

## Jäänmurtajan PMS-järjestelmän modernisointi

Tuomo Kanninen

Tekniikan koulutusalan opinnäytetyö  
Sähkövoimatekniikka  
Insinööri (AMK)

KEMI 2013

## ALKUSANAT

Haluan kiittää Protacon Oy:tä mielenkiintoisesta opinnäytetyön aiheesta. Työelämäohjaajana oli Marko Loisa ja opinnäytetyön ohjaajana Antero Martimo. Kiitokset molemmille sekä muille työn tekemisen mahdollistaneille henkilöille. Erityisesti kiitän puolisoani Heidiä tuesta ja kannustuksesta opintojen ja opinnäytetyön aikana.

Oulussa 27.5.2013

Tuomo Kanniainen

## TIIVISTELMÄ

## KEMI-TORNION AMMATTIKORKEAKOULU, Tekniikka

Koulutusohjelma:	Sähkötekniikka
Opinnäytetyön tekijä:	Tuomo Kannianen
Opinnäytetyön nimi:	Jäänmurtajan PMS-järjestelmän modernisointi
Sivuja (joista liitesivuja):	87 (15)
Päiväys:	27.05.2013
Opinnäytetyön ohjaaja(t):	Ins. Antero Martimo Kemi-Tornio AMK Tuotepäällikkö Marko Loisa Protacon Oy
<p>Tämän opinnäytetyön tarkoituksena oli tehdä jäänmurtaja Urhon PMS-järjestelmän modernisointi, joka sisältää neljän apudieselgeneraattorin, hätä-/satamageneraattorin ja maasyötön ohjauksen, valvonnan ja suojauksen. Tavoitteena oli, että työn tuloksia voidaan hyödyntää vastaavissa modernisointiprojekteissa. Tavoitteena oli myös tutkia PPM-3-järjestelmän soveltuvuus keskijännitejärjestelmään.</p> <p>Teoriaosuudessa käsiteltiin PMS-järjestelmän ja sähköntuotannon kannalta oleellisempien laitteiden kuten generaattoreiden, virtamuuntajien ja suojareleiden ominaisuuksia. Lisäksi teoriaosuudessa käytiin läpi PMS-järjestelmän toiminnallisuutta ja uuden järjestelmän soveltuvuutta vanhan tilalle sekä vaatimukset järjestelmän käytölle merenkulkualan standardien näkökulmasta.</p> <p>Aineistona käytettiin laitevalmistajien teknisiä dokumentteja, merenkulualan DNV-standardia sekä jäänmurtajan sähköaseman ja dieselautomaatiikan dokumentointiaineistoa. Käytetyillä tiedoilla saatiin hahmoteltua toiminnallisuuden, suunnittelun ja toteutuksen vaatimukset.</p> <p>Opinnäytetyön lopputuloksena saatiin helposti ohjelmoitava, käyttäjäystävällinen ja luotettava PMS-järjestelmä, jonka yksikkökohtaiset valvonta- ohjaus- ja suojaustoiminnot on integroitu järkevästi yhtenäiseksi kokonaisuudeksi. Järjestelmä on siksi vartenotettava vaihtoehto vastaavissa modernisointiprojekteissa ja soveltuu, asennusvaatimukset ja tekniset vaatimukset erityisesti huomioiden, käytettäväksi myös keskijännitejärjestelmässä.</p>	
Asiasanat: PMS, generaattori, järjestelmä, toiminnallisuus.	

## ABSTRACT

KEMI-TORNIO UNIVERSITY OF APPLIED SCIENCES, Technology

Degree programme:	Electrical Engineering
Author:	Tuomo Kanninen
Thesis title:	Modernization of PMS System of Icebreaker
Pages (of which appendixes):	87 (15)
Date:	27 May 2013
Thesis instructor(s):	Antero Martimo, Engineer Marko Loisa, Product Manager, Protacon Oy
<p>The purpose of this final project was to do the modernization of PMS system of icebreaker Urho, which contains four auxiliary diesel generators, emergency/harbour generator and shore connection control, monitoring and protection. The aim was that the thesis can be utilized in similar modernization projects. The aim was also to examine the suitability of the PPM-3 system in medium voltage system.</p> <p>The theory part dealt with the essential equipment characteristics of the PMS system and the production of electricity such as the generators, current transformers and protective relays. The theory part also dealt with the functionality of the PMS system and suitability of the new system to replace the old one, as well as the requirements for the usage of the system from the aspect of the maritime standards.</p> <p>The material used was the manufacturer's technical documents, DNV maritime standard and icebreaker's substation and the documents of the diesel automatics. With data used outlines of the functionality, design and implementation requirements were obtained.</p> <p>The result of this final project was easily programmable, user-friendly and reliable PMS system, whose monitoring, control and protection functions of the specific control unit are integrated reasonably into a coherent whole. The system is therefore a strong option in corresponding modernization projects and is suitable, installation and technical requirements specifically considered, for use also in medium voltage system.</p>	
Keywords: PMS, generator, system, functionality.	

