

Ossi Sjöberg

OIKOSULKUVIRRAT LAIVAN SÄHKÖVERKOSSA

Sähkötekniikan koulutusohjelma

2014

## OIKOSULKUVIRRAT LAIVAN SÄHKÖVERKOSSA

Sjöberg, Ossi  
Satakunnan ammattikorkeakoulu  
Sähkötekniikan koulutusohjelma  
Joulukuu 2014  
Ohjaaja: Pulkkinen, Petteri  
Sivumäärä:27  
Liitteitä:8

Asiasanat: oikosulkuvirta, laivasähköverkko, M/T Jurmo  
Tämän työn aiheena on perehtyä laivan sähköverkkoon ja sen oikosulkuvirtoihin. Esimerkkinä käytetään säiliöalus M/T Jurmon sähköjärjestelmää ja lasketaan verkon oikosulkulaskelmia manuaalisesti.

## SHORT CIRCUIT CURRENTS AT ONBOARD ELECTRICAL SYSTEM

Sjöberg, Ossi  
Satakunnan ammattikorkeakoulu, Satakunta University of Applied Sciences  
Bachelor's Degree Programme in Electrical Engineering  
December 2014  
Supervisor: Pulkkinen, Petteri  
Number of pages:27  
Appendices:8

Keywords: short circuit current, onboard electrical system, M/T Jurmo  
The purpose of this thesis was to familiarize to an onboard electrical system of a tanker ship Jurmo and to manually recalculate short circuit currents in the system.

# Sisällys

1 JOHDANTO.....	5
2 JURMO.....	6
2.1 Alus-luokan esittely.....	6
2.2 Sähköjärjestelmä.....	6
2.3 Sähköntuotanto.....	8
2.3.1 Dieselgeneraattorit.....	8
2.3.2 Akseligenaattori.....	8
2.3.3 Hätägeneraattori.....	9
2.4 Sähkönjakelu.....	10
2.4.1 Päätaulu MS1 (3x440V).....	10
2.4.2 Päätaulu MS2 (3x220V).....	11
2.4.3 Hätätaulu ES1 (3x440V).....	11
2.4.4 Hätätaulu ES2 (3x220V).....	12
2.4.5 Moottorinohjauskeskukset MCC1 ja MCC2 (3x440V).....	12
2.4.6 Lastipumpumoottorinohjauskeskukset CMCC1 ja -2 (3x440V).....	12
3 OIKOSULKUVIRRAT.....	13
3.1 Oikosulkutyypit.....	13
3.2 Oikosulkuvirran luonne.....	14
3.3 Oikosulun aiheuttajat .....	16
3.4 Oikosulun seurauksia .....	16
3.5 Oikosulkusuojaus Jurmon sähköverkossa .....	17
3.6 Oikosulkuvirtojen laskeminen .....	18
3.7 Theveninin menetelmä .....	18
3.8 Oikosulkupiirin komponenttien impedanssit .....	19
3.8.1 Tahtikoneitten oikosulkusuureet .....	20
3.8.2 Muuntajien oikosulkusuureet .....	20
3.8.3 Epätahtimoottorit .....	21
3.9 Ominaisoikosulkutehomenetelmä .....	21
3.10 Verkon komponenttien oikosulkutehojen määrittäminen .....	22
3.11 Sysäysoikosulkuvirran määrittäminen .....	23
3.12 Tulosten tarkastelu .....	23
3.12.1 Päätaulu MS1:n laskelmat.....	23
3.12.2 Hätätaulu ES1:n laskelmat.....	24
3.12.3 Moottorinohjauskeskus MCC1:n laskelmat.....	25
4 LOPPUSANAT.....	26

LÄHTEET

LIITTEET

## MERKINNÄT

$c$	jännitekerroin
$I_k$	jatkuvan tilan oikosulkuvirta
$I_k'$	muutosoikosulkuvirta
$I_k''$	alkuoikosulkuvirta
$I_n$	moottorin nimellisvirta
$I_s$	moottorin käynnistysvirta
$i_s$	sysäysoikosulkuvirta
$\kappa$	sysäyskerroin
$M$	muuntaja
$p$	moottorin napapariiluku
$P_n$	moottorin nimellispätöteho
$R_k$	piirin oikosulkuresistanssi
$R_s$	oikosulkuresistanssi
$R_m$	muuntajan oikosulkuresistanssi
$S$	syöttävä verkko
$S_k$	ominaisoikosulkuteho
$S_n$	nimellinäennäisteho
$U_k$	muuntajan oikosulkujännite prosentteina
$U_n$	Nimellispääjännite
$U_r$	muuntajan resistanssin aiheuttama oikosulkujännite prosentteina
$x$	alkureaktanssi prosentteina
$X_k$	piirin oikosulkureaktanssi
$X_m$	muuntajan oikosulkureaktanssi
$X_s$	oikosulkureaktanssi
$Z_k$	piirin oikosulkuimpedanssi
$Z_m$	epätahtimoottorin oikosulkuimpedanssi
$Z_t$	Theveninin impedanssi
$z_k$	oikosulkuimpedanssin suhteellisarvo
$Z_d$	tahtikoneen tahtireaktanssin suhteellisarvo

## LYHENTEET

CMCC	Cargopump Motor Control Center
DWT	Deadweight tonnage
DG	Diesel Generator
DNV	Det Norske Veritas
EG	Emergency generator
ES	Emergency Switchboard
IEC	International Electrotechnical Commission
IT	Maadoittamaton sähköjärjestelmä jota laivoissa yleensä käytetään
MCC	Motor Control Center
MS	Main Switchboard
PTI	power take in, generaattorin moottorikäyttö-tila
SOLAS	kansainvälinen meriturvallisuutta käsittelevä sopimus
SG	Shaft Generator
TN	Sähköjärjestelmän maadoitustapa joka on suomessa käytössä
UPS	uninterruptible power supply
XLPE	ristisilloitettu polyeteeni, kaapelin eriste



## *IJOHDANTO*

Tässä työssä tarkastellaan laivan sähköverkon rakennetta ja oikosulkuvirtoja, joita siinä voi vikatilanteessa esiintyä. Oikosulkuvirta voi kasvaa hyvinkin suureksi johtuen laivoissa yleisesti käytössä olevasta rakenteesta, jossa usean megawatin sähköjärjestelmä on toteutettu pienjännitteellä. Aihetta lähestytään perehtymällä ensin tämän hetkisen työpaikkani tankkilaiva Jurmon sähköjärjestelmään ja sitten lasketaan suurimpia oikosulkuvirtoja käsin ja verrataan tuloksia laivan suunnitteluvaiheessa kaupallisella tietokoneohjelmalla laskettuihin. Laivasähkötekniikasta ja -asennuksista kerrotut asiat pätevät suurelta osin yleisestikin laivoihin, koska samat sähköjärjestelmän perusrakenteet löytyvät suurimmalta osin muistakin alustyypeistä eri variaatioina alan säännöksistä ja määräyksistä sekä samankaltaisista suunnittelulähtökohdista johtuen. Oikosulkuvirroista kertova osio painottuu sekin laivaverkkoon, mutta myös yleisesti oikosulkuihin ja niiden syntyyn. Lisäksi esitellään käytettyjä laskentamenetelmiä. Päädyin tällaiseen aihevalintaan ajatellen ammatillista kehittymistäni laivasähköalalla sekä mahdollisuutta toteuttaa projekti työn- ja perheen vaatimukset huomioon ottaen laivatyöjaksojen aikana. Omat näkemykseni laivasähkötekniikasta perustuvat usean vuoden työkokemukseeni laivasähkömiehenä tankkilaivoilla. Oikosulkuvirroista ja niiden laskemisesta minulla taas ei ole erityistä ammatillista kokemusta. Tärkeimmät lähteeni siinä aihepiirissä ovat ”Teollisuusverkkojen oikosulkuvirtojen laskeminen, K. Huotari, J. Partanen, 1998” ja ”Cahier technique no. 158 Calculations of short-circuit currents : B. de Metz- Noblat, F Dumas, C Poulain, 2005”.



Kuva 1. M/T Jurmo (Ossi Sjöberg 2012)

## *2JURMO*

### *2.1 Alus-luokan esittely*

”Purha-luokaan kuuluu 4 kappaletta 25000 DWT:n öljytuote- ja kemikaalitankkereita, Purha, Jurmo (kuva 1), Futura ja Neste. Alukset ovat valmistuneet Kiinassa Jingling Shipyardin telakalla vuosina 2003 - 2005. Alukset ovat 169 metriä pitkiä ja 23,75 metriä leveitä. Syväys täydessä lastissa on 10,9 metriä. (Neste Oil 2003.) Alukset operoivat pääasiallisesti Euroopassa sekä Pohjois-Atlantin liikenteessä.” /7/

