

Elina Väre

XAMK:N VOIMALAITOSSIMULAATTORI

Generaattorikaapeleiden mitoittaminen

Opinnäytetyö

Merenkulun ammattikorkeakoulutkinto
Insinööri AMK

2023



**Kaakkois-Suomen
ammattikorkeakoulu**



South-Eastern Finland
University of Applied Sciences

Tutkintonimike	Merenkulun koulutus, insinööri (AMK)
Tekijä	Elina Väre
Työn nimi	XAMK:n voimalaitossimulaattori. Generaattorikaapeleiden mitoittaminen.
Toimeksiantaja	Kaakkois-Suomen ammattikorkeakoulu
Vuosi	2023
Sivut	27 sivua, joista liitteitä 2 sivua
Työn ohjaaja(t)	Kalle Suoniemi

TIIVISTELMÄ

Tämän opinnäytetyön tavoitteena on mitoittaa oikeat kaapelit Kaakkois-Suomen ammattikorkeakoulun hankkimiin generaattoreihin. Kaapelit sijaitsevat kummankin generaattorin ja päätaulun välillä, mutta myös päätaulun ja koulun sähkökeskuksen välillä. Syöttökaapeli mahdollistaa generaattoreilla tuotetun tehon käytön sekä koulun sähköverkossa että valtakunnan verkossa.

Tämä opinnäytetyö pureutuu oikeiden sähkökaapeleiden valintaan. Laskelmat kaavoineen on esitetty ja periaatteet niiden taustalla on selvitetty. Valitut kaapelit on esitetty ominaisuuksineen. Sähköasennuksia koskevat vaatimukset ovat esitetty omassa luvussaan.

Opinnäytetyö kuuluu projektiin, jossa Kotkan kampuksen sähkölaboratorioon rakennettiin voimalaitossimulaattori.

Asiasanat: kaapeli, mitoittaminen, laskeminen

Degree	Bachelor of Engineering
Author (authors)	Elina Väre
Thesis title	XAMK -power plant simulator, sizing of generator cables
Commissioned by	South-Eastern Finland University of Applied Sciences
Time	2023
Pages	27 pages, 2 pages of appendices
Supervisor	Kalle Suoniemi

ABSTRACT

The purpose of this thesis was to size the right cables on generators purchased by South-Eastern Finland University of Applied Sciences. The cables are located between each of two generator sets and a main switch board. There is also a feed cable located between main switch board and school's main distribution center. The feed cable allows utilization of power produced by generators to be consumed in school's electrical system or to be fed in national electrical network.

Therefore, this thesis focuses on calculation of correct cable sizes. The calculations with their formulas are performed and principles underlying them are also explained. The chosen cables are described with their features. The requirements for electrical installations are outlined in a separate chapter.

The thesis was part of a project where a power plant simulator was built in the electrical laboratory of the Kotka campus.

Keywords: cable, sizing, calculation

SISÄLLYS

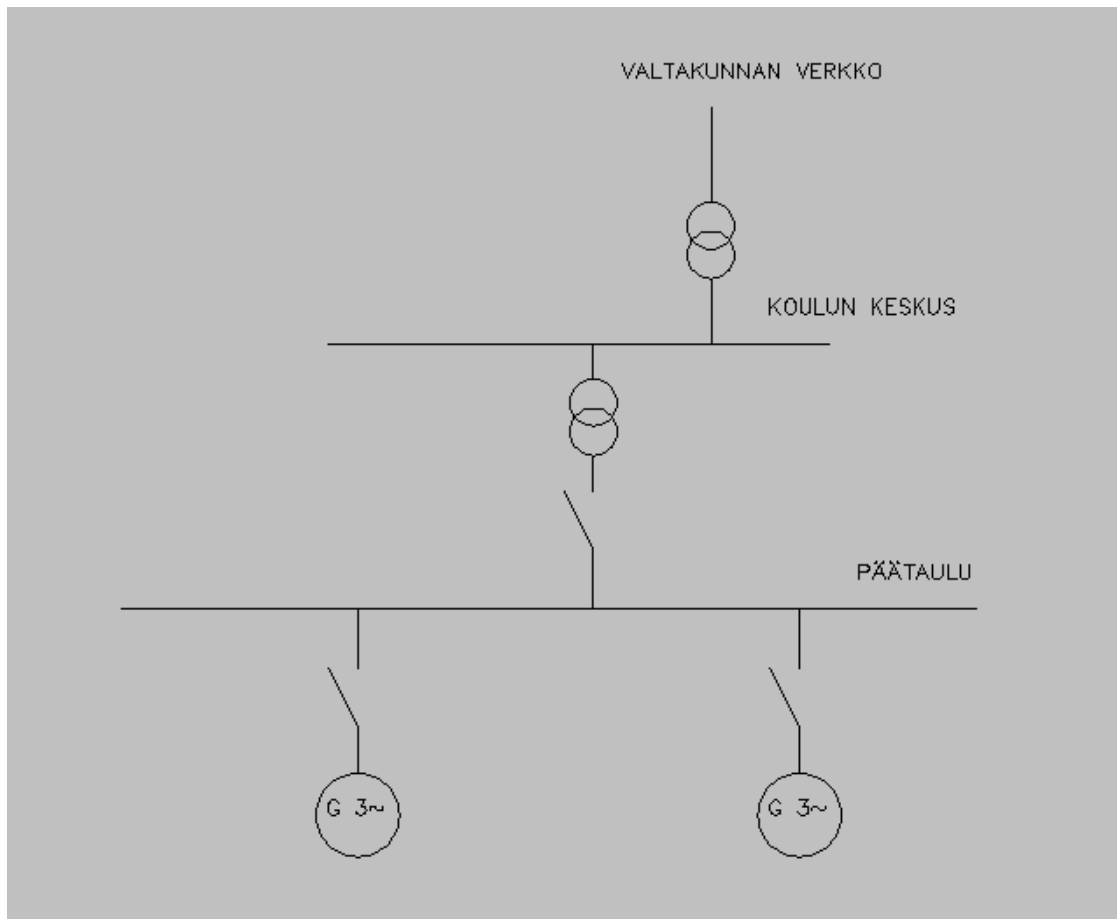
1	JOHDANTO.....	5
2	SÄHKÖVERKON VAATIMUKSET VOIMALAITOKSILLE.....	8
2.1	Pohjoismainen yhteiskäyttöverkko.....	8
2.2	Sähköjärjestelmän stabiilius	10
2.2.1	Kulmastabiilius.....	10
2.2.2	Taajuusstabiilius ja inertia.....	10
2.2.3	Jännitestabiilius	12
3	VAATIMUKSET SÄHKÖKAAPELEILLE	12
3.1	Luokituslaitos DNV:n vaatimukset kaapeleille	12
3.1.1	Kaapeleiden rakennetta koskevat vaatimukset.....	13
3.2	Kaapelityyppi	14
3.3	Kaapelien kuvaus	16
3.4	Kaapelien mitoitus	17
3.5	Jännitteen alenema	19
3.6	Oikosulkuvirta ja -suojaus.....	21
3.6.1	Maksimi oikosulkuvirran laskeminen kolmivaiheisena	21
3.6.2	Minimi oikosulkuvirran laskeminen yksivaiheisena:	22
3.6.3	Sallitun rajalämpötilan saavuttamiseen menevän ajan laskeminen:	22
3.7	Ylikuormitussuojaus.....	24
3.8	EMC-direktiivi.....	24
4	POHDINTA.....	25
	LÄHTEET.....	26
	KUVALUETTELO	

1 JOHDANTO

Kaakkois-Suomen ammattikorkeakouluun hankittiin kaksi generaattoria, joiden voimanlähteenä toimivat IVECO GP110 -dieselmoottorit. Generaattorit ovat kolmivaiheisia vierasmagnetoituja tahtigeneraattoreita, jotka tuottavat 100 kVA:n näennäistehon 400 voltin jännitteellä. Kuvassa generaattorit asennettuna koulun pihalle kaapeleineen.