## SISÄLLYS

ALKUSANAT.....	2
TIIVISTELMÄ.....	3
ABSTRACT .....	4
SISÄLLYS .....	5
KÄYTETYT MERKIT JA LYHENTEET .....	7
1 JOHDANTO.....	10
2 SÄHKÖNTUOTANTO .....	11
2.1 Generaattori.....	15
2.1.1 Tahtigeneraattori.....	16
2.2 Tahtigeneraattorin magnetointi .....	21
2.2.1 Harjallinen magnetointi .....	24
2.3 Oikosulkuvirrat ja impedanssit.....	25
2.4 Generaattorin suojaus .....	34
2.4.1 Virtamuuntaja.....	35
2.4.2 Katkaisija.....	37
2.4.3 Suojarele.....	38
3 PMS-JÄRJESTELMÄ .....	40
4 UUSI PMS-JÄRJESTELMÄ .....	44
4.1 DNV-vaatimukset laivan sähköntuotannolle .....	44
4.1.1 Generaattorit .....	45
4.1.2 Hätägeneraattori.....	45
4.1.3 Generaattoreiden suojaus .....	46
4.1.4 Toiminnallisuus .....	46
4.2 DEIF PPM-3.....	47
4.3 Suunnittelu .....	50
4.3.1 Piirikaaviot.....	50
4.3.2 Asennuslevyt.....	51
4.3.3 Kytkentälistat .....	52
4.3.4 Luettelot .....	53
4.4 Mittauspiirin taakka .....	54
4.4.1 Apugeneraattorit .....	55
4.4.2 Maasyöttö .....	56
4.4.3 Hätä-/satamageneraattori.....	57

4.5	Oikosulkuvirtojen tarkastelu .....	58
4.6	Asennukset .....	61
4.7	Parametointi ja testaus .....	65
4.8	Soveltuvuus keskijännitejärjestelmään .....	67
5	JOHTOPÄÄTÖKSET JA POHDINTA.....	69
	LÄHTEET .....	70
	LIITTEET.....	72

## KÄYTETYT MERKIT JA LYHENTEET

A	ampeeri
AC	vaihtosähkö
AG	Auxiliary Generator
$A_j$	johtimen poikkipinta-ala
c	jännitekerroin
CAN	Controller Area Network
DC	tasasähkö
DNV	Det Norske Veritas
E	lähdejännite, pysyvän tilan sähkömotorinen voima
$E'$	muutostilan sähkömotorinen voima
$E''$	alkutilan sähkömotorinen voima
EDG	Emergency Diesel Generator
E0	Merenkulkualan luokitusluokka
f	taajuus
$f_k$	käämityskerroin
Hz	hertsi
I	virta
$I_k$	oikosulkuvirta
$I_k'$	muutosoikosulkuvirta
$I_k''$	alkuoikosulkuvirta
$I_{k1}$	yksivaiheinen oikosulkuvirta
$I_{k2}$	kaksivaiheinen oikosulkuvirta
$I_{k3}$	kolmivaiheinen oikosulkuvirta
$I_n$	nimellisvirta
$i_s$	sysäysoikosulkuvirta
$I_{sn}$	toisiopiirin nimellisvirta
I/O	tiedonsiirtosignaali
k	konekohtainen vakio
kVA	kilovolttiampeeri
kV	kilovoltti
kW	kilowatti
l	pituus
LCD	Liquid Crystal Display

MVA	megavoltiampeeri
N	käämin johdinkierrokset
n	pyörimisnopeus
p	napapariluku
P	pätöteho
PMS	Power Management System
PPM-3	Protection and Power Management 3
$R_d$	generaattorin resistanssi
$R_n$	generaattorin ja vikapaikan välinen resistanssi
rpm	kierrosta minuutissa
$S_j$	johtimen taakka
SC	Shore Connection
SG	Safety generator
smj	sähkömotorinen jännite
smv	sähkömotorinen voima
$S_n$	nimellinen näennäisteho
SSE	dieselautomaattikajärjestelmä
$S_{\%}$	taakkasuhde
$U_n$	nimellisjännite
$U_{ng}$	tahtikoneen nimellinen vaihejännite
$U_{nv}$	nimellinen vaihejännite
UPS	Uninterruptible Power Supply
$U_s$	napajännite
V	volti
VDC	tasajännite
X	reaktanssi
x	suhteellinen reaktanssi
$x_d''$	suhteellinen alkureaktanssi
$X_d$	pitkittäisreaktanssi
$X_d''$	generaattorin alkureaktanssi
$X_n$	generaattorin ja vikapaikan välinen reaktanssi
$X_q$	poikittaisreaktanssi
$Z_T$	impedanssi
$Z_0$	nollaimpedanssi
$Z_1$	myötäimpedanssi



$Z_2$	vastaimpedanssi
$\omega$	kulmataajuus
$\square$	magneettivuo
$\beta$	napakulma
$\Omega$	ohmi
$\rho$	resistiivisyys
$\kappa$	sysäyskerroin
$\lambda$	tahtikoneen maksimimagnetointikerroin
$\tau_{d0}$	tyhjäkäyntitilan alkuaikavakio
$\varphi$	vaihekulma

## 1 JOHDANTO

Tässä opinnäytetyössä käsitellään Jäänmurtaja Urhon (kuva 1) PMS-järjestelmän modernisointi sisältäen apudieselgeneraattoreiden ja hätä-/satamageneraattorin ohjaus- ja suojausjärjestelmän sekä ohjaus- ja valvontayksikön lisäyksen maasyötön katkaisijalle. PMS-järjestelmä on alkuperäinen, vuodelta 1975. Työssä selvitetään vanhan PMS-järjestelmän toiminnallisuus sekä määritellään uusi järjestelmä. Lisäksi käydään läpi modernisointiprosessi suunnittelusta käyttöönottoon. Tavoitteena on, että työn tuloksia voidaan hyödyntää vastaavissa projekteissa.