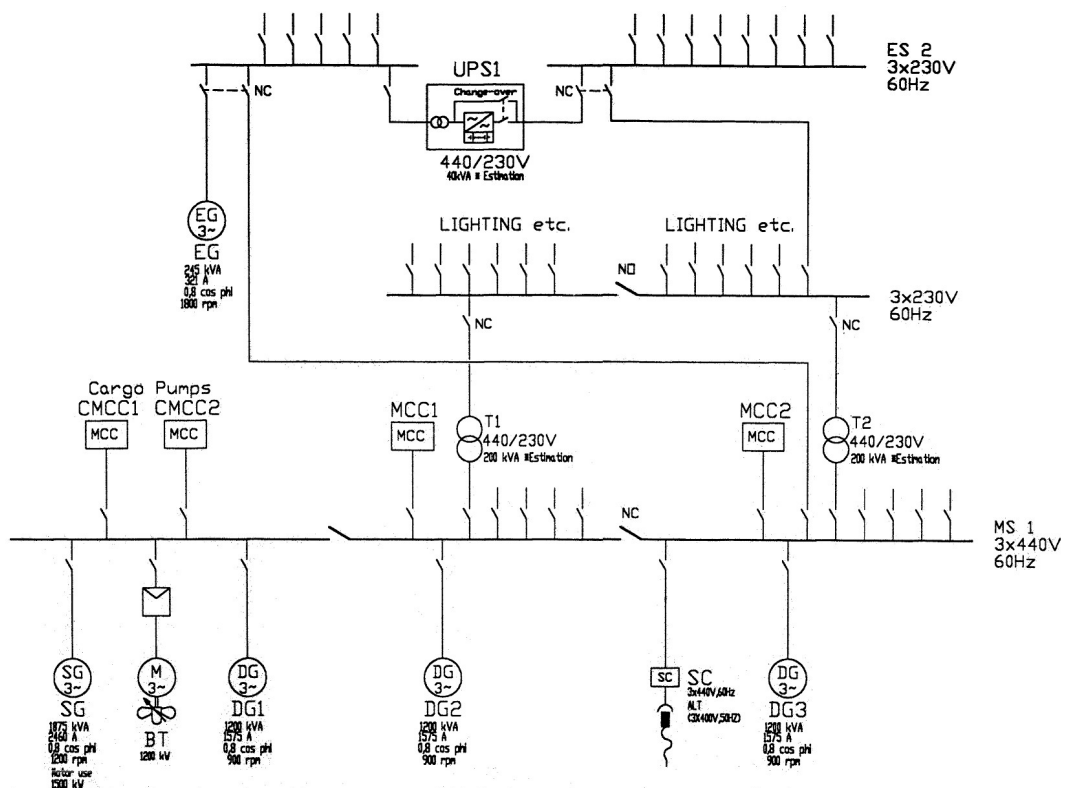
### *2.2 Sähköjärjestelmä*

Jurmon sähköjärjestelmä (kuva 2) on ulkomaanliikenteen rahtilaivoissa yleinen 440V 60Hz. Verkon komponentit on toimittanut Terasaki Electric Co. Järjestelmän tyyppi on 3-johtiminen IT (ilman nollajohtinta, kuten IT-verkoissa yleensäkin). IT-verkossa mitään virtapiiriin osaa ei ole kytketty suoraan maahan, vaan kyseessä on maasta erotettu järjestelmä. Vikatilanteessa jännitteelle alttiit osat on kytketty maapotentiaaliin. Laivan ollessa kyseessä rautarakenteeseen, joka on yhteydessä laivan runkoon. Jokaisessa pää- ja hätätaulun osiossa on vaiheiden ja rungon välillä oma eristysvastuksen valvontansa, joka on yhteydessä konevalvontajärjestelmään. Nollajohtimen puuttuminen ja maadoittamattomuus tekevät tästä sähköjärjestelmästä hyvin vikasetoisen. Koska järjestelmä on nollaton täytyy 230V jännite muodostaa

erillisillä muuntajilla (kuvassa 2). Tästä syystä monet tavalliset TN-järjestelmille suunnitellut voimavirtaa käyttävät laitteet eivät 230V ohjausjännitteen puuttuessa toimi laivan verkossa ilman modifikaatioita.

Järjestelmän rakennetta määräävät pitkälti luokituslaitoksen määräykset, jotka vaikuttavat turvallisuuteen ja käyttövarmuuteen ja laivan toimintakykyyn vikatilanteissa. Vaadittuja ominaisuuksia ovat esim. black-out automatiikka, jaettavat päätaulut sekä varmennetut ja katkeamattomat hätätaulut ja kriittisten laitteiden kahdentaminen. /1/

Purha-luokan alukset ovat DNV:n (Det Norske Veritas) luokittamia. Tämä tarkoittaa sitä että kaikki sähköjärjestelmän rakennetta, ominaisuuksia, asennustapaa ja -materiaaleja, mitoituksia ja vaadittuja testauksia sekä tarkastuksia koskevat määräykset on antanut DNV laivojen sähköasennuksia koskevissa säännöissään. Kaikki muutostyöt vähäisiä lukuunottamatta on myös hyväksyttävä ja tarkastutettava DNV:llä. /1/ Luokituslaitoksen määräykset perustuvat kansainvälisiin standardeihin, sopimuksiin ja sääntöihin (mm. IEC, SOLAS).

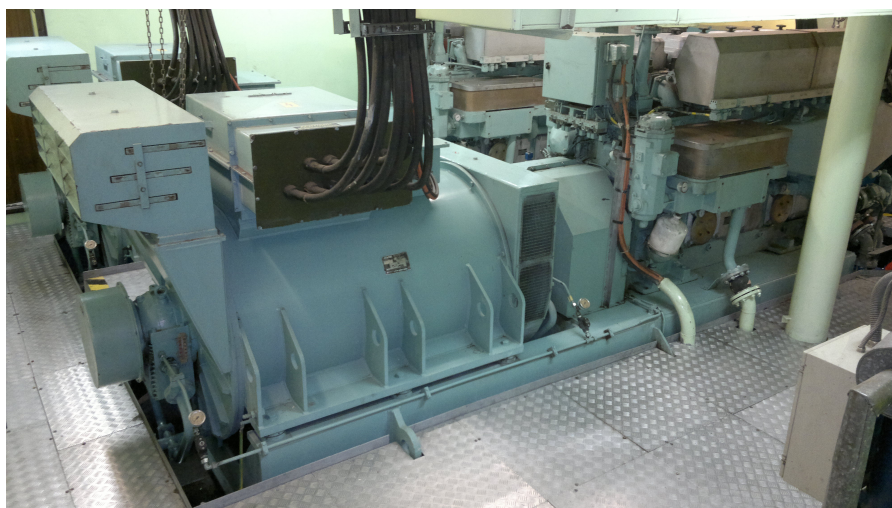


Kuva 2. Jurmon sähköjärjestelmän pääkaavio /6/

## 2.3 Sähkön tuotanto

### 2.3.1 Dieselgeneraattorit

Aluksessa on 3 kappaletta 1200kVA dieselgeneraattoreita (kuva 3), joita ajetaan tarpeen mukaan 1, 2 tai 3 kappaletta rinnakkain. Sähkö tuotetaan dieselgeneraattoreilla laivan ollessa satamassa sekä sinne saavuttaessa ja lähdettäessä tai muulloin kun vaaditaan suurempaa varmuutta sähköntuotannossa esim. luotsimatkat ja kanava-ajo. Generaattorien toimittaja on AVK Deutschland GmbH & Co. KG ja yksikön teho on 1200kVA. Generaattorit ovat samalla pedillä Wärtsilän 6L20 Dieselkoneen kanssa ja niissä on harjaton magnetointi.



Kuva 3. Jurmon dieselgeneraattori.(Ossi Sjöberg, 2014)

### 2.3.2 Akseligenaattori

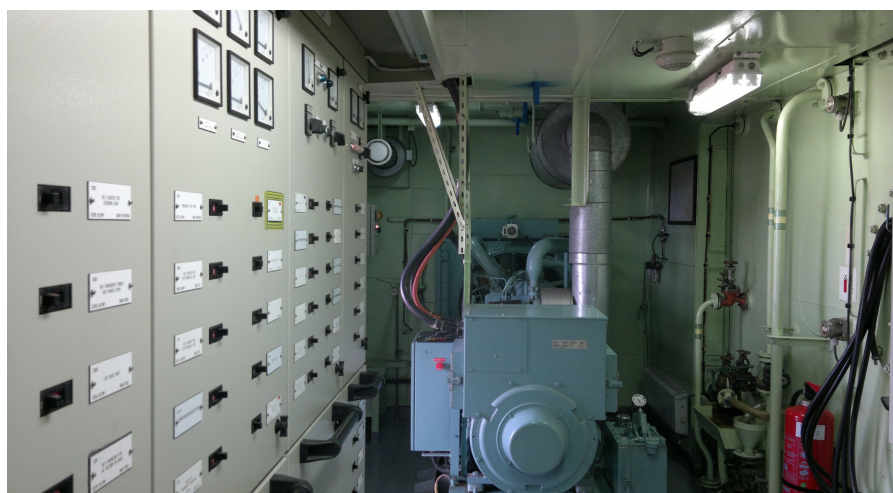
Aluksen ollessa meriajossa tuotetaan sähkö normaalisti akseligenaattorilla (kuva4), koska se on dieselgeneraattoria kustannustehokkaampi tapa tuottaa sähköä. Generaattori saa käyttövoimansa laivan pääkoneelta ylennysvaihteen kautta. Toinen akseligenaattorin käyttötapa Jurmon sähköjärjestelmässä on käyttää sitä dieselgeneraattoreiden sijasta sähkön tuottamiseen keulapotkuria varten. Tällöin ne on erotettu muusta verkosta. Kolmas käyttötapa akseligenaattorille on käyttää sitä varapropulsiomootorina. Tällöin se pyörittää potkuriakselia dieselgeneraattorien tuottaessa sähkön. Jurmon akseligenaattorin teho on 1500 kW. Generaattori on AVK:n toimittama.



Kuva 4. Jurmon akseligenaattori. (Ossi Sjöberg, 2014)

### 2.3.3 Hätägeneraattori

Hätägeneraattori (kuvissa 2 ja 5) käynnistyy automaattisesti ja ryhtyy syöttämään hätätaulua ES1, jos sen normaalisyöttö päätaulusta MS1 katkeaa. Hätägeneraattorin sijoituspaikka on aina pääkanta ylempänä kansirakennelmassa ja yleensä samassa tilassa on myöskin hätätaulu. Hätägeneraattoria pyörittävällä dieselmoottorilla tulee olla myöskin varakäynnistysjärjestelmä. /1/ Kuvassa 5 näkyy Jurmon generaattorin oikealla puolella hydraulikäyttöinen varakäynnistin. Normaalikäynnistys on sähköllä. Kuvan vasemmassa reunassa on hätätaulu ES1. Hätägeneraattorin teho on 256kVA.