Kuva 1. XAMKin generaattorit koulun pihalla (Väre 2023)



Kuva 2. Yksinkertaistettu single line.

Tässä opinnäytetyössä mitoitetaan oikeankokoiset ja -tyyppiset kaapelit generaattorin ja päätaulun välille, sekä päätaulun ja koulun keskuksen välille. Generaattoreilla voidaan tuottaa sähköä joko pelkästään koulun verkkoon, taikka myös syöttää tehoa valtakunnalliseen sähköverkkoon. Seuraavassa kuvassa päätaulu on asennettuna koulun sähkölaboratorioon.



Kuva 3. Koulun päätaulu (Väre 2023)

Tässä opinnäytetyössä käydään lyhyesti läpi Suomen valtakunnanverkon rakennetta sekä niiden voimalaitosten vaatimuksia, joita saa kytkeä valtakunnan verkkoon.

Opinnäytetyössä käydään läpi kaapelin mitoitukseen käytettäviä laskentamenetelmiä, esimerkiksi jännitteenalenemaa näille kyseisille kaapeleille, sekä oikosulkuvirran suuruutta.

Samalla tutkitaan myös eroja maapuolen standardeihin ja Det Norske Veritas -luokituslaitoksen vaatimuksiin. Käydään myös lävitse yleisiä asennustapoja kaapeleiden asennuksiin yleisellä tasolla.

2 SÄHKÖVERKON VAATIMUKSET VOIMALAITOKSILLE

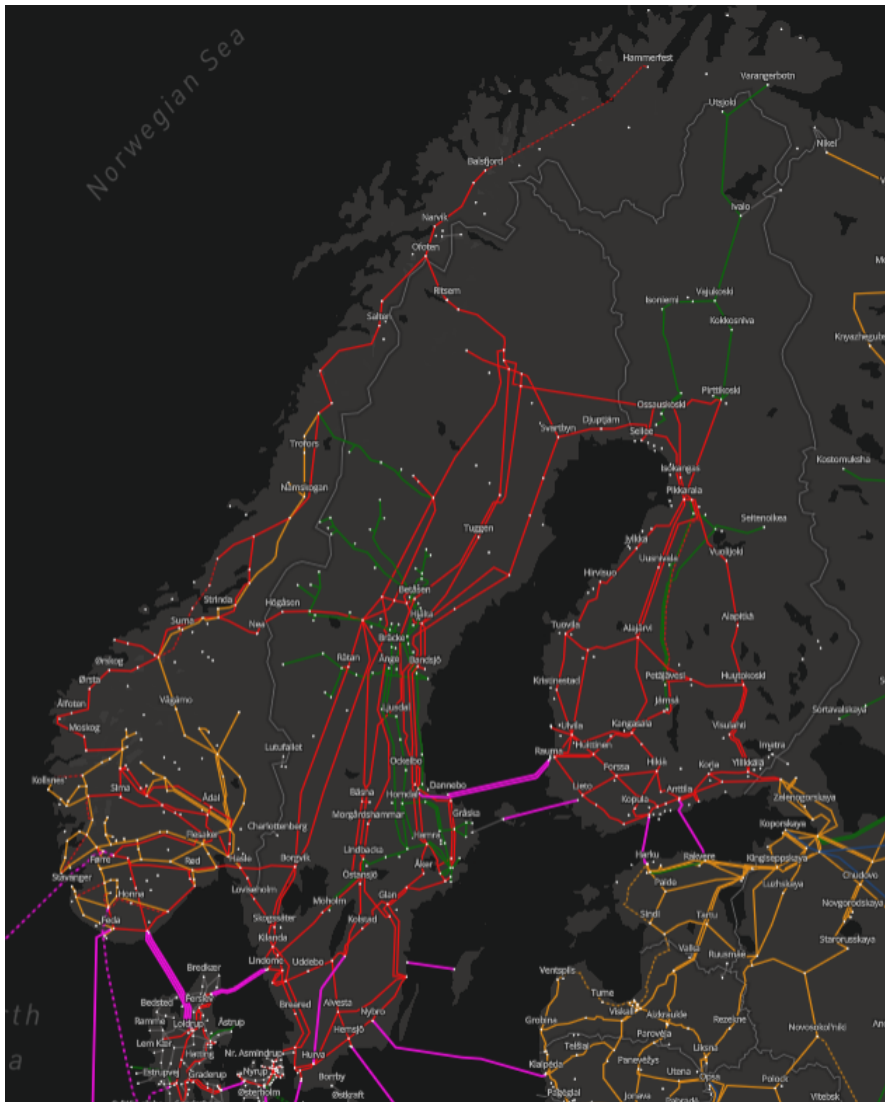
Fingrid Oyj on Suomen kantaverkon järjestelmävastaava. Sen tehtävänä on huolehtia verkon käyttövarmuudesta ja teknisen toimivuuden ylläpidosta. Fingrid on laatinut verkkoon liityntäsäännöt voimalaitoksille. *Voimalaitosten järjestelmäteknisissä vaatimuksissa* edellytetään, että voimalaitos kestää jännite- ja taajuusvaihteluita, eikä aiheuta haittaa muille verkossa kytkettyinä oleville laitteille. Voimalaitoksen on tuettava sähköjärjestelmän toimintaa ja oltava luotettava toiminen niin häiriötilanteiden yhteydessä kuin niiden jälkeenkin. Voimalaitoksesta tarvittavat tiedot, jotka vaikuttavat sähköjärjestelmään, sen käytön suunnitteluun ja käyttövarmuuteen, on toimitettava liittymispisteen verkonhaltijalle ja Fingridille. (Kauppinen ym. 2020, 202.)

2.1 Pohjoismainen yhteiskäyttöverkko

Voimalaitokset, sähkön kuluttajat ja sähköverkot muodostavat Suomen sähköjärjestelmän, jonka tarkoituksena on siirtää tuotettu sähkö kuluttajille. Verkot voidaan jakaa jakeluverkkoihin, suurjännitteisiin jakeluverkkoihin sekä kantaverkkoon, jossa käytetyt johtimien jännitteet ovat 400 kV, 220 kV ja 110 kV. (Kauppinen ym. 2020, 201.)