Jäänmurtaja Urhossa sähköä tuotetaan mm. propulsio eli potkurikoneiston käyttölaitteille, kansikoneisiin, valaistukseen, lämmitykseen ja ilmastointiin. Sähköenergia tuotetaan neljällä apudieselmootorilla ja yhdellä hätä-/satamadieselmootorilla, joista kukin pyörittää yhtä vaihtovirtageneraattoria. Satamassa sähköä tuotetaan hätä-/satamageneraattorilla tai vaihtoehtoisesti alus liitetään kaapeleilla laiturin sähkökeskukseen. Sähköntuotantoa hallitaan aluksen sähköntuotannon ohjausjärjestelmällä, PMS-järjestelmällä, jonka tehtävänä on huolehtia laivan sähköntuotannosta kuormitustilanteesta riippuen sekä suojata sähköntuotantolaitteita tuotantokatkoksia aiheuttavilta häiriöiltä.

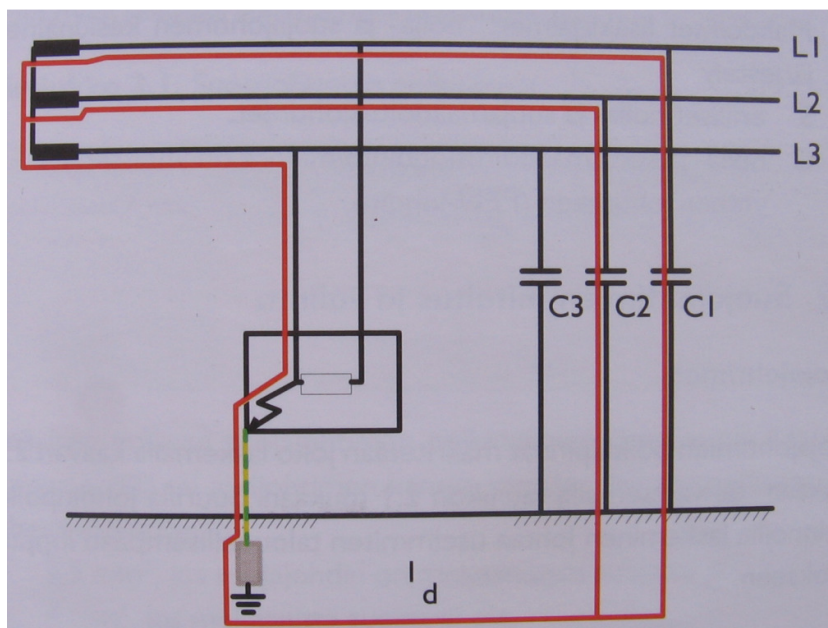


Kuva 1. Jäänmurtaja Urho (Arctia Shipping Oy, hakupäivä 2.1.2013)

## 2 SÄHKÖNTUOTANTO

Laivan sähköjakeluverkossa päätehtävänä on ohjata generaattoreiden tuottama sähköenergia sitä tarvitseville kuluttajille sekä turvata niiden kuluttajien sähkönsaanti, joiden toiminnoilla on vaikutusta laivan kulkuun ja turvallisuuteen. Jakeluverkko on toteutettu IT-järjestelmällä (kuva 2), jossa ensimmäinen vika ei aiheuta käyttökeskeytystä. Tämän vuoksi IT-järjestelmä soveltuu kohteisiin, joissa sähköjakelujärjestelmän on säilyttävä toimintakuntoisena mahdollisimman kauan ja sitä käytetään mm. prosessiteollisuudessa, kaivoksissa sekä sairaaloiden leikkaussaleissa. (Satakunnan ammattikorkeakoulu, hakupäivä 7.5.2013; Tiainen 2008, 37)