Kuva 5. Jurmon hätägeneraattori. (Ossi Sjöberg, 2014)



## 2.4 Sähkönjakelu

Kuvassa 6 näkyy ryhmätauluja ja kaapeliratoja Jurmon konehuoneesta. Luokituslaitoksen antamat laiva- ja konehuoneympäristön asennusmääräykset asettavat vaatimuksia mm. sähköasennusten kotelointiluokalle,



luoksepäästävyydelle, mekaaniselle suojaukselle sekä tärinän-, korroosion- ja lämmönkestävyydelle. Normaalin sähköteknisen mitoituksen lisäksi kaapelien sallittu tyyppi, -kiinnitys, -asennustapa, -taivutussäde, ja -eristys on myös määritelty. Kaapelien tulee olla itse sammuvia ja läpiviennit palosuojattuja. Öljytankkerin lastikantta koskevat myöskin räjähdysvaarallisen tilan määräykset./1/

Kuva 6. Sähköasennuksia Jurmon konehuoneesta. (Ossi Sjöberg, 2014)

### 2.4.1 Päätaulu MS1 (3x440V)

Sähköverkon ”selkärangan” muodostaa päätaulu MS1 (kuvassa 7 oikealla). Pääkiskostot ovat 100 x 12 mm kuparia. Taulu on 8 metriä pitkä sijaitsee aluksen konevalvomossa. Sitä syöttävät joko 1-3 dieselgeneraattoria tai akseligenaattori. Maasyöttö mahdollisuutta käytetään vain laivan telakointien aikana. Taulu on jaettavissa jakokatkaisijoilla kolmeen osaan. Vikatilanteessa erottamisen lisäksi taulu jaetaan jos akseligenaattoria käytetään keulapotkurin voimanlähteenä sekä moottoria käynnistäessä kun siirrytään käyttämään varapropulsiojärjestelmää PTI-moodiin, jossa potkuriakselia pyöritetään pääkoneen sijasta akseligenaattoria moottorina käyttäen.

MS1 Syöttää suoraan ES1-hätätaulua, moottorikäynnistin keskuksia, normaaleja 440V ryhmäkeskuksia ja muuntajien kautta MS2(220V) päätaulua (kuva 8). MS1 syöttää suoraan myös suurimpia kuluttajia ja kriittisiksi luokiteltuja kuluttajia koska niille vaaditaan oma syöttönsä suoraan päätaulusta /1/. Tällaisilla suurilla moottorikuluttajilla on myös oma ampeeri mittarinsa taulussa.



Kuva 7. Päätaulu MS1 sekä MCC1 ja MCC2. (Ossi Sjöberg, 2014)

### 2.4.2 Päätaulu MS2 (3x220V)



220V päätauluja syötetään kahdella MS1:n syöttämällä muuntajalla ja se on normaalitilanteessa jaettuna kahtia jakokatkaisijalla. Tarpeen vaatiessa sitä voidaan käyttää yhdellä muuntajalla jakokatkaisija kiinni.

MS2 syöttää normaaleja 220V ryhmätauluja kuten valaistus- ja lämmitysryhmät ja joitain tärkeämpiä yksittäisiä kuluttajia.

Kuva 8. Päätaulu MS2 (Ossi Sjöberg, 2014)

### 2.4.3 Hätätaulu ES1 (3x440V)

Hätätaulu ES1 (kuvan 9 vasen puolisko) syöttää kuluttajia, joiden on toimittava kaikissa tilanteissa. Näitä ovat mm.

- Hätäpalopumppu
- Startti-ilmakompressori (toinen kahdesta)
- Konehuoneen hätätyhjennuspumppu
- Peräsinkone (toinen kahdesta hydraulikkapumpusta)



Kuva 9 . Hätätaulut ES1 ja ES2 (Ossi Sjöberg, 2014)

#### 2.4.4 Hätätaulu ES2 (3x220V)

Hätätaulu ES2 (kuvan 9 oikea puolisko) saa syöttönsä akustosta invertterin kautta. Akuston kapasiteetti on mitoitettu niin että virtaa riittää vähintään 30 min. ES2:een on kytketty hätävalaistus sekä hälytys- ja valvontalaitteistot sekä turvallisuuteen ja pelastautumiseen liittyviä- ja muita katkeamatonta sähköä vaativia kuluttajia.

#### 2.4.5 Moottorinohjauskeskukset MCC1 ja MCC2 (3x440V)

MCC1 syöttää pääkoneen apulaitteiden sähkömoottoreita ja muita konehuoneen moottorikäyttöjä. Keskus on sijoitettu päätaulujen kanssa konevalvomoon jossa tärkeiden kuluttajien syöttöä on helppo valvoa. MCC2 on muutoin samanlainen mutta siinä sijaitsevat kahdennettujen laitteiden toiset yksiköt. Kuvassa 7 vasemmalla- ja takaseinällä MCC1 ja MCC2

#### 2.4.6 Lastipumppumoottorinohjauskeskukset CMCC1 ja -2 (3x440V)

Lastipumppumoottorikeskukset ovat taajuusmuuttajakäytöt aluksen lastipumppujen ja painolastipumppujen moottoreille. CMCC:t ovat verkon suurimmat kuluttajaryhmät ja sijaitsevat omissa huoneessaan, jossa on tehokas jäähdytys ja ilmanvaihto (Kuva 10).



Kuva 10. Lastipumppumoottorinohjauskeskukset CMCC1 ja CMCC2 (Ossi Sjöberg 2014)



### *3 OIKOSULKUVIRRA*

Oikosulkuvirtojen hallinnalla on keskeinen merkitys erityisesti teollisuuden sähköverkoissa, joissa etäisyydet ovat lyhyitä ja oikosulkuvirrat kaikkialla suuria. Verkkoon on usein liitetty suuria muuntajia, omia generaattoreita ja paljon muita pyöriviä sähkömoottoreita./2/ Jurmon kaltaisen laivan sähköverkolla on nämä samat ominaisuudet ja matalasta 440V jännitteestä johtuen virrat ovat muutenkin suuria. Laivan sähköjärjestelmän suunnitteluun kuuluvatkin oikosulkuvirtalaskelmat verkon pääkomponenteilla, joiden avulla voidaan varmistaa verkon rakenteiden ja -komponenttien riittävä oikosulkuvirtojen aiheuttaman ylikuumenemisen ja magneettivoimien kesto, jotta vikapaikan erottamisen jälkeen muu verkko olisi vielä toimintakunnossa. DNV vaatii oikosulkuvirta laskelmat aluksissa joiden generaattoriteho ylittää 500 kVA /1/.

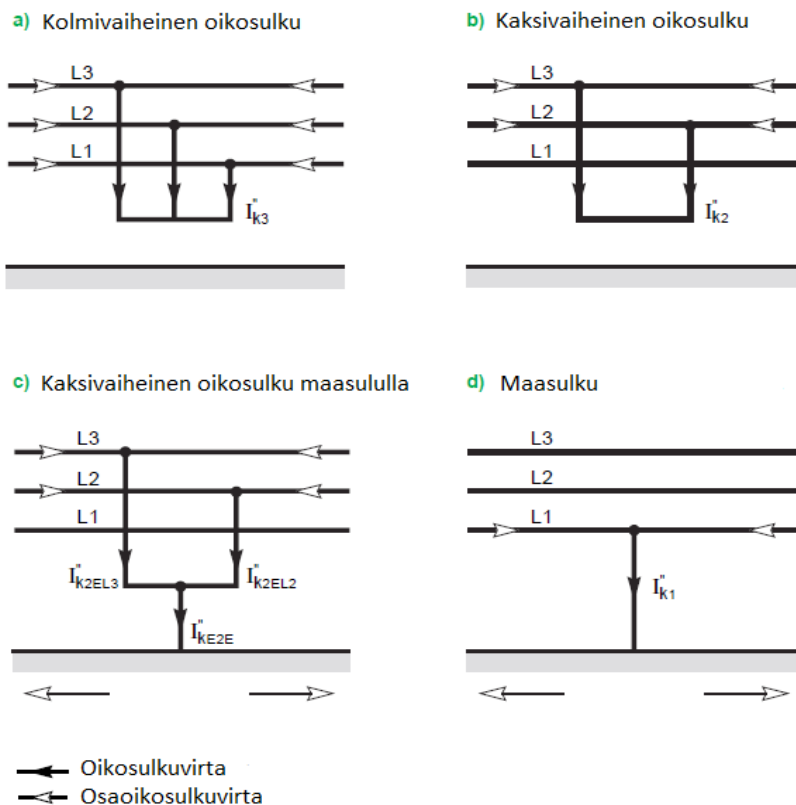
#### *3.1 Oikosulkutyypit*

Nollattomassa kolmivaihejärjestelmässä oikosulku voi muodostua kahden tai kolmen vaiheen välille ja oikosulkuun voi liittyä myös maasulku.(Kuva 11) Maasulkuvirran suuruus riippuu verkon maadoituksesta siten, että pienellä impedanssilla tai suoraan maadoitetussa verkossa se nousee korkeaksi ja tällöin sitä on mahdollista kutsua myös yksivaiheiseksi oikosuluksi. /4/

Oikosulkuvirta on käytännössä aina kolmivaiheisessa oikosulussa kaksivaiheista suurempi. Ainoastaan pysyvän tilan oikosulkuvirta voi jossain tapauksessa olla suurempi kaksivaiheisessa oikosulussa, mutta oikosulku ei tavallisesti kestä niin kauan. /2/

Maadoittamattomassa verkossa kuten Jurmolla oikosulkuvirrat rajoittuvat 2- ja 3-vaiheisiin oikosulkuihin koska maasulkuvirta on pieni. Yksittäinen maavika ei normaalisti aiheuta välitöntä vaaraa eikä pysäytä laitteistoa, mikä voi olla laivan turvallisen operoinnin kannalta joskus tärkeää. Tästä esimerkkinä Jurmolla 16.11.2014 ilmennyt vakava maavika, jossa laivan etukannen kaapeliputkessa puhki hiertynyt keulapotkurin sähkömoottorin voimavirtakaapeli aiheutti laivan rungon potentiaalinen siirtymisen lähes L3 vaiheen potentiaaliin. Konevalvomossa suorittamani mittauksen mukaan jännite L3-vaiheesta runkoon oli tällöin 0,6 Volttia. Keulapotkuri kuitenkin toimi normaalisti, mutta pysäytettiin hallitusti turvallisuuden