Sähköjärjestelmän nimellistaajuus 50 Hz vaatii, että sähkön tuotanto ja kulutus pysyvät tasapainossa jokaisena hetkenä. Tämä edellyttää yhteisverkossa verkkoon liitettyinä olevien tahtigeneraattorien käymistä samalla tahtinopeudella niiden sähköisten kulmanopeuksien vastatessa sähköjärjestelmän taajuutta tasapainotilassa. (Kauppinen ym. 2020, 201.)

Suomessa on yhteinen verkko, johon kaikki voimalaitokset ja kuluttajat on kytketty. Sen etuna voidaan pitää voimansiirron hyvää hyötysuhdetta, jossa häviöt sekä siirrossa että jakelussa pysyvät pieninä. Pitkistä siirtoetäisyyksistä huolimatta tuotanto voidaan toteuttaa taloudellisesta näkökulmasta järkevästi samalla käyttövarmuuden parantuessa. (Elovaara & Haarla 2011, 54.)



Kuva 4. Pohjoismainen yhteiskäyttöverkko (ENTSO-E 2020)

Vuonna 1959 Suomen sähköverkko yhdistettiin Nordel-verkoksi kutsuttuun pohjoismaiseen yhteiskäyttöverkkoon (kuva 1) Petäjäskoski–Kalix-johdon avulla. Pohjoismainen yhteiskäyttöverkko muodostaa oman saarekkeensa, joka toimii synkronisesti samalla 50 Hz:n taajuudella. Saarekkeen ulkopuolisiin verkkoihin se on yhteydessä asynkronisesti tasasähköyhteyksillä; vaihtosähköyhteyttä ei niihin ole. (Elovaara & Haarla 2011, 62.)

Nordel antoi suosituksia mm. yhteisistä verkon mitoitussäännöistä, tilapäis-kauppojen hinnoitteluperusteista, lämpövoimalaitosten käyttöteknisistä ominaisuuksista sekä reservitehon, tehon ja taajuuden säädöstä (Elovaara & Laiho 2001, 33).

Nordel lakkautettiin vuonna 2009. Sen tehtävät siirtyivät ENTSO-E:lle (European Network of Transmission System Operators of Electricity). ENTSO-E:n

jäsenyritykset ovat 34 eri maasta ja se muodostaa EU:n järjestelmävastaavien kantaverkkoyhtiöiden yhdistyksen. (Fingrid 2009.)

2.2 Sähköjärjestelmän stabiilius

Sähkömarkkinoiden toiminta ja sähkönsiirto edellyttävät, että sähköjärjestelmän toiminta pysyy stabiilina. Suomen sähköjärjestelmässä käytetään N-1 -mitoituskriteeriä, jonka mukaan sähköjärjestelmän on kyettävä kestämään häiriö jokaisena hetkenä ilman, että vian vaikutusalue kasvaa tai syntyy suurhäiriö. Vian ilmenemisen jälkeen sähköjärjestelmän on palautettava takaisin tasapainotilaan järjestelmän säilyessä ehjänä ja useimpien muuttujien pysyessä annettujen rajojen sisällä. Sekä taajuus että jännite palaavat normaalille toiminta-alueilleen ja generaattorit säilyttävät tahtikäyttönsä. Kulmastabiilius, taajuusstabiilius ja jännitestabiilius muodostavat sähköjärjestelmästäabiiliuden kolme päähaaraa. (Kauppinen ym. 2020, 202.)

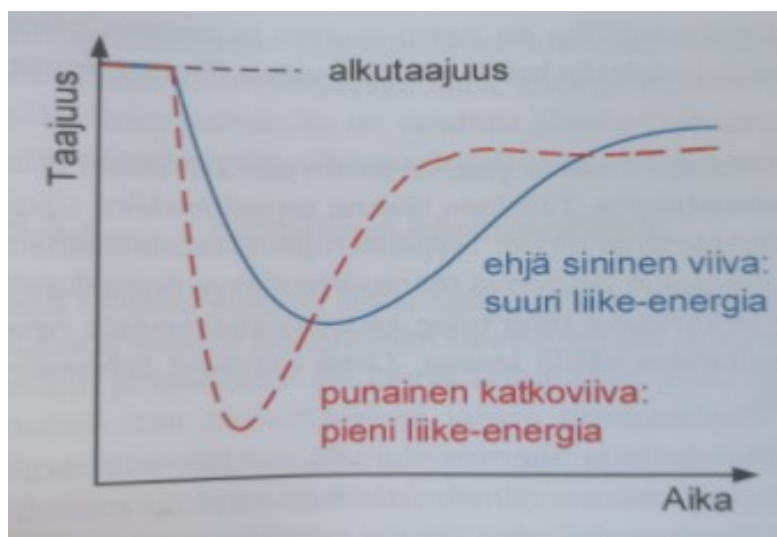
2.2.1 Kulmastabiilius

Kulmastabiilius kuvaa, kuinka tahtigeneraattorit pystyvät säilyttämään tahtikäyttönsä erilaisten häiriöiden jälkeen. Sähköasemien välisellä kulmaerolla siirretään pätötehoa, sillä siirtoverkon kaapeleissa reaktanssit ovat resistansseja suuremmat. Kulmaero suhteessa verkkoon säilyy vakiona tahtigeneraattorin pyöriessä tahtinopeudella, ja teho siirtyy suuremmasta kulmasta pienempään siirtoverkossa. Teoreettinen siirrettävä maksimiteho, jota ei voi ylittää, on kulmaerolla 90° . (Kauppinen ym. 2020, 203.)

2.2.2 Taajuusstabiilius ja inertia

Taajuusstabiilius kuvaa, kuinka hyvin sähköjärjestelmä pystyy palauttamaan taajuuden takaisin vakaaksi ilman liian suuria heilahduksia taajuudessa. Heilahdukset aiheutuvat epätasapainosta sähköntuotannon ja kulutuksen välillä johtuen äkillisestä muutoksesta joko kuormituksessa tai tuotannossa. (Kauppinen ym. 2020, 205.)

Tahtigeneraattorit pyörivät joko nimellisnopeutta tai hyvin lähellä sitä, ja tuottavat järjestelmän taajuuden 50 Hz. Jos sähköntuotanto äkillisesti laskee kulu-
tukseen nähden, verkkoon jääneiden generaattorien pyörimisnopeus laskee aiheuttaen laskun taajuudessa. (Kauppinen ym. 2020, 205.)



Kuva 5. Inertian vaikutus taajuusheilahdukseen.

Inertialla tarkoitetaan sähköverkossa olevaa liike-energiaa, joka on peräisin voimalaitoksissa sijaitsevista, verkon kanssa samalla taajuudella pyörivistä koneista. Koneiden pyörivä massa vastustaa muutosta taajuudessa ja luo inertiaa sähköverkkoon. Esimerkiksi, kun inertia on suuri ja verkosta irtoaa äkillisesti merkittävä sähköntuotantoyksikkö, se aiheuttaa vain pienen hetkellisen taajuusmuutoksen. Jos inertia on pieni, taajuuden putoaminen on suurempi. (Fingrid s.a.)