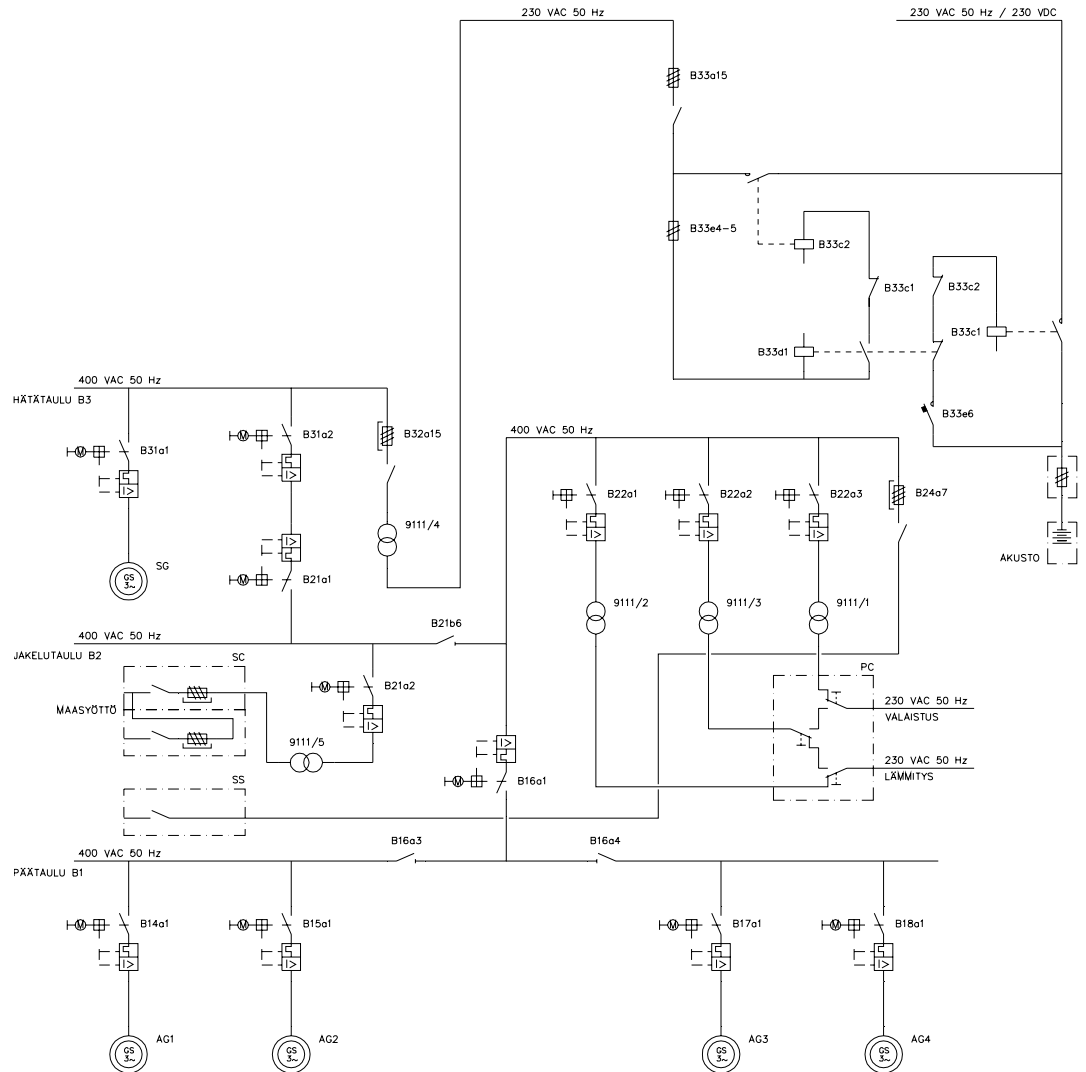
IT-järjestelmässä ei yleisesti käytetä nollajohdinta ja jännitteelle alttiit osat kytetään erillisiin maadoituselektrodeihin tai suojajohtimella yhteiseen elektrodiin. Vikavirtojen valvontaan käytetään vikavirtojen sekä eristystilan valvontalaitteita sekä eristysvian indikointilaitteita. Maasulkuvalvonta toteutetaan tavallisesti järjestelmän keskipisteen ja maan välille kytkettävällä vastuksella, jonka suuruus määritellään tapauskohtaisesti. Esim. sairaaloissa vastuksen suuruus on oltava vähintään 100 k $\Omega$ . (Tiainen 2006, 55-56)



Kuva 2. IT-järjestelmä ja vikavirran kulku järjestelmässä (Tiainen 2008, 37)

Laivoissa maadoituselektrodina toimii aluksen runko ja sähköjakelujärjestelmässä ei käytetä nollajohdinta. Jäänmurtaja Urhossa jakeluverkon pääjännite on 400 VAC.

Jakeluverkon jännitteen ja nolajohtimen puuttumisen vuoksi yksivaiheiset kuormat on kytketty muuntajien välityksellä esim. erilliseen valaistusverkkoon, jonka pääjännite on 230 VAC. Kiskostokaaviossa on esitetty Jäänmurtaja Urhon sähköjakelujärjestelmä (kuvio 1). Kiskostokaavio on myös liitteessä 1.



Kuvio 1. Laivan kiskostokaavio

Sähköjakelujärjestelmä koostuu päätaulusta B1, jakelutaulusta B2 ja hätätaulusta B3, niissä sijaitsevista kojeista ja komponenteista sekä olennaisesti sähköntuotantoon liittyvistä generaattoreista. Generaattorikatkaisijoita voidaan ohjata käsin kojeistokohtaisesti sijoitetuilla painonapeilla tai niitä ohjaa automaattisesti sähköntuotannon ohjausjärjestelmä (PMS-järjestelmä). Generaattorin suojaustilanteessa katkaisijoita ohjaavat suojareleet. Kuviossa 1 katkaisijoiden ja erottimien taulu- ja

kenttäkohtainen sijainti selviää positiotunnuksen ensimmäisestä kirjaimesta ja kahdesta numerosta, esim. maasyötön katkaisija B21a2 sijaitsee jakelutaulun B2 kentässä B21.