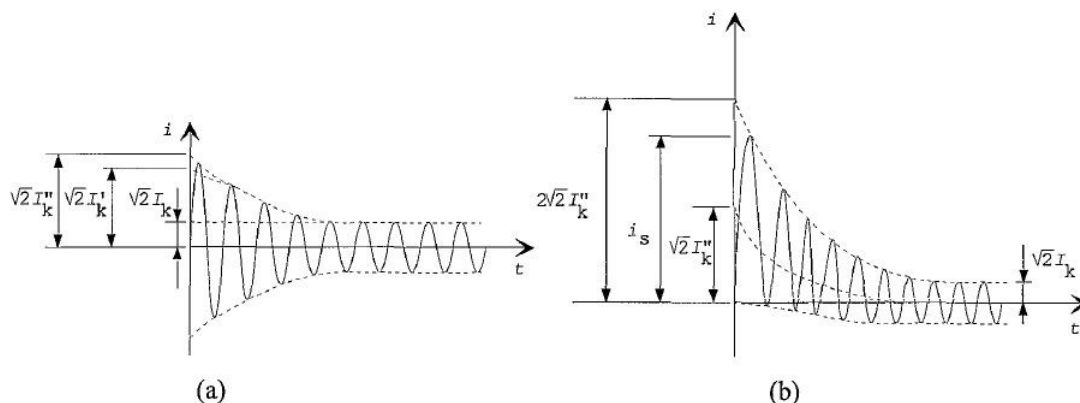
varmistamiseksi. Laivan satamaan tulo suoritettiin sillä kertaa loppuun ilman keulapotkuria.



Kuva 11. Oikosulkutyypit /3/

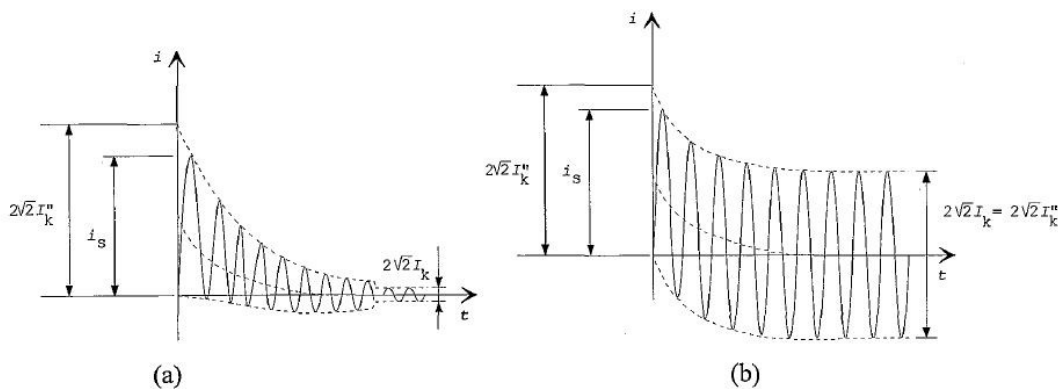
### 3.2 Oikosulkuvirran luonne

Kuvassa 12(a) on kuvattu yksivaiheinen oikosulkuvirta sellaisella ajan hetkellä kun oikosulku alkaa täsmälleen virran vaihekulman ollessa  $0^\circ$ . Tällöin oikosulkuvirta on täysin symmetrinen, eikä tasavirtakomponenttia esiinny ollenkaan. Tilanne on sama myös vaihekulman ollessa  $180^\circ$ . Muulla hetkellä tapahtuva oikosulku on tasavirtakomponentin takia epäsymmetrinen. Tasavirtakomponentti on suurimmillaan ja oikosulkuvirta mahdollisimman epäsymmetrinen vaihekulman ollessa  $\pm 90^\circ$ . Tällainen tilanne on kuvassa 12(b). Kuten kuvasta 12 voi havaita on oikosulun syntyhetkellä suuri vaikutus suurimman hetkellisen oikosulkuvirran arvon suuruuteen. Kolmivaihejärjestelmässä on muistettava että oikosulkuvirta voi olla symmetrinen ainoastaan yhdessä vaiheessa kerrallaan. /2/



Kuva 12. Tahtigeneraattorin syöttämä oikosulkuvirta eri oikosulun syntyhetkillä: (a) symmetrinen oikosulkuvirta; (b) epäsymmetrinen oikosulkuvirta. Kuvassa  $I_k''$  on alkuoikosulkuvirta,  $I_k'$  on muutosoikosulkuvirta,  $I_k$  on jatkuvan tilan oikosulkuvirta ja  $i_s$  on oikosulkuvirran huippuarvo eli sysäyoikosulkuvirta. /2/

Kuvasta 13 voi nähdä vikapaikan vaikutuksen oikosulkuvirtaan. Oikosulun sattuessa lähellä generaattoria oikosulkuvirran vaihtokomponentti pienenee nopeasti kohti pysyvän tilan arvoa. Oikosulussa generaattorin impedanssi suurenee nopeasti, ja oikosulkuvirta näinollen pienenee. Jos taas vikapaikka on niin kaukana että sen ja generaattorin välinen impedanssi tulee suureksi generaattorin impedanssiin verrattuna, niin generaattorin impedanssin muutoksella ei ole juuri merkitystä kokonaisuoikosulkuimpedanssiin eikä oikosulkuvirtakaan täten pienene. A-kuvan tilanne vastaa laiva- ja teollisuusverkkojen tilannetta generaattoreiden ollessa aina lähellä. /2/



Kuva 13. Epäsymmetrinen oikosulkuvirta: (a) oikosulku lähellä generaattoria; (b) oikosulku kaukana generaattorista. /2/

### *3.3 Oikosulun aiheuttajat*

Oikosulun aiheuttajia saattaa olla eristyksen vanheneminen ja mekaaninen haurastuminen tai ympäristön kuumuudesta, kosteudesta tai syövyttävyydestä johtuva huononeminen, korjaus- ja huoltotoimenpiteiden yhteydessä asetettujen maadoitusten unohtuminen paikalleen, ylijännitteen aiheuttama valokaari eristysvälin ylitse, mekaaninen vaurio, virheelliset käyttötoimenpiteet (esim. virheellinen tahdistus), ilkeältä taikka vieras objekti kuten työkalu tai eläin, joka toimii tahattomasti johtimena eristämättömien johtimien välissä. /1; 2/

Sopiva vika laivan sähköjärjestelmän automaatio- tai turvajärjestelmissä saattaa myös välillisesti aiheuttaa oikosulun virheellisellä toiminnalla tai mahdollistamalla virheellisen käyttötoimenpiteen mikä olisi muutoin estetty. Esim. generaattoria tahdistuksessa.

### *3.4 Oikosulun seurauksia*

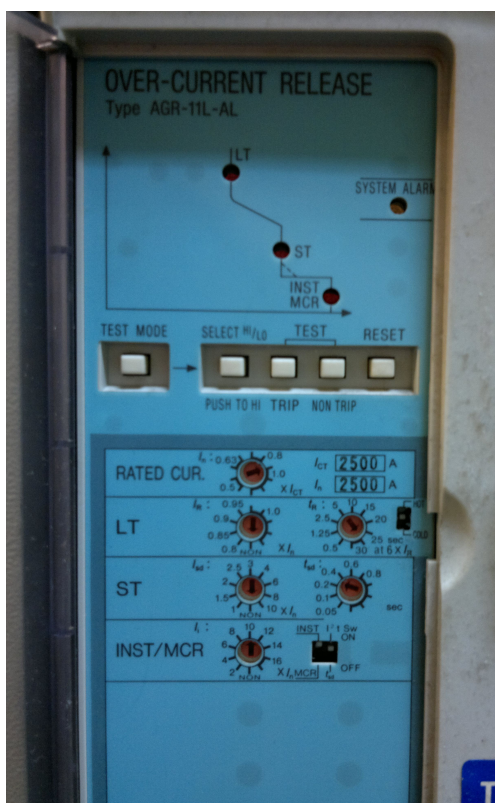
Oikosulusta aiheutuvat vauriot riippuvat oikosulun tyypistä, kestosta, vikakohtasta ja oikosulkutehosta. Magneettiset voimat voivat aiheuttaa mekaanisia vaurioita vääntäen kiskostoja ja irrottaen kaapeleita ja suuri lämpötilan nousu voi vaurioittaa eristyksiä. Valokaaren tapauksessa johtimet voivat hitsaantua kiinni ja valokaari myös vaurioittaa eristyksiä. Valokaaren aiheuttamat räjähdyslieskat voivat sytyttää palavia materiaaleja (esim. vaatteet) ja aiheuttaa hengenvaarallisia palovammoja. /3/ DNV vaatiikin laivojen sähkötaulusasennuksilta vähintään yhden sekunnin oikosulkuvoimien kestoisuutta ja rakenteen tulee olla sellainen ettei valokaarivian sattuessa sähkötaulun edessä tai takana oleskelevalle aiheudu vaaraa, eikä vaurio pääse leviämään taulun viereiseen osioon. /1/

Matalajännitejärjestelmissä valokaaret ovat kuitenkin hieman vähemmän vaarallisia kuin suurjännitteellä, jolloin sähkötaulujen ja laitteistojen sisällä tulee olla valokaarivahdit /1/. Matalajännitejärjestelmässä valokaaren kautta tapahtuvissa oikosuluissa oikosulkuvirta ja vapautuva energia jäävät merkittävästi pienemmiksi valokaaren resistanssin takia. Alle 440V jännitteellä joskus jopa yli 50% /2/.