Pohjoismaisen yhteiskäyttöverkon taajuuteen vaikuttaa koko pohjoismaisen sähköjärjestelmän yhteenlaskettu liike-energia. Se tyypillisesti vaihtelee 120:n ja 280 GWs välillä. Arvio inertian määrästä lasketaan pohjoismaisten kantaverkkoyhtiöiden toimesta yksittäisten Suomessa, Ruotsissa, Norjassa ja Itä-Tanskassa sijaitsevien generaattoreiden tilatietojen perusteella. Välttääkseen mahdollisen vian aiheuttamaa taajuudenmuutosta pienen inertian aikana pohjoismaiset verkkoyhtiöt hankkivat nopeaa taajuusreserviä (Fast Frequency Reserve, FFR) pitääkseen taajuuden stabiilina. (Fingrid s.a.)

2.2.3 Jännitestabiilius

Jännitestabiilius kuvaa, kuinka sähköjärjestelmä kykenee säilyttämään vakaat jännitteet sekä koko ajan että häiriöiden jälkeen. Häiriöt voidaan jakaa pieniin, asteittaisesta kuormitusmuutoksesta johtuviin, ja suuriin oikosuluista johtuviin häiriöihin. (Kauppinen ym. 2020, 206-207.)

Oikosulusta johtuva suuri häiriö aiheuttaa sähkönsiirron siirtymisen rinnakkaiselle reitille, mikä lisää siirtoa tuotantoalueen ja kulutusalueen välillä aiheuttaen loistehon kulutusta, millä on jännitettä laskeva vaikutus. Myös pätoitehon siirtäminen yli maksimiarvon aiheuttaa jännitteen romahtamisen. Sen sijaan kevyt tai kapasitiivinen kuormitus lisäävät ylijännitettä. (Kauppinen ym. 2020, 206-207.)

3 VAATIMUKSET SÄHKÖKAAPELEILLE

Kaapelia valittaessa on huomioitava sen nimellisjännitteen riittävyys ja kaapelin rakenteen kestävyys valitun käyttöpaikan aiheuttamille rasituksille (Tiainen 2013, 186–187). Kuormitusvirta ja siitä aiheutuva lämpeneminen ovat ensisijaisia tekijöitä kaapelien poikkipinta-alan suuruutta valittaessa. Siihen vaikuttavat myös muiden kaapelien läheisyys, asennustapa, kaapelin materiaali ja sen eristemateriaali sekä ympäristön lämpötila. (Tiainen 2010, 43.)

3.1 Luokituslaitos DNV:n vaatimukset kaapeleille

Luokituslaitoksia on useita. Tässä kappaleessa esitellään erään niistä, *Det Norske Veritaksen*, säännöt toimintaohjeista ja teknisistä vaatimuksista koskien sähkökaapeleiden vaatimuksia luokkasertifikaatin saamiseksi ja säilyttämiseksi.

Säännöt sisältävät kaapeleiden valintaa, rakennetta ja niiden ohjearvoja koskevia vaatimuksia pysyvään asennukseen tuleville sähkökaapeleille. Kaapeleiden laskennallisen mitoituksen tulee olla jatkuvan täyden kuorman mitoituksen mukaisia. Kaikkien asennettujen kaapeleiden suunnittelun täytyy olla yhdenmukaista IEC:n eli *International Electrotechnical Commission* -standardointiliiton julkaisemien vaatimusten kanssa. (DNV 2021.)

3.1.1 Kaapeleiden rakennetta koskevat vaatimukset

Kaapelin on oltava vähintään paloa hidastavaa tyyppiä. Johdinten on joko oltava tavallista tai metallipäällysteistä hehkutettua kuparia tai alumiinia. Nämä vaatimukset tulevat IEC:n standardeista 60092-350 ja 60228. Standardi 60228 määrittelee myös johtimen monisyisyyden vaatimukset. (DNV 2021, 133.)

Johdinten halkaistun pinta-alan tulee perustua käytettyihin ylivirran ja oikosulun suojaustavan arvoihin, kuitenkin niin, että halkaistu pinta-ala on vähintään 1,0 mm², kun kyseessä on 0,6/1 kilovoltin kaapeli (DNV 2021, 133.)

Seuraavista taukoista ilmenee eristemateriaalin lämpötilankestot, eristemateriaalin vähimmäispaksuus, sekä kaapelin säikeiden vähimmäispaksuus johtimen halkaisijaan nähden.

Material	Temperature °C
Ethylene propylene rubber (EPR)	90
Hard grade ethylene propylene rubber (HEPR)	90
Cross linked polyethylene (XLPE)	90
Halogen free cross linked polyolefin (HF 90)	90
Silicone rubber (S 95) ¹⁾	95
1) Silicon rubber only to be used together with a varnished glass braid.	

Kuva 6. Eri eristysmateriaalien lämpötilaluokat.

Diameter of core assembly under braid ¹⁾ [mm]	Minimum diameter of threads in braid ²⁾ [mm]
$D \leq 10$	0.2
$10 < D < 30$	0.3
$D \geq 30$	0.4
1) Diameter under braid is fictitious and calculated by the method of IEC 60092-350 Appendix A. 2) The coverage density of the braid shall be in accordance with IEC 60092-350.	

Kuva 7. Kaapelin johdinten säikeiden minimihalkaisijat.

Nominal cross section of conductor [mm ²]	Designation of the insulating compound	
	EPR S 95 [mm]	XLPE HF90 HEPR [mm]
1.5	1.0	0.7
2.5	1.0	0.7
4 to 16	1.0	0.7
25 to 35	1.2	0.9
50	1.4	1.0
70	1.4	1.1
95	1.6	1.1
120	1.6	1.2
150	1.8	1.4
185	2.0	1.6
240	2.2	1.7
300	2.4	1.8
400	2.6	2.0
500	2.8	2.2
630	2.8	2.4

For smaller cross sections than 1.5 mm², the insulation thickness shall not be less than specified for 1.5 mm².
 Table 4 is according to IEC 60092-353 for 0.6/1.0 kV cables.

Kuva 8. Kaapelin eristeen keskimääräinen minimipaksuus.

3.2 Kaapelityyppi

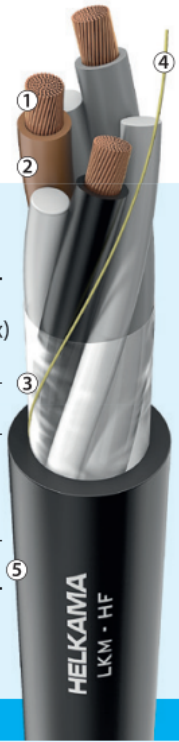
Kaapeliksi on valittu Helkama LKM-HF 4 X 70 mm². LKM-HF tarkoittaa halo-geenitonta muovieristettyä laivakäyttöön soveltuvaa voimakaapelia. Kaapelissa on neljä kappaletta monisäikeisiä kuparijohtimia, joista kunkin poikkileikkauspinta-ala on 70 mm². Johtimista kolme ovat vaihejohtimia ja neljäs suoja- maajohdin. Sitä käytetään teho- ja kontrollikaapelina alle 1000 voltin asennuksissa. Se on ei-armeerattu, joka tarkoittaa, ettei se sisällä sähkömagneettisilta häiriöiltä ja ulkoisilta mekaanisilta voimilta suojaavaa kuparipunosta johtimien ja vaipan välissä. Kaapelin suunnittelu perustuu IEC 60092-353 standardiin.