Tärkein osio on päätaulu, johon on liitetty apugeneraattorit AG1-4 tahdistuvien generaattorikatkaisijoiden B14-15 ja B17-18 välityksellä. Lisäksi päätaulussa ovat kiskoerottimet B16a3-4, joilla kaksi apugeneraattoria voidaan erottaa verkosta esimerkiksi häiriötilanteessa tai huollon ajaksi. Päätaulun jakelu- ja hätätaulusta erottava katkaisija B16a1 ei ole tahdistettavissa, jonka vuoksi jakelutaulu on tehtävä jännitteettömäksi katkaisijalla B31a2 ennen B16a1 sulkemista.

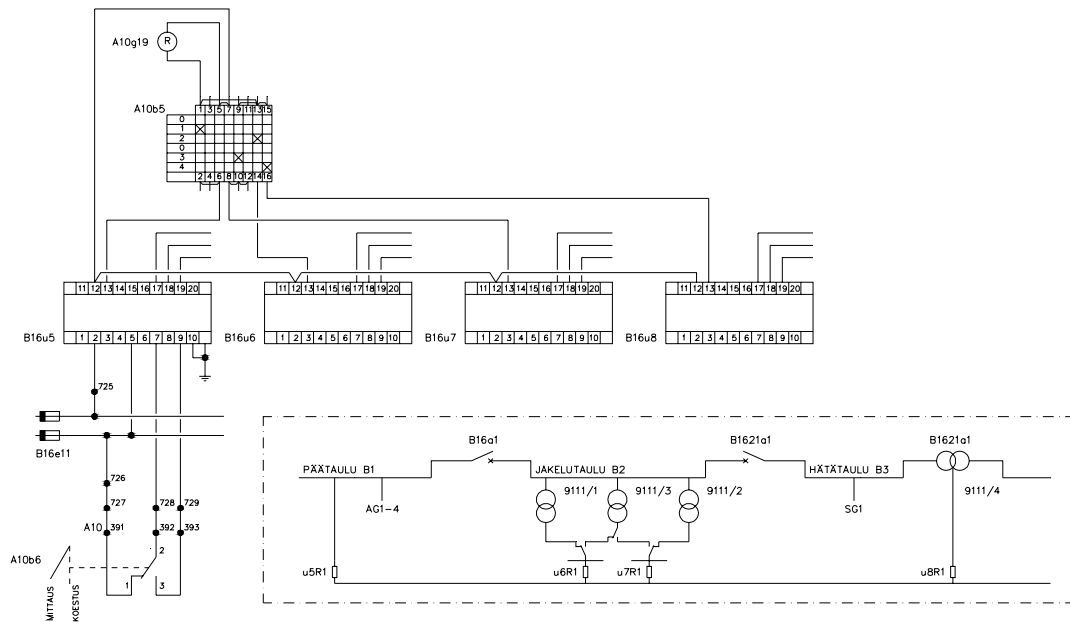
Maasyöttö kytketään laivan sähköverkkoon jakelutaulussa olevalla katkaisijalla B21a2. Hätätaulun jakelu- ja päätaulusta erottava katkaisija B21a1 ei ole myöskään tahdistettavissa, joten katkaisija B31a2 on tässäkin tapauksessa avattava ennen B21a1 sulkemista. Hätä- ja jakelutaulu voidaan erottaa toisistaan myös kiskoerottimella B21b6.

Hätätauluun on kytketty hätä-/satamageneraattori katkaisijalla B31a1. Normaalitilanteessa apugeneraattorit tuottavat pää- ja hätäverkkojen sähkön. Jakeluverkossa voi tapahtua sähkökatko (black-out) apugeneraattoreiden irrotessa verkosta esim. äkillisen ylikuormitustilanteen takia. Tuolloin hätä- ja jakelutaulun yhdistävän katkaisijan B31a2 ohjausjännite katoaa ja katkaisija aukeaa. Tämän jälkeen hätägeneraattori käynnistyy automaattisesti ja palauttaa jännitteet hätäverkkoon sulkemalla katkaisijan B31a1. Jakeluverkon tullessa uudelleen jännitteiseksi, hätägeneraattori tahdistaa hätäverkon jakeluverkkoon ja sulkee katkaisijan B31a2. Tämän jälkeen hätägeneraattori luovuttaa kuormansa apugeneraattoreille, avaa katkaisijan B31a1 ja sammuu. Black-outista hätägeneraattorin käynnistymiseen ja jännitteiden palautumiseen menee aikaa n. 30 s, jolloin laivan sähköverkko on pimeänä. Tilannetta varten 230 VAC verkon kanssa ristiin lukittu 230 VDC UPS-verkko, joka syöttää keskeytymättömästi hätävalaistusverkkoa.