Oikosulun sattuessa muissa verkon osissa voi jännite hetkellisesti notkahtaa kunnes ylivirtasuojaus ehtii toimia ja muitakin häiriöitä voi esiintyä. Ylivirtasuojauksen toimiminen kestää millisekunneista satoihin millisekunteihin. Tällöin osa verkkoa irtikytketty riippuen verkon rakenteesta ja selektiivisyydestä. Myös ohjaus- ja valvontapiireissä voi esiintyä häiriöitä oikosulun aikana. /3/

### 3.5 Oikosulkusuojaus Jurmon sähköverkossa

Oikosulkusuojauksesta huolehtivat suojareleet päätaulujen generaattorikatkaisijoissa, -välikatkaisijoissa (Kuva 15) ja -nousujohtojen ja pääjohtojen lähtökatkaisijoissa. Päätaulujen ja ryhmätaulujen kompaktikatkaisijat ja johdonsuojakatkaisijat ovat myös osa oikosulkusuojausta. Suojaus on normaaliin tapaan suunniteltu toimimaan selektiivisesti siten, että oikosulkulaukaisu tapahtuu mahdollisimman lähellä vikapaikkaa muun verkon jatkaessa normaalisti toimintaa vikapaikan irrotuksen jälkeen. Suunnitteluvaiheessa on useista verkon kohdista tehty graafiset selektiivisyys analyysit, joiden perusteella suojareleiden sopivat asetellut on voitu määrittää siten että selektiivisyys toteutuu. /5/ Jurmon katkaisijoiden suojareleissä (kuva 14) on ekvivalenttisen termisen oikosulkuvirran ja välittömän katkaisun lisäksi laukaisuviiveen ja -virran säätö nopealle ja hitaalle laukaisulle, joiden avulla laukaisukäyrä on saatu halutunlaiseksi.



Kuva 14. Päätaulun välikatkaisijan suojarele (Ossi Sjöberg 2014)



Kuva 15. Päätaulun välikatkaisija  
(Ossi Sjöberg 2014)

### 3.6 Oikosulkuvirtojen laskeminen

Oikosulkuvirtalaskelmien perustapaus on kolmivaiheinen eli symmetrinen oikosulku, jossa suurimmat oikosulkuvirrat esiintyvät. Verkon ja kytkinlaitteiden mitoittamiseen riittää, kun tunnetaan suurimmat oikosulkuvirrat. Minimi oikosulkuvirat taas täytyy tuntea oikosulkusuojauksen toiminnan varmistamiseksi. Tällöin otetaan huomioon myös vikaimpedanssit. /2/

Oikosulkuvirtojen laskemiseen on kehitetty useita eri laskentamenetelmiä. Helppokäyttöisin on ominaisoikosulkutehooon perustuva menetelmä, joka sopii hyvin säteittäisten verkkojen oikosulkutehoojen käsinlaskentaan ja suuruusluokka arviointiin /2/. Theveninin menetelmä on tarkempi ja soveltuu hyvin sellaisten verkkojen oikosulkuvirtojen määrittämiseen joissa oikosulkuvirta muodostuu useiden eri oikosulkuvirtojen summana, ja myös virran vaihekulman voi laskea /2/. Lähteessä 3 taas opastetaan mm. teoreettisemmän IEC60909 mukaisen symmetristen komponenttien menetelmään käyttöön, jota käytetään pääasiassa suurjännite järjestelmissä.

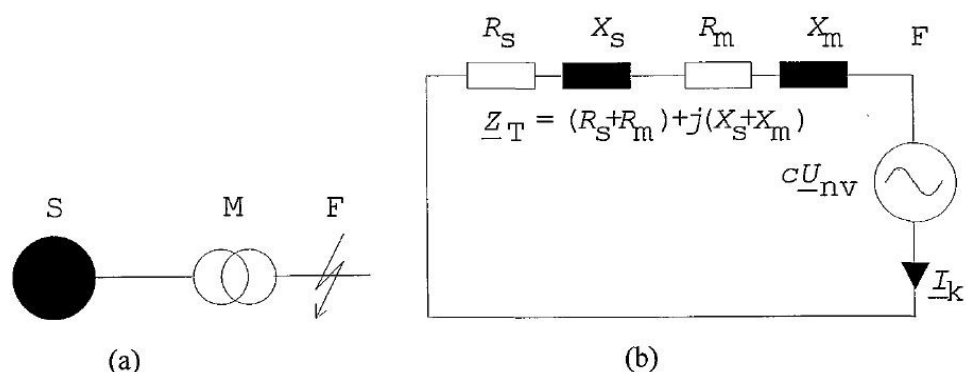
Jotta laskemisesta ei tulisi tarpeettoman hankalaa, tällaiset menetelmät sisältävät tiettyjä perusoletuksia ja rajoituksia millaisessa tilanteessa tulokset ovat päteviä. Esimerkiksi vian tyyppi ei voi muuttua 2-vaiheisesta 3 vaiheiseksi, jännitteet pysyvät likimain vakaina, eikä kapasitansseja ja kuormitusvirtoja oteta huomioon. /3/

Kuitenkin näillä työkaluilla tavallisesti saadaan hyviä likiarvoja näinkin monimutkaisista fysikaalisista ilmiöistä lopputuloksen sisältäessä virhettä vain tietyissä hyväksytyissä rajoissa. Tämä virhe on lähes poikkeuksetta varovaiseen suuntaan. /3/

Tässä työssä käytetyt kaavat ja menetelmät esitellään seuraavissa kappaleissa. Kokonaisvaltaisemmin laskentaa käsitellään esim. lähteissä 2 ja 4. Laivan dokumenteista löytyvät DNV:n vaatimat IEC 909 standardin mukaiset suurimpien oikosulkuvirtojen laskelmat on laskettu ABB:n DOC (release "D") ohjelmalla.

### 3.7 Theveninin menetelmä

Kuten kuvassa 16 kaikki vikavirtaa syöttävät lähteet sekä verkon muut komponentit sijoitetaan yksivaiheiseen sijaiskytkentään ja korvataan oikosulkuimpedansseillaan sekä sievennetään yhdeksi impedanssiksi, jota syöttää yksi ekvivalenttinen jännitelähde. Tätä impedanssia kutsutaan theveninin impedanssiksi. /2/



Kuva 16. Theveninin menetelmän periaate oikosulkulaskennassa: (a) tarkasteltava piiri. Kolmivaiheinen vastukseton oikosulku pisteessä F; (b) tilannetta vastaava yksivaiheinen sijaiskytkentä. S on syöttävä verkko,  $R_s$  syöttävän verkon oikosulkuresistanssi,  $X_s$  syöttävän verkon oikosulkureaktanssi, M muuntaja,  $R_m$  muuntajan oikosulkuresistanssi ja  $X_m$  muuntajan oikosulkureaktanssi.  $Z_T$  on edellisistä muodostettu Theveninin impedanssi. /2/

Theveninin impedanssin laskemisen jälkeen voidaan määrittää alkuoikosulkuvirta. Alkuoikosulkuvirralla tarkoitetaan oikosulkuvirran vaihtovirtakomponentin tehollisarvoa oikosulun syntyhetkellä. Alkuoikosulkuvirran arvoa ei sellaisenaan käytetä suojauksen ja mitoituksen perusteena mutta sitä tarvitaan muiden oikosulkusuureiden määrittämiseen (esim. sysäysoikosulkuvirta). Alkuoikosulkuvirta  $I_k''$  voidaan määrittää seuraavasti. /2/

$$I_k'' = \frac{c \times U_n}{Z_T}$$

Missä

- c jännitekerroin standardin IEC 909:n taulukosta  
(440 voltin jännitteellä  $\rightarrow$  1,05)
- $U_n$  verkon nimellisjännite
- $Z_T$  Theveninin oikosulkuimpedanssi

### 3.8 Oikosulkupiirin komponenttien impedanssit

Jotta theveninin oikosulkuimpedanssi voidaan laskea, pitää selvittää oikosulkupiirin kaikkien komponenttien impedanssit ja laskea ne yhteen. Tarvittavat tiedot löytyvät laitteiden tyyppikilvistä ja teknisistä dokumenteista. Joissain kohdissa voi joutua käyttämään yleisiä taulukko arvoja.

### 3.8.1 Tahtikoneitten oikosulkusuureet

Tahtikoneiden oikosulkusuureet voidaan määrittää seuraavilla yhtälöillä. /2/

$$X_k = \frac{x}{100} \times \frac{U_n^2}{S_n}$$

Missä	$X_k$	Tahtikoneen reaktanssi
	$x$	alkureaktanssi prosentteina
	$U_n$	tahtikoneen nimellispääjännite
	$S_n$	tahtikoneen nimellinäennäisteho

$$R_k = 0,1 \times X_k \quad \text{Tahtikoneen resistanssi } R_k.$$

$$Z_k = \sqrt{R_k^2 + X_k^2} \quad \text{Tahtikoneen impedanssi } Z_k.$$

### 3.8.2 Muuntajien oikosulkusuureet

Muuntajien oikosulkusuureet voidaan määrittää seuraavilla yhtälöllä. /2/

$$Z_k = \frac{u_k}{100} \times \frac{U_n^2}{S_n} \quad R_k = \frac{u_r}{100} \times \frac{U_n^2}{S_n} \quad X_k = \sqrt{Z_k^2 - R_k^2}$$

Joissa

$Z_k$	muuntajan oikosulkuimpedanssi
$R_k$	muuntajan oikosulkuresistanssi
$X_k$	muuntajan oikosulkureaktanssi
$U_n$	muuntajan nimellispääjännite
$S_n$	muuntajan nimellinäennäisteho
$u_k$	muuntajan oikosulkujännite prosentteina
$u_r$	muuntajan resistanssin aiheuttama oikosulkujännite prosentteina



### 3.8.3 Epätahtimoottorit

Epätahtimoottorit, joita käytännössä kaikki laivan sähkömoottorit ovat, vaikuttavat suurentavasti oikosulkuvirtoihin ja ne on pienestä yksikkökoostaan huolimatta otettava huomioon laskelmissa suuren lukumääränsä takia. Moottorikuormasta voidaan muodostaa ekvivalenttimoottori käyttäen epätahtimoottorin oikosulkuimpedanssin  $Z_m$  kaavaa. /2/

$$Z_m = \frac{1}{I_s/I_n} \times \frac{U_n^2}{S_n}$$

jossa  $U_n$  moottorin nimellispääjännite  
 $I_n$  moottorin nimellisvirta  
 $I_s$  moottorin käynnistysvirta  
 $S_n$  moottorin nimellinäennäisteho