LKM-HF

Unarmoured power and control cable 0,6/1kV

DESIGN:	STANDARDS: IEC 60092-353, design
1. Conductor - stranded copper conductor 1,0–10mm ² - stranded copper conductor 16–300mm ² - tinned stranded copper conductor on request	IEC 60228, class 2 IEC 60228, class 5 (Flex)
2. Insulation - XLPE plastic	IEC 60092-360
3. Cabling / bedding - cabling with optional fillers or dummy cores to obtain symmetrical and round construction - separator tape	
4. Rip cord - rip cord for conductors from 16mm ²	
5. Sheath - polyolefine plastic, SHF1 - on request, thermosetting polyolefine, SHF2 - standard colour black, other colours on request	IEC 60092-360

● Flame-retardant ● Halogen-free ● Low smoke emission ● Oil resistant (only SHF2)



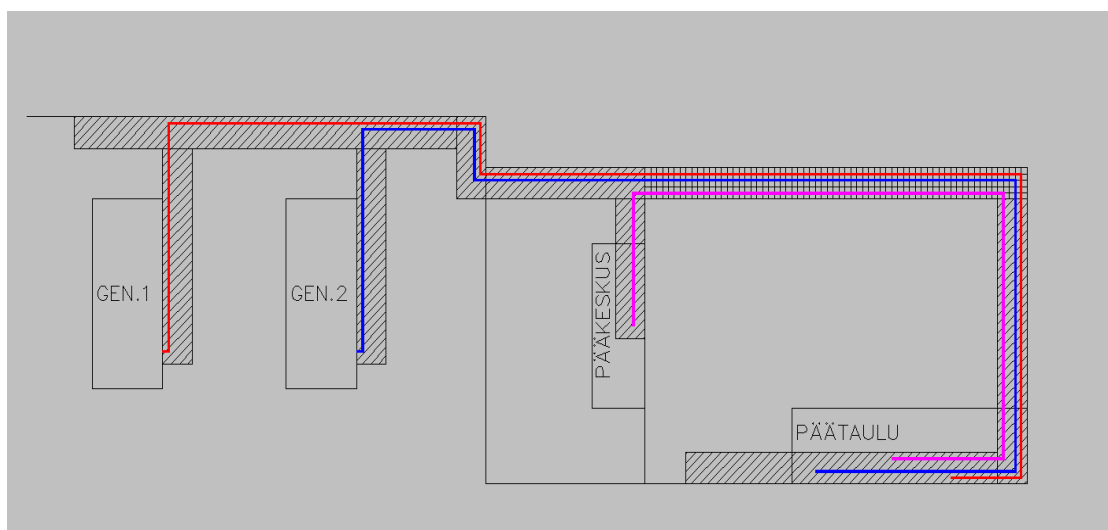
Kuva 9. LKM-HF kaapelin ominaisuudet.

Jokaista johdinta ympäröi ristosilloitettu polyeteenimuovi. Kaapeli sisältää muovilankoja, jotta kaapelin pyöreä symmetrinen rakenne saadaan säilytettyä. Sekä johtimia että muovilankoja ympäröi eristeteippi vaipan alla. Repäisylangalla saadaan kuorittua kaapelin vaippa ilman että johtimet vaurioituvat. Vaippa on valmistettu mustasta polyolefiinimuovista IEC 60092-360 standardin mukaisesti.

Helkama LKM-HF 4 X 70 mm² nimellinen ulkohalkaisija on 37,0 millimetriä. Se painaa noin 3315 kilogrammaa per kilometri. Virtarajoitus +45°C on 168 ampeeria. Kiinteässä asennuksessa kaapelin minimitaivutussäde on 225 millimetriä. Johtimen maksimilämpötila on +90 °C. Kiinteissä asennuksissa lämpötilarajat ovat alkaen -40 °C aina +80 °C asti. Kaapelia ei suositella asennettavaksi alle -15 °C lämpötilassa. Kaapeli kestää vaihtovirtaa 600 voltia jatkuvassa käytössä ja 1000 voltia väliaikaisessa käytössä. Tasavirtakäytössä rajat ovat 900 voltia jatkuvassa käytössä ja 1500 voltia väliaikaisessa käytössä. (Helkama 2017, 4-6.)

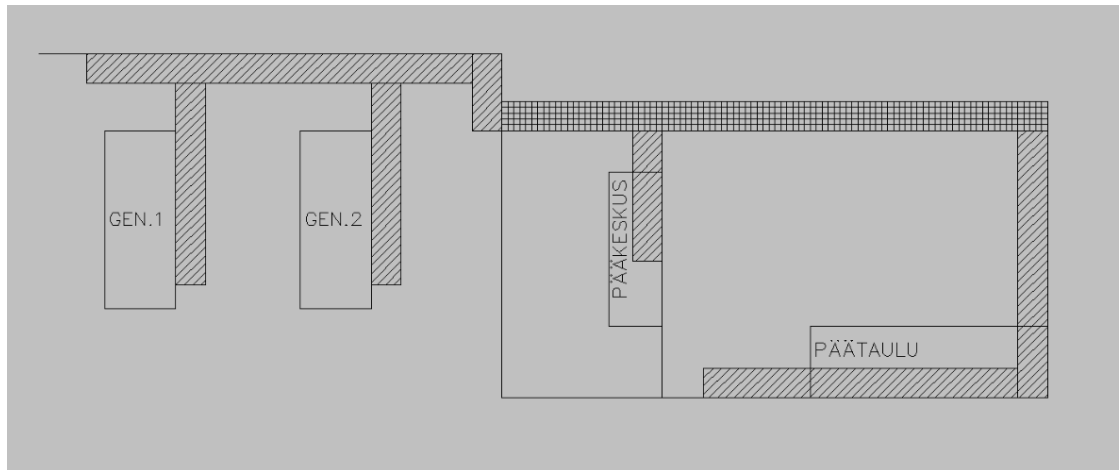
Kaapeli soveltuu kiinteisiin asennuksiin useimmille alueille ja laivojen kansille täyttäen vaaditut korkeat turvavaatimukset. Kaapeleiden halogeenittomuus lisää merkittävästi turvallisuutta laivoilla, sillä palotilanteessa se ei levitä vaarallisia kaasuja tai paksua savua. LKM-HF on paloa hidastava. Helkaman kaapelit ovat kaikkien suurien luokituslaitosten hyväksymiä. (Helkama 2017, 4.)

3.3 Kaapelien kuvaus



Kuva 10. Syöttökaapelit

Molemmat generaattorit syöttävät päätaulua, josta lähtee syöttökaapeli koulun pääkeskukseen. Generaattori 1:n kaapelilinja on merkitty punaisella, generaattori 2:n sinisellä ja päätaulun ja pääkeskuksen välinen fuksianvärillä (kuva 1). Päätaululta pääkeskukseen menevä kaapeli mahdollistaa sähkönsyötön sekä koulun verkkoon että valtakunnan verkkoon, mutta myös maistasyötön päätaululle.