Black-out voi johtaa vaaratilanteeseen, jonka vuoksi generaattoreiden ylikuormitussuojaus on toteutettu katkaisemalla vähemmän tärkeät kuormat pois jakeluverkosta (preference-trip). Lähellä generaattoreiden ylikuormitusta ohjausrele katkaisee vähemmän tärkeitä kuluttajia pois yhtenä tai useampana portaana pysähdyksissä olevien generaattoreiden samalla käynnistyessä ja tahdistuessa verkkoon. Verkon kuormitettavuuden kasvaessa riittävästi, kuluttajat voidaan kytkeä takaisin verkkoon. (Satakunnan ammattikorkeakoulu, hakupäivä 7.5.2013)

Eristystilan valvonta on toteutettu päätaulun 400 VAC -verkkoa, jakelutaulun 230 VAC valaistus- sekä lämmitysverkkoa ja hätätaulun 230 VAC -verkkoa valvovilla releillä, joilta saadaan yksi yhteinen hälytystieto valvontajärjestelmään sekä erilliset indikointitiedot koneistonvalvontakeskuksen pulpetin merkkilampuille. Eristystilan valvontapiirit ovat tarkistettavissa valvontapulpetissa sijaitsevalla releiden mittaussiireihin kytkettävällä eristysvastusmittarilla sekä koestettavissa valintakytkimellä, joka kytkee releen sisäisen 1 k $\Omega$  vastuksen mittaussiiriin. (Arctia Icebreaking Oy, hakupäivä 8.5.2013)

Eristystilan valvontaa on havainnollistettu alla olevalla piirikaaviolla (kuvio 2). Piirikaavio on myös liitteessä 2.



Kuvio 2. Eristystilan valvonta

Kuviossa ylhäällä on valintakytkin ja eristysvastusmittari, joiden alla ovat valvontareleet ja releiden koestuskytkin. Katkoviivoitetulla alueella on esitetty kiskostokaavio, jossa näkyvät eristystilan valvontakohteet sähköjakelujärjestelmässä. KytKentää on havainnollistettu pääpiirteittäin yhden releen osalta. Piirikaaviosta puuttuvat hälytystiedot valvontajärjestelmään ja valvontakeskuksen pulpetille.

## 2.1 Generaattori

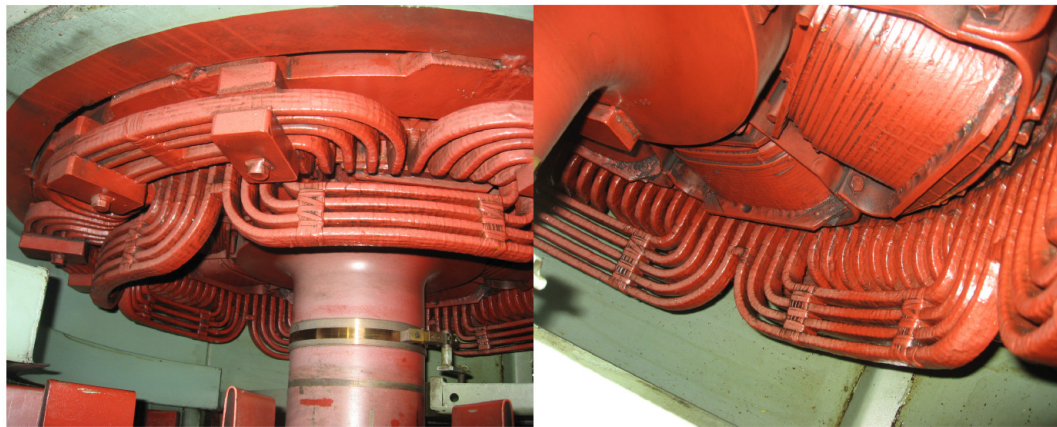
Generaattori on pyörivä sähkökone, jolla muutetaan voimakoneella tuotettu mekaaninen teho sähkötehoksi. Sähköntuotantolaitoksissa voimakoneina käytetään vesi-, höyry- tai kaasuturbiineja, kun taas varavoimalaitosten voimakoneina toimivat dieselmoottorit. Generaattorin ohjaukseen ja säätöön kuuluvia laitteita ovat magnetointi- ja tahdistuslaitteet sekä mittamuuntajat, suojareleet ja generaattorikatkaisijat. Lisäksi muita ohjaukseen ja säätöön liittyviä laitteita ovat turbiinin tai dieselin säätölaitteet ja automaatiojärjestelmät. (Häsä 2009, 4)

Jäänmurtaja Urhossa apudieselmoottoreiden sekä hätä-/satamadieselmoottorin pyörittämät generaattorit ovat harjallisella magnetoinnilla varustettuja avonapatahtigeneraattoreita (kuva 3). Kaapelit on viety generaattoriin sivusta ja kaapeliliitännät ovat koneen sisällä staattorissa. Generaattorille on tuotu seitsemän päävirtapiirin kaapelia sekä kaapelit magnetointia, yllilämpöhälytystä ja laakerin lämpötilamittausta varten (kuva 3). Generaattorin staattorikäänitys on rakenteeltaan hitsattu kaksitasosilmukkakäänitys ja roottorikäänitys on valmistettu kuparilangasta, molemmat käänit on eristetty (kuva 4). Vaimennuskäämeillä varustetut roottorinavat on koottu muuntajalevyistä ja kiinnitetty ruuveilla roottorikeskukseen. Generaattoreiden jäähdytyksestä huolehtivat generaattorikohtaiset, suodatettua ilmaa  $1 \text{ m}^3/\text{s}$  syöttävät puhaltimet. Lisäksi generaattoreiden imupuolella on erillinen ilmansuodatin. (Arctia Icebreaking Oy, hakupäivä 8.5.2013)

