). *Teollisuuden sähköjakeluverkkojen ylijännitesuojaus* [Online]. Lappeenrannan teknillinen yliopisto. Sähkötekniikan koulutusohjelma. Diplomityö. Saatavissa: https://www.doria.fi/bitstream/handle/10024/134168/Diplomityo_Paju_Jussi.pdf?sequence=2

Panu, J. (2016). *Laivaverkon suojauksen mallinnus HIL-simuloinnissa*. Aalto-yliopisto. Sähkötekniikan korkeakoulu. Sähkötekniikan ja automaation laitos. Diplomityö.

Rakennemuutos toimisto (2012). *Meriteollisuuden uudet tuulet* [Online]. Rakennemuutostoitimiston loppuraportti 31.12.2012. Saatavissa: [http://turunseutu.fi/bt/fi/cms.nsf/files/8F82432D0A39A2D6C2257CC300506E81/\\$file/RMT_loppuraportti%20lopullinen.pdf](http://turunseutu.fi/bt/fi/cms.nsf/files/8F82432D0A39A2D6C2257CC300506E81/$file/RMT_loppuraportti%20lopullinen.pdf)

- Salminen, P. (2009). *Teollisuussähköverkon mallintaminen ja vikavirtatarkastelut* [Online]. Tampereen teknillinen yliopisto. Sähkötekniikan koulutusohjelma. Diplomityö. Saatavissa: <http://docplayer.fi/34848157-Petri-salminen-teollisuussahkoverkon-mallintaminen-ja-vikavirtatarkastelut-diplomityo.html>
- Schneider Electric (2015). *Electrical installation guide. According to IEC international standards* [Online]. Schneider Electric. ISBN: 978.2.9531643.3.6. Saatavissa: <http://www.parstasis.com/wp-content/uploads/2015/11/Schneider-Electrical-Installation-Guide-2015.pdf>
- SFS (2012). *SFS-KÄSIKIRJA 600-1. Sähköasennukset. Osa 1: SFS 6000 Pienjännitteasennukset. 1.painos.* Helsinki. SFS. ISBN: 978-952-242-201-9
- SKM Power*Tools for Windows (2003). *IEC 61363 Fault Study* [Online]. Reference Manual. Saatavissa: <https://updoc.tips/download/free-pdf-ebook-reference-iec61363>
- Ståhle, O. (2016). *Laivan sähköverkon yliaaltojen tarkastelu Neplan-ohjelmiston avulla* [Online]. Tampereen teknillinen yliopisto. Sähkötekniikan tiedekunta. Diplomityö. Saatavissa: <https://dspace.cc.tut.fi/dpub/bitstream/handle/123456789/23629/stahle.pdf?sequence=1>
- Terasaki Electric Co. LTD (2014). Deltamarinin aineisto.
- Trafi (2017). *Säädökset* [Online]. Saatavissa: <https://www.trafi.fi/merenkulku/saadokset>
- Typhon HIL Inc. Application, Marine testing. Saatavissa: <https://www.typhoon-hil.com/applications/marine-testing>

- Welling, J. (2010). *Elintarviketehtaan sähköverkon selvitys ja kehittämissuunnitelma* [Online]. Lappeenrannan teknillinen yliopisto. Teknillinen tiedekunta. Diplomityö. Saatavissa: <https://www.doria.fi/bitstream/handle/10024/63169/nbnfi-fe201304193278.pdf?sequence=3>
- Ylinen, M.(2010). *UPS suunnittelu ja mitoitus UPS-laskentaohjelma* [Online]. Satakunnan ammattikorkeakoulu. Sähkötekniikan koulutusohjelma. YAMK-tutkinnon opinnäytetyö.