Kuva 11. Kaapelihyllyt

Sähkökaapelit asennetaan kaapelihyllyille, jotka takaavat johtimille hyvän jäähtyvyyden. Olemassa olevat kaapelihyllyt on merkitty ristikkokuviolla ja uudet kaapelihyllyt vinoviivakuviolla (kuva 2).

3.4 Kaapelien mitoitus

Kaapelien mitoituksen lähtökohtana on, että generaattoreilta saatava teho saadaan siirrettyä standardien mukaisesti.

$$I_n = \frac{S}{\sqrt{3} \cdot U} = \frac{2 \cdot 100 \text{ kVA}}{\sqrt{3} \cdot 400 \text{ V}} = 288.7 \text{ A} \quad (1)$$

jossa,

I_n = nimellisvirta [A]

S = näennäisteho [kVA]

U = pääjännite [V]

Kaavassa on laskettu maista- ja maihinsyötön johdon nimellisvirta tilanteessa, jossa molemmat generaattorit tuottavat virtaa valtakunnan verkkoon nimellisteholla. Yhden generaattorin nimellisvirta on puolet tästä, eli 144,3 A.

$$I_n = I_z \quad (2)$$

Nimellinen virta on yhtä suuri kuin johtimen jatkuva kuormitettavuus.

$$I_{zk} = \frac{I_z}{k_{as} \cdot k_t} = \frac{144,3 \text{ A}}{0,80 \cdot 0,94} = 191,9 \text{ A} \quad (3)$$

jossa,

I_{zk} = mitoitusvirta, jossa on huomioitu

korjauskertoimet [A]

I_z = kaapelin jatkuva kuormitettavuus [A]

k_{as} = asennustavan kerroin [-]

k_t = lämpötilakerroin [-]

Yhden generaattorin korjauskertoimet huomioivaksi kaapelin mitoitusvirraksi on saatu 191,9 A. Kertoimeksi on valittu asennustavan osalta 0,80, sillä kaapelit on asennettu tikashyllyille, joissa kulkee enimmillään yhteensä viisi kaapelia. Lämpötilan 30°C osalta kerroin on 0,94, kun käytetään PVC-kaapelia. (Tiainen 2013, 223-224.)

$$I_{zk} = \frac{I_z}{k_{as}} = \frac{288,7 \text{ A}}{0,80} = 360,9 \text{ A} \quad (4)$$

Maihinsyöttökaapelin korjauskertoimen huomioivaksi mitoitusvirraksi on saatu 360,9 A. Tämän kaapelin osalta on huomioitu vain asennustavasta johtuva kerroin 0,80, sillä lämpötila on standardin mukainen eikä vaadi korjauskertoimen käyttöä (Tiainen 2013, 223).

Kaapelin tulee olla samansuuruinen tai pykälää suurempi kuin korjauskertoimet huomioiva mitoitusvirta edellyttää. Korjauskertoimet huomioivien mitoitusvirtojen ja pinta-asennustavan perusteella on valittu seuraavat kuparikaapelit (Tiainen 2013, 217.):

- 195 ampeerin mukaan 70 mm²:n kuparikaapeli generaattoreiden ja päätaulun väliin.
- 161 ampeerin mukaan 185mm²:n kuparikaapeli päätaulun ja koulun pääkeskuksen väliin.

3.5 Jännitteen alenema

Virran kulkeminen kaapelin johtimissa aiheuttaa jännitteen alenemaa. Jännitteen alenema on johtimen alkupään ja loppupään välinen jännite-ero. Jännitteen alenema esitetään yleensä suhteellisena lukemana, joka on prosentuaalinen arvo nimellisjännitteestä.

SFS standardissa määritellään prosentuaalinen jännitteenalenema asennuksissa hyvän sähkön laadun takaamiseksi (SFS 600-1, 2012, 262).

Asennuksen tyyppi	Valaistus %	Muu käyttö %
A- Pienjänniteasennus, joka on syötetty suoraan yleisestä jakeluverkosta	3	5
B- Pienjänniteasennus, joka on syötetty yksittäisestä teholähteestä	6	8

Kuva 12. Jännitteenaleneman suositusarvot.

SFS 6000-525 suositusten mukaan yllä olevan taulukon arvoja ei tulisi jännitteen aleneman ylittää. SFS-EN 60038 esittää standardit sekä jännitteelle että taajuudelle. Standardin mukaan normaalissa käyttöolosuhteessa jakelujännite ei saa erota järjestelmän nimellisjännitteestä enempää kuin $\pm 10\%$.

Jännitteen alenema kolmivaiheisella vaihtosähköllä:

$$\Delta U = I \cdot s \cdot \sqrt{3} \cdot (r \cdot \cos\varphi + x \cdot \sin\varphi) \quad (5)$$

$$\Delta u = \frac{\Delta U}{U_n} \cdot 100\% \quad (6)$$

jossa,	ΔU = jännitteenalenema	[V]
	I = kuormitusvirta	[A]
	s = johdon pituus	[km]
	r = johtimen ominaisresistanssi	[Ω /km]
	x = johtimen ominaisreaktanssi	[Ω /km]
	φ = jännitteen ja virran välinen vaihekulma	[-]
	U_n = nimellisjännite	[V]
	Δu = suhteellinen jännitteenalenema	[%]

Jännitteen aleneman laskussa kuormitusvirta kerrotaan johtimen pituudella sekä sen ominaisreaktanssi että ominaisresistanssi tehokertoimineen huomioiden. Saatu jännitteen alenema voltteina jaetaan nimellisjännitteellä, jolloin tuloksena on suhteellinen jännitteen alenema.

Alla on laskettu generaattorien päätaululle menevän kaapelin jännitteen alenema. Koska kaapelin johtimen paksuus on vain 70 mm², niin kaapelin suhteellista ominaisreaktanssia ei tarvitse ottaa huomioon.

Generaattori 1 Δu :

$$168 \text{ A} \cdot 0,028 \text{ } \Omega/\text{km} \cdot \sqrt{3} \cdot 0,272 \text{ km} = 2,2 \text{ V}$$

$$\frac{2,2 \text{ V}}{400 \text{ V}} \cdot 100 \% = 0,55 \%$$

Ensimmäisen generaattorin kaapeli aiheuttaa 2,2 voltin jännitteen aleneman päätauluun mennessä kaapelista johtuvista syistä. Suhteellinen jännitteen alenema on 0,55 %, mikä alittaa selkeästi standardin suosituksen mukaisen raja-arvon.

Generaattori 2 Δu :

$$168 \text{ A} \cdot 0,027 \text{ km} \cdot \sqrt{3} \cdot 0,272 \Omega/\text{km} = 2,1 \text{ V}$$

$$\frac{2,1 \text{ V}}{400 \text{ V}} \cdot 100 \% = 0,53 \%$$

Toisen generaattorin kaapeli aiheuttaa 2,1 voltin jännitteen aleneman päätauluun mennessä kaapelista johtuvista syistä. Suhteellinen jännitteen alenema on 0,53 %, mikä alittaa selkeästi standardin suosituksen mukaisen raja-arvon.