Generaattorin laakerissa on hälytystietona valvontajärjestelmään liitetty Pt100-lämpötila-anturi. Staattorikäänityksen joka vaiheessa on kaksi termistoria, joista toiset ovat varalla. Termistorien vastusta mitataan termistorireleillä ja lämpötilan noustessa yli  $110 \text{ }^\circ\text{C}$ :seen termistorin vastus muuttuu ja antaa releen välityksellä hälytyksen valvontajärjestelmään. Generaattorissa on lisäksi kaksi lämmitysvastusta, jotka kytkettyvät generaattorin seisoessa. (Arctia Icebreaking Oy, hakupäivä 8.5.2013)



Kuva 3. Apugeneraattorin kaapelointi ja kytkentä (MDA Service, 2012)

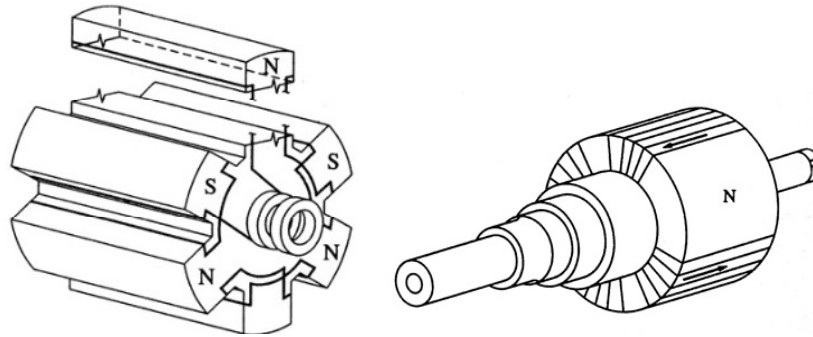


Kuva 4. Apugeneraattorin staattori- ja roottorikäänitys (MDA Service, 2012)

### 2.1.1 Tahtigeneraattori

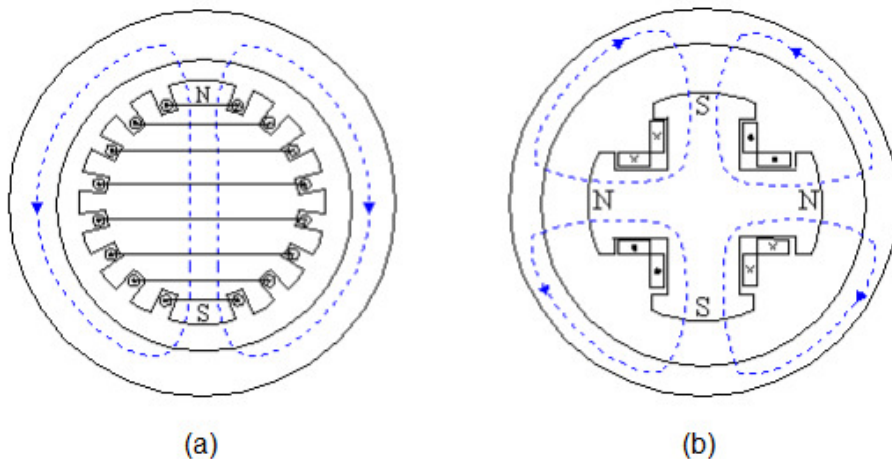
Tahtigeneraattorin staattorin rakenne on samanlainen kuin epätahtigeneraattoreissa. Roottorin rakenne poikkeaa epätahtigeneraattorin roottorista siten, että se on joko umpinaparakenteinen tai avo- eli varsinaparakenteinen (kuvio 3). Tahtigeneraattoreiden tehoalueet ovat 10 kVA-1500 MVA ja jännitealueet vastaavasti 0,4 kV-30 kV. (Aura & Tonteri 2002, 345-346)





Kuvio 3. Vasemmalla Avonaparoottori ja oikealla umpinaparoottori (Häsä 2009, 3)

Avonaparoottorissa on koneen napaluvun mukainen määrä magneettinapoja (kuvio 4b) ja myös staattorikäänitys tehdään samalle napaluvulle kuin roottori. Jokaisella navalla on omat magnetointikääninsä, jotka sarjaan kytkettynä magnetoivat roottorin navat vuorotellen S- ja N- navoiksi. Roottorin navan päässä olevalla napakengän muotoilulla pyritään saamaan napakengän ja staattorikehän välinen magneettivuo jakautumaan mahdollisimman sinimuotoisesti. Avonapageneraattorissa ilmaväli suurenee napakengän reunoille päin mentäessä. Umpinaparoottorissa käänitys on roottorin akselin suuntaisissa urissa (kuvio 4a). Uria ei ole tasaisesti koko kehällä, vaan niiden välissä on magneettinapoina toimivia alueita. Vuontiheys roottorin ja staattorikehän välisessä ilmavälissä pyritään saamaan myös mahdollisimman sinimuotoiseksi. (Havunen, Kaartinen, Korpinen, Lehtelä & Silvennoinen 1998, hakupäivä 8.1.2013)