Oikosulkuimpedanssi  $Z_m$  voidaan jakaa resistanssiksi ja reaktanssiksi taulukko 1:n avulla. /2/

$U_n/kV$	$P_n/p/MW$	$R_m/X_m$	$X_m/Z_m$
$\geq 1$	$\geq 1$	0,10	0,995
$\geq 1$	$< 1$	0,15	0,989
$< 1$	kaikki	0,42	0,922

Taulukko 1. epätahtimoottoreiden  $R_m/R_x$  ja  $X_m/Z_m$  suhteita.  $U_n$  on moottorin nimellispääjännite,  $P_n$  on moottorin nimellispäteho ja  $p$  on moottorin napapariiluku. /2/

### 3.9 Ominaisoikosulkutehomenetelmä

Yksinkertaisin tapa laskea verkon oikosulkuvirrat on käyttää ominaisoikosulkutehomenetelmää. Virtojen vaihekulmia ei saada selville, mutta likimääräinen alkuoikosulkuvirta kylläkin. Menetelmässä ei yleensä huomioida komponenttien resistansseja vaan hyödynnetään niiden reaktansseja. Menetelmää tulisi käyttää vain lähinnä suuntaa-antavana apukeinona vikavirtojen nopeaan arviointiin. Rinnankytkettyjen komponenttien oikosulkutehot lasketaan yhteen kokonaisoikosulkutehon määrittämiseksi. /4/

$$S_k = S_{k1} + S_{k2} + S_{k3} + S_{k4} + \dots + S_{kn}$$

Sarjaan kytkettyjen komponenttien ominaisoikosulkuteho saadaan laskemalla yhteen komponenttien ominaisoikosulkutehojen käänteisarvot. /4/

$$\frac{1}{S_k} = \frac{1}{S_{k1}} + \frac{1}{S_{k2}} + \frac{1}{S_{k3}} + \dots + \frac{1}{S_{kn}}$$

missä

$S_k$	ominaisoikosulkuteho
$S_{k1} \dots S_{kn}$	verkon komponenttien ominaisoikosulkutehot

Alkuoikosulkuvirta voidaan määrittää verkon ominaisoikosulkutehon perusteella seuraavan yhtälön mukaisesti: /4/

$$I_k'' = \frac{1,1 \times S_k}{\sqrt{3} \times U_n}$$

Missä

$I_k''$	alkuoikosulkuvirta
$S_k$	ominaisoikosulkuteho
$U_n$	verkon nimellisjännite

### 3.10 Verkon komponenttien oikosulkutehojen määrittäminen

Seuraavia kahta yhtälöä voi käyttää muuntajien, tahtikoneiden ja kuristimien ominaisoikosulkutehojen määrittämiseen. /4/

$$S_k = \frac{U_n^2}{Z_k} \qquad S_k = \frac{S_n}{z_k} \approx \frac{S_n}{z_d}$$

joissa

$S_k$	ominaisoikosulkuteho
$U_n$	kyseessäolevan komponentin nimellisjännite
$Z_k$	komponentin oikosulkuimpedanssi ohmeina vaihetta kohti
$S_n$	komponentin nimellisteho
$z_k$	oikosulkuimpedanssin suhteellisarvo
$z_d$	tahtikoneen tahtireaktanssin suhteellisarvo

Epätahtikoneiden ominaisoikosulkuteho voidaan määrittää kaavalla /4/

$$S_k = S_n \times \frac{I_s}{I_n} \quad \text{missä}$$

$I_s$  moottorin käynnistysvirta

$I_n$  moottorin nimellisvirta

### 3.11 Sysäysoikosulkuvirran määrittäminen

Sysäysoikosulkuvirralla tarkoitetaan suurinta mahdollista oikosulkuvirran hetkellisarvoa, joka saavutetaan noin 10ms kuluttua oikosulun syntyhetkestä. Sysäysoikosulkuvirtaa käytetään laitteiden mekaanisen mitoituksen perusteena. Sysäysoikosulkuvirrasta käytetään usein myös nimitystä dynaaminen oikosulkuvirta. Sysäysoikosulkuvirta voidaan laskea seuraavalla yhtälöllä. /2/

$$i_s = \kappa \sqrt{2} I_k'' \quad \text{jossa}$$

$i_s$  sysäysoikosulkuvirta

$I_k''$  alkuoikosulkuvirta

$\kappa$  sysäyskerroin

$$\kappa = 1,02 + 0,98 e^{\frac{-3R}{X}}$$

### 3.12 Tulosten tarkastelu

#### 3.12.1 Päätaulu MS1:n laskelmat

Päätaulun käsin tehdyt laskelmat perustuvat Jurmon IEC 909 -standardin mukaisessa Calculation of short circuits currents -dokumentissa annettuihin generaattorin parametreihin. Liitteessä 1 on laskettu sama MS1-päätaulun pahimman tapauksen malli, joka on tuon dokumentin päätaululaskelma. Oikosulkutehomenetelmällä laskettu laskelma 1B tuotti kohtuullisen lähelle saman tuloksen kuin tarkemmalla Theveninin menetelmällä laskettu 1A. Tosin pelkästään ominaisoikosulkutehomenetelmää käytettäessä sysäyskerroin olisi pitänyt arvioida koska resistansseja ei lasketa.

Ilmeisesti laivan alkuperäislaskelmia tehtäessä ei ole vielä ollut saatavilla valmistajan ilmoittamia generaattorien parametreja, koska Jurmon dokumentin mukaan käytetyt arvot ovat laskennallisia. Laskennassa käytetyt parametrit on listattu dokumentissa. Tässä työssä lasketuissa päätaulun laskelmissa (Liite 1 1A ja -1B) tulokset poikkeavat suuresti alkuperäisestä DOC:llä lasketusta. Todennäköiseltä syytä suurelle erolle näyttää, että ABB:n DOC:lla laskettaessa on käytetty eri alkureaktanssin arvoa mitä dokumenttiin on kirjattu. Laskennan tuloksia tarkastellessa tuleekin huomioida, että erilaisista lähtöarvoista johtuen alkuperäistä laskua ei voinut toistaa ja uudet tulokset eivät siten ole alkuperäisen kanssa vertailukelpoisia.

DOC laskentatulokset. Päätaulu MS1:n pahimman tapauksen oikosulkuvirta.

Alkuoikosulkuvirta	72,1kA	Cosφ 0,12
Sysäysoikosulkuvirta	200,1kA	

LIITE 1 1A laskentatulokset.

Päätaulu MS1:n oikosulkuvirta Theveninin menetelmällä.

alkuoikosulkuvirta	171kA	Cosφ 0,16
Sysäysoikosulkuvirta	392kA	

LIITE 1 1B laskentatulokset.

Päätaulu MS1:n oikosulkuvirta ominaisoikosulkumenetelmällä.

alkuoikosulkuvirta	179kA
--------------------	-------

### 3.12.2 Hätätaulu ES1:n laskelmat

Hätätaulun ES1:n laskelmassa taas päästiin odotettuun tulokseen, joka on vain hieman ABB:n DOC:lla laskettua suurempi (LIITE 1 2A). 2A:ssa on laskettu alkuperäisellä arvioidulla alkureaktanssin arvolla. LIITE 1 2B:n tapauksessa on haettu todennäköisempää tilannetta, jossa UPS1:n syöttömuuntaja on kytketty ja generaattorin alkureaktanssi on valmistajan ilmoittama. Moottorikuormalle on lisätty arvioitu kaapelointi alas konehuoneeseen. Muutosten seurauksena oikosulkuvirratt yli kaksinkertaistuivat tapaukseen A nähden. Lisäys johtuu pääasiassa muuntajan syöttämästä oikosulkuvirrasta jota ei ole A-tapauksessa kytketty.

DOC laskentatulokset. Häätätaulu ES1:n oikosulkuvirta EG-syötöllä.

Alkuoikosulkuvirta	2,9kA	Cosφ 0,15
Sysäysoikosulkuvirta	6,8kA	

LIITE 1 1.2A:n laskentatulokset.

Häätätaulu ES1:n oikosulkuvirta EG-syötöllä Thevenin menetelmällä ilman UPS1:n syöttömuuntajaa.

alkuoikosulkuvirta	3,4kA	Cosφ 0,16
Sysäysoikosulkuvirta	7,8kA	

LIITE 1.2B:n laskentatulokset.

Häätätaulu ES1:n oikosulkuvirta EG-syötöllä Thevenin menetelmällä (todennukaisempi tilanne)

alkuoikosulkuvirta	7,95kA	Cosφ 0,23
Sysäysoikosulkuvirta	16,8kA	

### 3.12.3 Moottorinohjauskeskus MCC1:n laskelmat

MCC1:n tuloksista käy havainnollisesti ilmi vikapaikan vaikutus oikosulkuvirtaan, jota käsiteltiin kappaleessa 3.2. Kaapelointi päätaulu MS1:ltä MCC1:lle on 17 metriä 3x(3x70mm<sup>2</sup>) kaapelia. Verrattuna oikosulkuun päätaulussa kaapelien päässä MCC1:llä tapahtuvassa oikosulussa alkuoikosulkuvirta on vain 11 kA pienempi, mutta sysäysoikosulkuvirta on 86 kA pienempi, koska sysäyskerroin muuttuu kaapeliresistanssin muuttaessa resistanssin ja reaktanssin suhdetta. Tilanne on samankaltainen kaikissa muissakin alikeskuksissa.

DOC laskentatulokset. MCC1 oikosulkuvirrät.