Molempien generaattoreiden kaapeleiden jännitteenalenema on siis sallituissa suosituksissa.

3.6 Oikosulkuvirta ja -suojaus

Oikosulkusuojauksen tehtävä on katkaista virta ennen kuin suojauksen piiriin kuuluvat järjestelmät hajoavat. Suojalaite mitoitetaan joko laskemalla, taikka mittaamalla (SFS 600-1, 2012, 132–133). Sulakkeen taikka katkaisijan katkaisukyvyn pitää mitoittaa laitteen asennuspaikalla läpi kulkevan prospektiivisen oikosulkuvirran suuruiseksi.

Oikosulkusuojan mitoittamiseksi lasketaan suurin ja pienin oikosulkuvirta. Suurimman oikosulkuvirran laskemisella tarkastetaan sekä riittävä katkaisukyky, että tarpeeksi nopea toiminta. Pienimmän oikosulkuvirran laskemisen tarkoitus on määrittää suojauksen jälkeisen kaapelin maksimipituus.

Oikosulkuvirtojen laskemisessa käytetään standardia IEC 60909-0. Maksimi oikosulkuvirtaa laskettaessa johtimen resistanssit ovat 20 °C lämpötilan resistansseja. Minimi oikosulkuvirtaa laskettaessa johtimen resistanssit ovat 70 °C resistansseja. Maksimissaan 70 mm²:n kaapeleissa ei tarvitse huomioida reaktanssia sen vähäisen vaikutuksen vuoksi.

3.6.1 Maksimi oikosulkuvirran laskeminen kolmivaiheisena

$$I_{k3max} = \frac{C_{max} \cdot U}{\sqrt{3} \cdot Z}$$

jossa, I_{k3max} = maksimi kolmivaiheinen oikosulkuvirta [A]

C_{max} = IEC: n käyttämä varmuuskerroin 1.05,

kun 0.1 kV ≤ U_n ≤ 1 kV

U = pääjännite [V]

Z = verkon sisäinen impedanssi [Ω]

$$I_{k_3max} = \frac{1,05 \cdot 400V}{\sqrt{3} \cdot 0,009234} = 26\,260\,A$$

3.6.2 Minimi oikosulkuvirran laskeminen yksivaiheisena:

$$I_{k1min} = \frac{C_{min} \cdot U}{\sqrt{3} \cdot Z}$$

jossa, I_{k1min} = minimi yksivaiheinen oikosulkuvirta [A]

c_{min} = IEC: n käyttämä varmuuskerroin 0.95,

kun $0.1 \text{ kV} \leq U_n \leq 1 \text{ kV}$

U = pääjännite [V]

Z = verkon sisäinen impedanssi [Ω]

$$I_{k1min} = \frac{0,95 \cdot 400V}{\sqrt{3} \cdot 0,009234} = 23\,752 \text{ A}$$

3.6.3 Sallitun rajalämpötilan saavuttamiseen menevän ajan laskeminen:

Alla olevan kaavan mukaan voidaan laskea aika, jolloin kaapeli lämpiää suurimpaan sallittuun lämpötilaan (SFS 600-1, 2012, 133.) Kun on laskettu oikosulun kesto-aika, voidaan mitoittaa suojalaite katkaisemaan oikosulku ajoissa. Tämä tarkistetaan suojalaitteen toimintakäyrältä.

$$t = \left(\frac{k \cdot A}{I} \right)^2$$

jossa, t = aika, jonka kuluessa johtimen lämpötila nousee sallittuun

rajalämpötilaan [s]

A = johdinpoikkipinta [mm^2]

I = todellinen oikosulkuvirta [A]

k = johdinvakio [-]

$$t = \left(\frac{100 \cdot 70 \text{ mm}^2}{23757 \text{ A}} \right)^2 = 0,868 \text{ s}$$

Enintään 5 s kestävässä oikosuluissa voidaan seuraavasta kaavasta laskea aika t , jonka kuluessa johtimen lämpötila nousee sallittuun rajalämpötilaan. Johtimen oletetaan olevan normaalissa suurimmassa sallitussa käyttölämpötilassa ennen oikosulkua.

$$t = (k \cdot S / I)^2$$

missä:

t on kesto-aika sekunteina

S on johtimen poikkipinta (mm^2)

I on oikosulkuvirta (A) tehollisarvona (r.m.s.)

k on kerroin, joka ottaa huomioon johdinmateriaalin resistiivisyyden, lämpötilakertoimen ja lämmönvarauskyvyn sekä sopivat alku- ja loppulämpötilat. Äärijohtimien kertoimen k arvot normaalisti käytetyille eristemateriaaleille on annettu taulukossa 43.1.

HUOM. Yllä oleva kaava on tarkoitettu oikosulkuihin, jotka kestävät korkeintaan 5 s. Jos kaavaa käytetään pitempään kestäville oikosuluille, lopputulos on lämpenemisen kannalta turvallisella puolella, koska johdin luovuttaa lämpöä ympäristöön eikä kaikki lämpö jää johtimeen.

Jos oikosulku kestää yli 5 sekuntia ja käytetään yhteistä ylikuormitus- ja oikosulkusuojaa pitää noudattaa kohdan 435.1 vaatimuksia.

Taulukko 43.1 Kertoimen k arvot äärijohtimille

Ominaisuus/ olosuhde	Johtimen eristys							
	PVC Kestomuovi		PVC Kestomuovi 90 °C		EPR PEX Kertamuovi	Kumi 60 °C	Mineraali	
							PVC päällystämätön	Paljas päällystetty
Johtimen poikki-pinta-ala mm^2	≤ 300	> 300	≤ 300	> 300				
Alkulämpötila °C	70		90		90	60	70	105
Loppulämpötila °C	160	140	160	140	250	200	160	250
Johtimen materiaali:								
Kupari	115	103	100	86	143	141	115	135 -115 ^a
Alumiini	76	68	66	57	94	93	–	–
Kuparijohtimien tinajuotetut liitokset	115	–	–	–	–	–	–	–
^a Tätä arvoa pitää käyttää kosketeltavissa oleville paljaille johtimille.								
HUOM. 1 Muut kertoimen k arvot ovat harkittavana: – pienille johtimille (erityisesti alle 10 mm^2 poikkipinnoille) – muun tyyppisille johtimien liitoksille – paljaille johtimille.								
HUOM. 2 Oikosulkusuojan mitoitusvirta voi olla suurempi kuin kaapelin kuormitettavuus.								
HUOM. 3 Yllä olevat arvot perustuvat julkaisuun IEC 60724.								
HUOM. 4 Kertoimen k laskemiseksi katso SFS 6000-5-54 liite 54A.								