Alkuoikosulkuvirta	61,1kA	Cosφ 0,34
Sysäysoikosulkuvirta	113,5kA	

#### *4LOPPUSANAT*

Päällimmäisenä mieleen jäi kirjoitusprosessin aikana opittujen asioiden suuri määrä. Laivan sähköjärjestelmästä ja -dokumenteista piti tutkia monia asioita, joihin ei normaalin huolto-, kunnossapito- ja viankorjaustöiden yhteydessä juurikaan tarvitse paneutua. Oikosulkuvirtoja ja niiden laskemista taas on pitänyt pohtia ja tutkia huomattavasti syvällisemmin verrattuna koulun kurssien läpäisemisessä vaadittuun. Projektin eteneminen sujui monelle varmasti tutulla tavalla, missä ensin oli vaikeuksia päästä alkuun ja takarajan lähestyessä tehdään hommia yötäpäivää huonoilla yönillä. Hankaluuksia aiheuttivat loppumetreillä päätaulun laskennasta tulleet odottamattomat tulokset, jotka mutkistivat tilannetta estäen suunniteltuja vertailuja ja muuttaen siten hieman tämän raportin rakennetta suunnitellusta. Haluan vielä kiittää Petteri Pulkista tämän opinnäytetyön ja myöskin koko muuntokoulutuksen läpi luotsaamisesta.

## LÄHTEET

- /1/ Rules for classification of ships - part 4 chapter 8 Electrical installations. Det Norske Veritas. Tammikuu 2003 versio. Hakupäivä 16.10.2014 <http://exchange.dnv.com/publishing/downloadPDF.asp?url=http://exchange.dnv.com/publishing/rulesship/2003-01/ts408.pdf>
- /2/ Kari Huotari & Jarmo Partanen. 1998. Teollisuusverkkojen oikosulkuvirtojen laskeminen. Opetusmoniste 3. Lappeenrannan teknillinen korkeakoulu, Lappeenranta
- /3/ B. de Metz-Noblat, F Dumas, C Poulain, 2005. Cahier technique no. 158. Calculations of short-circuit currents. Schneider Electric. Hakupäivä 24.10.2014. <http://www2.schneiderelectric.com/documents/technical-publications/en/shared/electrical-engineering/electrical-know-how/low-voltage-minus-1kv/ect158.pdf>.
- /4/ Petri Salminen. 2009. Teollisuussähköverkon mallintaminen ja vikavirtatarkastelut. Diplomityö. Tampereen teknillinen yliopisto, Tampere
- /5/ Selectivity analysis : m/s Jurmo Final Drawing E25021-90330. Delta marine, 2001
- /6/ Power generation and distribution system one line diagram : m/s Jurmo Final Drawing E25021-90310. Delta marine, 2001
- /7/ Aleksi Törhönen. 2011. opinnäytetyö. Energiansäästömanuaalin suunnittelu Purha-luokan aluksiin. Kymenlaakson ammattikorkeakoulu, Kotka

## OIKOSULKUVIRTALASKELMAT

1A. PÄÄTAULUN OIKOSULKUVIRTALASKELMA  
THEVENININ MENETELMÄLLÄ

Pahimman tilanteen malli jossa oikosulku tapahtuu 440V päätaulussa pahimmassa mahdollisessa paikassa. 3 Dieselgeneraattoria syöttää verkkoa. Päätaulun välikatkaisimet ovat kiinni ja akseligenaattori toimii sähkömoottorina PTI (Power take In) -moodissa. Akseligenaattorin moottoriteho 1500 kW. Muuta moottorikuormaa 480 kW. Moottorikuorma on sijoitettuna ekvivalenttisen 17 metrin 6x(3x70mm<sup>2</sup>) kaapeloinnin päähän mikä vastaa mitoitukseltaan MCC1 + MCC2 nousujohtoja. Kiskostoja ja katkaisijoita ei ole otettu huomioon.

Tapaus vastaisi seuraavaa tilannetta: Pääkoneen vikaantumisen takia ajetaan PTI-moodissa. Päätaulussa normaalia isompi moottorikuorma koska inertkaasulaitos on käynnissä lastitankkien happipitoisuuden laskemiseksi ja palopumppuja testataan samaan aikaan.

Oikosulkupiirin komponenttien reaktanssit ja resistanssit:

Akseligenaattori kaapeleineen.

$$U_n = 440V$$

$$S_n = 1875kVA$$

$$X_{sg}'' = 5,6\%$$

Kaapelointi 13x(3x120mm<sup>2</sup>)XLPE 25metriä

$$R_{kaap.} = 0,170m\Omega/m$$

$$X_{kaap.} = 0,0657m\Omega/m$$

$$X_{SG+K} = \frac{5,6}{100} \times \frac{(440V)^2}{1875kVA} + \frac{25 \times 0,0657}{13} = 5,78 m\Omega + 0,13 m\Omega = 5,91 m\Omega$$

$$R_{SG+K} = 0,1 \times X_{SG} + \frac{25 \times 0,170}{13} = 0,58 m\Omega + 0,33 m\Omega = 0,91 m\Omega$$

Dieselgeneraattori kaapeleineen.

$$U_n = 440V$$

$$S_n = 1200kVA$$



$$X_{sg}'' = 5,6\%$$

Kaapelointi 10x(3x95mm<sup>2</sup>) 11metriä

$$R_{kaap.} = 0,213m\Omega/m$$

$$X_{kaap.} = 0,0668m\Omega/m$$

$$X_{DG+K} = \frac{5,6}{100} \times \frac{(440V)^2}{1200kVA} + \frac{11 \times 0,0668}{10} = 9,03 m\Omega + 0,07 m\Omega = 9,10 m\Omega$$

$$R_{DG+K} = 0,1 \times X_{DG} + \frac{11 \times 0,213}{10} = 0,90 m\Omega + 0,23 m\Omega = 1,13 m\Omega$$

Epätahtimoottorit kaapeleilla.

Moottorit 480kW, käynnistysvirta kuusinkertainen.

Kaapelit 6x(3x70mm<sup>2</sup>)XLPE 17metriä

$$R_{kaap.} = 0,295m\Omega/m$$

$$X_{kaap.} = 0,0683m\Omega/m$$

$$Z_{Mo} = \frac{1}{6} \times \frac{(440V)^2}{(480/0,85)kVA} = 57,21 m\Omega$$

Taulukko 1 mukaan  $\rightarrow X_m = 0,922 Z_m = 52,75m\Omega$

$\rightarrow R_m = 0,42 X_m = 22,15m\Omega$

$$X_{Mo+K} = X_M + \frac{17 \times 0,0683}{6} = 52,75 m\Omega + 0,19 m\Omega = 52,94 m\Omega$$

$$R_{Mo+K} = R_M + \frac{17 \times 0,295}{6} = 22,15 m\Omega + 0,84 m\Omega = 22,99 m\Omega$$

Muuntaja kaapeleineen

$$S_n = 300kVA$$

$$U_{n1} = 440V$$

$$u_k = 2,6\%$$

$$u_r = 1,1\%$$

Kaapelit 3x(3x70mm<sup>2</sup>)XLPE 13metriä

$$R_{kaap.} = 0,295m\Omega/m$$

$$X_{kaap.} = 0,0683m\Omega/m$$

$$Z_{Mu} = \frac{2,6}{100} \times \frac{440V^2}{300kVA} = 16,78 m\Omega \quad R_{mu} = \frac{1,1}{100} \times \frac{440V^2}{300kVA} = 7,10 m\Omega$$

$$R_{(Mu+K)} = R_{Mu} + \frac{17 \times 0,295 m\Omega}{6} = 7,10 m\Omega + 0,84 m\Omega = 7,94 m\Omega$$

$$X_{Mu+K} = \sqrt{16,78 m\Omega^2 - 7,1 m\Omega^2} + \frac{17 \times 0,0683}{6} = 15,20 m\Omega + 0,19 m\Omega = 15,39 m\Omega$$

Theveninin impedanssi

$$\begin{aligned} \frac{1}{Z_T} &= \frac{1}{Z_{SG+K}} + \frac{1}{Z_{DG1+K}} + \frac{1}{Z_{DG2+K}} + \frac{1}{Z_{DG3+K}} + \frac{1}{Z_{Mo+K}} + \frac{1}{Z_{Mu1}} + \frac{1}{Z_{Mu2}} \\ &= \frac{1}{0,91 + j5,91 m\Omega} + \frac{1}{1,13 + j9,10 m\Omega} + \frac{1}{1,13 + j9,10 m\Omega} + \frac{1}{1,13 + j9,10 m\Omega} \\ &+ \frac{1}{22,99 + j52,94 m\Omega} + \frac{1}{7,94 + j15,39 m\Omega} + \frac{1}{7,94 + j15,39 m\Omega} = \frac{1}{4,05 + j0,65 m\Omega} \end{aligned}$$

$$\rightarrow Z_t = 0,25 + j1,54 m\Omega = 1,56 m\Omega$$

Alkuoikosulkuvirta

$$I_k'' = \frac{1,05 \times 440V}{\sqrt{3} \times 1,56 m\Omega} = 170,985 kA$$

Sysäyskerroin.

$$\kappa = 1,02 + 0,98 e^{\frac{-3R}{X}}$$

$$R/X = 0,25/1,54 = 0,16 \rightarrow \kappa = 1,622$$

$$\text{Sysäysoikosulkuvirta } i_s = \kappa \sqrt{2} I_k'' = 1,622 \sqrt{2} \times 170,985 kA = 392,215 kA$$

1B. PÄÄTAULUN OIKOSULKUVIRTALASKELMA  
OMINAISOIKOSULKUVIRTA MENETELMÄLLÄ

Laskettu Liitteessä 1A

$$\begin{aligned} X_{DG} &= 9,0 \text{ m}\Omega & X_{SG} &= 5,8 \text{ m}\Omega & Z_{Mu} &= 16,8 \text{ m}\Omega \\ R_{DG} &= 0,9 \text{ m}\Omega & R_{SG} &= 0,6 \text{ m}\Omega \end{aligned}$$

Akseligenaattorin oikosulkuimpedanssi.

$$Z_{SG} = \sqrt{(0,6 \text{ m}\Omega)^2 + (5,8 \text{ m}\Omega)^2} = 5,8 \text{ m}\Omega$$

Dieselgeneraattorin oikosulkuimpedanssi.

$$Z_{DG} = \sqrt{(0,9 \text{ m}\Omega)^2 + (9,0 \text{ m}\Omega)^2} = 9,0 \text{ m}\Omega$$

Akseligenaattorin oikosulkuteho.

$$S_{k-SG} = \frac{(440\text{V})^2}{5,8 \text{ m}\Omega} = 33,4 \text{ kVA}$$

Dieselgeneraattorin oikosulkuteho.

$$S_{k-DG} = \frac{(440\text{V})^2}{9,0 \text{ m}\Omega} = 21,5 \text{ kVA}$$

Muuntajan oikosulkuteho

$$S_{Mu} = \frac{(440\text{V})^2}{16,8 \text{ m}\Omega} = 11,5 \text{ kVA}$$

Moottorien oikosulkuteho.

$$S_{k-Mo} = 480 \text{ kVA} / 0,85 \times \frac{6}{1} = 3,4 \text{ kVA}$$

Oikosulkuteho.

$$\begin{aligned} S_k &= S_{k-SG} + S_{k-DG1} + S_{k-DG2} + S_{k-DG3} + S_{k-Mo} + S_{k-Mu1} + S_{k-Mu2} \\ &= 33,4 \text{ kVA} + 21,5 \text{ kVA} + 21,5 \text{ kVA} + 21,5 \text{ kVA} + 3,4 \text{ kVA} + 11,5 \text{ kVA} + 11,5 \text{ kVA} \\ &= 124,3 \text{ kVA} \end{aligned}$$

Alkuoikosulkuvirta.

$$I_k = \frac{1,1 \times S_k}{\sqrt{3} \times U_n} = \frac{1,1 \times 124,3 \text{ kVA}}{\sqrt{3} \times 440 \text{ V}} = 179 \text{ kA}$$

2A. HÄTÄTAULU ES1 OIKOSULKUVIRTALASKELMA EG-SYÖTÖLLÄ  
THEVENININ MENETELMÄLLÄ ILMAN UPS-MUUNTAJAA

Vikapaikka on hätätaulu ES1:ssä jota syöttää hätägeneraattori. Moottorikuorma on 150kW.

Komponenttien reaktanssit ja resistanssit:

Alkuperäisillä arvioiduilla generaattorin arvoilla.

Hätägeneraattori kaapeleineen.

$$U_n = 440V$$

$$S_n = 245kVA$$

$$X_{sg''} = 18\%$$

Kaapelointi 3x(3x50mm<sup>2</sup>) 7metriä

$$R_{kaap.} = 0,426m\Omega/m$$

$$X_{kaap.} = 0,0692m\Omega/m$$

$$X_{EG+K} = \frac{18}{100} \times \frac{(440V)^2}{245kVA} + \frac{7 \times 0,0692}{3} = 142,24 m\Omega + 0,16 m\Omega = 142,40 m\Omega$$

$$R_{EG+K} = 0,1 \times X_{DG} + \frac{7 \times 0,426}{3} = 14,22 m\Omega + 0,99 m\Omega = 15,21 m\Omega$$

Moottorikuorma 150kW, käynnistysvirta kuusinkertainen.

$$Z_{Mo} = \frac{1}{6} \times \frac{(440V)^2}{(150/0,85)kVA} = 182,84 m\Omega$$

Taulukko 1 mukaan  $\rightarrow X_m = 0,922 Z_m = 168,58m\Omega$

$$\rightarrow R_m = 0,42 X_m = 70,80m\Omega$$

Theveninin impedanssi

$$\frac{1}{Z_T} = \frac{1}{Z_{EG+K}} + \frac{1}{Z_{Mo}} = \frac{1}{15,21 + j142,40 m\Omega} + \frac{1}{70,80 + j168,58 m\Omega} = \frac{1}{0,7 + j0,1 m\Omega}$$

$$\rightarrow Z_t = 12,52 + j77,19 \text{ m}\Omega = 78,20 \text{ m}\Omega$$

$$\cos\varphi = R / Z = 12,52 / 78,20 = 0,16$$

Alkuoikosulkuvirta

$$I_k'' = \frac{1,05 \times 440 \text{ V}}{\sqrt{3} \times 78,2 \text{ m}\Omega} = 3,4 \text{ kA}$$

Sysäyskerroin.

$$R/X = 12,52/77,19 = 0,16$$

$$\kappa = 1,02 + 0,98 e^{\frac{-3R}{X}}$$

$$\rightarrow \kappa = 1,62$$

$$\text{Sysäysoikosulkuvirta } i_s = \kappa \sqrt{2} I_k'' = 1,62 \sqrt{2} \times 3,4 \text{ kA} = 7,8 \text{ kA}$$

## 2B HÄTÄTAULU ES1 OIKOSULKUVIRTALASKELMA EG-SYÖTÖLLÄ THEVENININ MENETELMÄLLÄ (Todellisempi tilanne)

Vikapaikka on hätätaulu ES1:ssä jota syöttää hätägeneraattori. ES1 syöttää 50kVA muuntajaa joka syöttää UPS1:stä Moottorikuorma on 150kW. Ekvivalenttimoottori on sijoitettu (karkeasti) arvioidun 50 metrin kaapeloinnin päähän. Kiskostoja ja katkaisijoita ei ole otettu huomioon.

Komponenttien reaktanssit ja resistanssit:

Hätägeneraattori kaapeleineen. Generaattorin arvot valmistajan ilmoittamat.

$$U_n = 440 \text{ V}$$

$$S_n = 256 \text{ kVA}$$

$$X_d'' = 0,1 \Omega$$

Kaapelointi 3x(3x50mm<sup>2</sup>) 7metriä

$$R_{\text{kaap.}} = 0,426 \text{ m}\Omega/\text{m}\Omega$$

$$X_{\text{kaap.}} = 0,0692 \text{ m}\Omega/\text{m}$$

$$X_{EG+K} = 100,0 \text{ m}\Omega + \frac{7 \times 0,0692}{3} = 100,0 \text{ m}\Omega + 0,16 \text{ m}\Omega = 100,16 \text{ m}\Omega$$

$$R_{EG+K} = 0,1 \times X_{DG} + \frac{7 \times 0,426}{3} = 10,0 \text{ m}\Omega + 0,99 \text{ m}\Omega = 10,99 \text{ m}\Omega$$

UPS1 syöttömuuntaja + kaapelit

$$S_n = 50 \text{ kVA}$$

$$U_{n1} = 440 \text{ V}$$

$$u_k = 2,0\%$$

$$u_r = 1,0\%$$

Kaapelointi 3x50mm<sup>2</sup> 7metriä

$$R_{kaap.} = 0,426 \text{ m}\Omega/\text{m}$$

$$X_{kaap.} = 0,0692 \text{ m}\Omega/\text{m}$$

$$Z_{Mu} = \frac{2,0}{100} \times \frac{440 \text{ V}^2}{50 \text{ kVA}} = 77,44 \text{ m}\Omega \quad R_{mu} = \frac{1,0}{100} \times \frac{440 \text{ V}^2}{50 \text{ kVA}} = 38,72 \text{ m}\Omega$$

$$R_{(Mu+k)} = 38,72 \text{ m}\Omega + 7 \times 0,426 \text{ m}\Omega = 41,7 \text{ m}\Omega$$

$$X_{Mu+K} = \sqrt{77,44 \text{ m}\Omega^2 - 38,72 \text{ m}\Omega^2} + 7 \times 0,0683 = 67,07 \text{ m}\Omega + 0,48 \text{ m}\Omega = 67,55 \text{ m}\Omega$$

Epätahtimoottorit kaapeleilla.

Moottorikuorma 150kW, käynnistysvirta kuusinkertainen.

Kuvitteelliset kaapelit 2x(3x50mm<sup>2</sup>)XLPE 50metriä

$$R_{kaap.} = 0,426 \text{ m}\Omega/\text{m}$$

$$X_{kaap.} = 0,0692 \text{ m}\Omega/\text{m}$$

$$Z_{Mo} = \frac{1}{6} \times \frac{(440 \text{ V})^2}{(150/0,85) \text{ kVA}} = 182,84 \text{ m}\Omega$$

Taulukko 1 mukaan  $\rightarrow X_m = 0,922 \quad Z_m = 168,58 \text{ m}\Omega$

$$\rightarrow R_m = 0,42 \quad X_m = 70,80 \text{ m}\Omega$$

$$X_{Mo+K} = X_M + \frac{50 \times 0,0692}{2} = 168,58 \text{ m}\Omega + 1,73 \text{ m}\Omega = 170,31 \text{ m}\Omega$$

$$R_{Mo+k} = R_M + \frac{50 \times 0,426}{2} = 70,80 \text{ m}\Omega + 10,65 \text{ m}\Omega = 81,45 \text{ m}\Omega$$

Theveninin impedanssi

$$\begin{aligned} \frac{1}{Z_T} &= \frac{1}{Z_{EG+K}} + \frac{1}{Z_{Mu+k}} + \frac{1}{Z_{(Mo+k)}} = \frac{1}{10,99 + j100,16 \text{ m}\Omega} + \frac{1}{41,7 + j67,55 \text{ m}\Omega} \\ &+ \frac{1}{81,45 + j170,31 \text{ m}\Omega} = \frac{1}{0,13 + j0,03 \text{ m}\Omega} \end{aligned}$$

$$\rightarrow Z_t = 7,86 + j32,62 \text{ m}\Omega = 33,55 \text{ m}\Omega$$

Alkuoikosulkuvirta

$$I_k'' = \frac{1,05 \times 440 \text{ V}}{\sqrt{3} \times 33,55 \text{ m}\Omega} = 7,95 \text{ kA}$$

$$\cos \varphi = R / Z = 7,86 / 33,55 = 0,23$$

Sysäyskerroin.

$$R/X = 7,86/32,62 = 0,24$$

$$\kappa = 1,02 + 0,98 e^{\frac{-3R}{X}}$$

$$\rightarrow \kappa = 1,496$$

$$\text{Sysäisoikosulkuvirta } i_s = \kappa \sqrt{2} I_k'' = 1,496 \sqrt{2} \times 16,35 \text{ kA} = 16,8 \text{ kA}$$