Kuva 13. Kertoimen K arvot äärijohtimille (SFS 6000)

3.7 Ylikuormitussuojaus

Ylikuormitussuojauksen tehtävänä on suojata kaapeleita liialliselta lämmöltä, joka syntyy tilanteessa, jossa kaapelia ylikuormitetaan liian suurella sähkövirralla esimerkiksi kytkemällä liian monta laitetta samaan aikaan sähköverkkoon. Standardin SFS 6000 luku 433 määrittää ylikuormitussuojaukselle kaavojen mukaiset ehdot. (Tiainen 2010, 27.)

$$I_B \leq I_n \leq I_z$$

$$I_2 \leq 1.45 \cdot I_z$$

jossa, I_B = piirin mitoitusvirta (A)
 I_n = suojalaitteen nimellisvirta (A)
 I_z = johtimen jatkuva kuormitettavuus (A)
 I_2 = virta, joka varmistaa suojalaitteen toimimisen laitteelle tavanomaisessa ajassa (A)

Alla on laskettu Generaattorien suojalaitteen virta, joka varmistaa toiminnan tavanomaisessa ajassa.

$$I_2 \leq 1,45 \cdot I_z$$

$$I_2 = 1,45 \cdot 191,9 \text{ A} = 278,3 \text{ A}$$

3.8 EMC-direktiivi

EMC-direktiivillä säädetään sähköisten laitteiden ja asennuksien sähköisiä häiriöiden sietoa ja päästöjä. SFS 6000 Standardissa luvussa 444 käsitellään asennustapoja, joilla suojataan jännitehäiriöiltä ja sähkömagneettisilta häiriöiltä. (D1 2012, 156–159, EMC-Sähkömagneettinen yhteensopivuus 2016.) Laiva-

asennuksissa kaapelit ovat suojavaipallisia, sekä suojavaipat on kytketty laivan runkoon.

4 POHDINTA

Opinnäytetyössä havaittiin, että generaattoreille menevät kaapelit mitoitettiin standardien mukaisesti. Haasteellisinta oli löytää oikeat laskentakaavat, joilla kyseiset laskelmat piti suorittaa. Laskutoimitusten tekeminen itsessään ei ollut kovin monimutkaista.

Samalla perehdyttiin luokituslaitoksen vaatimuksiin laivojen sähkönsyötön osalta. Kaapeleiden vaatimukset laivateollisuudessa ovat tiukemmat verrattuna maapuolen vastaaviin paloturvallisuuden ja häiriösuojauksen osalta.

Opinnäytetyön laajuutta tarkoituksella supistettiin koskemaan vain kaapelin mitoituksen laskemista, jotta ylimääräiseltä rönsyilyltä vältyttäisiin. Siitä huolimatta osa opinnäytetyön sisällöstä on kaapeleiden mitoituslaskemisen kannalta epäolennaista lisätietoa.

Tätä opinnäytetyötä voi soveltaa yleisesti kaapeleiden mitoituksen apuna. Aihe ei tarvitse lisätutkimusta.

LÄHTEET

DNV. 2021. Part 4 Systems and components, Chapter 8 Electrical installations. PDF-dokumentti. Saatavilla: <https://rules.dnv.com/docs/pdf/DNV/RU-SHIP/2019-07/DNVGL-RU-SHIP-Pt4Ch8.pdf> [viitattu 11.6.2022].

Elovaara, J. & Laiho, Y. 2001. Sähkölaitostekniikan perusteet. 4. jatkopainos. Helsinki: Otatieto.

Elovaara, J. & Haarla, L. 2011. Sähköverkot I: Järjestelmätekniikka ja sähköverkon laskenta. Helsinki: Gaudeamus Helsinki University Press / Otatieto.

Fingrid. 2009. Nordel lakkautettu - ENTSO-E täyteen toimintaansa. WWW-dokumentti. Saatavilla: <https://www.fingrid.fi/sivut/ajankohtaista/tiedotteet/2009/nordel-lakkautettu---entso-e-tayteen-toimintaansa/> [viitattu 26.10.2020].

Fingrid. Pohjoismaisen sähköjärjestelmän inertia s.a. WWW-dokumentti. Saatavilla: <https://www.fingrid.fi/sahkomarkkinat/sahkomarkkinainformaatio/inertia/> [viitattu 25.10.2020].

Helkama. 2017. Helkama Bica Marine and Offshore Cables. PDF-dokumentti. Saatavilla: <https://www.helkamabica.com/catalogues/HelkamaBicaMarineAndOffshoreCablesEN/files/assets/common/downloads/Helkama%20Bica%20Marine%20and%20Offshore%20Cables.pdf> [viitattu 9.6.2022].

Kauppinen, J., Wikström, R. & Hietalahti, J. 2020. Generaattorit -käyttö, huolto ja kunnossapito. Tampere: Tammertekniikka.

Tiainen, E. 2010. Johdon mitoitus ja suojaus. Espoo: Sähköinfo Oy.

Tiainen, E. (toim.) 2013. D1-2012 Käsikirja rakennusten sähköasennuksista. 21., uudistettu painos. Espoo: Sähköinfo Oy.

KUVALUETTELO

Kuva 1. XAMKin generaattorit koulun pihalla. Väre, E. 2023.

Kuva 2. Yksinkertaistettu single line. Väre, E. 24.5.2021.

Kuva 3. Koulun päätaulu. Väre, E. 2023.

Kuva 4. Pohjoismainen yhteiskäyttöverkko. Kuvakaappaus. ENTSO-E. 2020. Saatavissa: <https://www.entsoe.eu/data/map/> [viitattu 25.10.2020].

Kuva 5. 2016. Inertian vaikutus taajuusheilahdukseen. Nordic TSOs. Challenges and Opportunities for the Nordic Power System.

Kuva 6. 2021. Eri eristysmateriaalien lämpötilaluokat. Kuvakaappaus. DNV. Part 4 Systems and components, Chapter 8 Electrical installations. PDF-dokumentti. Saatavilla: <https://rules.dnv.com/docs/pdf/DNV/RU-SHIP/2019-07/DNVGL-RU-SHIP-Pt4Ch8.pdf> [viitattu 15.6.2022].

Kuva 7. 2021. Kaapelien johdinten säikeiden mimihalkaisijat. Kuvakaappaus. DNV. Part 4 Systems and components, Chapter 8 Electrical installations. PDF-dokumentti. Saatavilla: <https://rules.dnv.com/docs/pdf/DNV/RU-SHIP/2019-07/DNVGL-RU-SHIP-Pt4Ch8.pdf> [viitattu 15.6.2022].

Kuva 8. 2021. Kaapelin eristeen keskimääräinen minimipaksuus. Kuvakaappaus. DNV. Part 4 Systems and components, Chapter 8 Electrical installations. PDF-dokumentti. Saatavilla: <https://rules.dnv.com/docs/pdf/DNV/RU-SHIP/2019-07/DNVGL-RU-SHIP-Pt4Ch8.pdf> [viitattu 15.6.2022].

Kuva 9. LKM-HF kaapelin ominaisuudet. Kuvakaappaus. Helkama Bica. Saatavissa: <https://www.helkamabica.com/catalogues/HelkamaBicaMarineAndOffshoreCablesEN/files/assets/common/downloads/Helkama%20Bica%20Marine%20and%20Offshore%20Cables.pdf> [viitattu 9.6.2022].

Kuva 10. Syöttökaapelit. Väre, E. 21.10.2020.

Kuva 11. Kaapelihyllyt. Väre, E. 21.10.2020.