Kuvio 4. Vasemmalla 2-napainen umpinaparoottori ja oikealla 4-napainen avonaparoottori (Havunen ym. 1998, hakupäivä 8.1.2013)

Avonapageneraattorit ovat halkaisijaltaan suuria ja tämän vuoksi tarkoitettu pienille 75-500 rpm pyörimisnopeuksille 50 Hz taajuudella. Avonapageneraattoreita käytetään yleisesti vesivoimalaitoksissa. Umpinapageneraattorit ovat sen sijaan halkaisijaltaan pieniä ja ne on tarkoitettu suurille 1500-3000 rpm pyörimisnopeuksille 50 Hz taajuudella. Umpinapageneraattoreita käytetään höyry- ja kaasuturbiinivoimalaitoksissa. Varavoimalaitoksissa käytettävien dieselmoottoreilla pyöritettävien tahtigeneraattoreiden pyörimisnopeudet ovat 500-1500 rpm 50 Hz:n taajuudella ja niissä käytetään joko avo- tai umpinapakoneita. (Aura & Tonteri 2002, 345-346)

Tahtigeneraattori pyörii samalla nopeudella generaattorin magneettikentän ja kytketyn verkon kanssa. Generaattorin pyörimisnopeus  $n$  ja syöttävän verkon taajuus  $f$  ovat sidoksissa toisiinsa seuraavasti. (Lana 2008, 16)

$$n = \frac{f}{p} r/s \Rightarrow n = \frac{60 \cdot f}{p} r/min, \quad (1)$$

missä

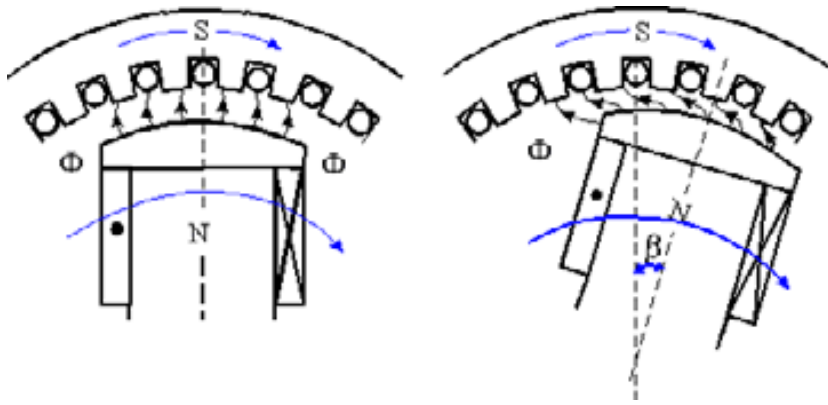
$p$  on generaattorin napapariluku

$n$  on generaattorin pyörimisnopeus.

Kaavan perusteella 2-napaisen generaattorin pyörimisnopeus on 3000 rpm ja 8-napaisen generaattorin 750 rpm 50 Hz:n taajuudella.

Tahtigeneraattorin ominaisuudet määräävät enimmäismäärin reaktanssit. Avonapageneraattorilla on erilaiset ilmavälit pitkittäissuunnassa  $X_d$  ja poikittaissuunnassa  $X_q$ , jonka vuoksi koneen pitkittäis- ja poikittaisreaktanssit ovat vastaavasti erisuuruiset. Umpinapakoneen reaktanssit ovat likimain samansuuruiset, koska ilmavälitasaisuutta rikkoo vain roottorin uritus. (Lana 2008, 17)

Tutkitaan staattorin ja roottorin väistä kytkentää generaattorikäytössä (kuvio 5). Vasemmalla tyhjäkäynnissä olevan generaattorin roottorin ja staattorin magneettikenttien navat ovat kohtisuorassa toisiaan vasten. Koneita kuormitettaessa roottori kiihtyy napakulman  $\beta$  verran staattorikentän edelle ja pyrkii edelleen kasvamaan. (Havunen ym. 1998, hakupäivä 8.1.2013)



Kuvio 5. Generaattorin magneetikenttien välinen kytkentä (Havunen ym. 1998, hakupäivä 8.1.2013)

Avonapageneraattorin pätötehon suuruus riippuu generaattorin napakulmasta, lähde- ja napajännitteestä sekä tahtireaktansseista seuraavasti. (Lana 2008, 18)

$$P = 3 \left( \frac{EU_s}{X_d} \sin \beta + U_s^2 \frac{X_d - X_q}{2X_d X_q} \sin 2\beta \right), \quad (2)$$

missä

$E$  on lähdejännite

$U_s$  on generaattorin vaiheiden välinen napajännite

$X_d$  on pitkittäisreaktanssi

$X_q$  on poikittäisreaktanssi

$\beta$  on napakulma.

Teho on vääntömomentin ja mekaanisen kulmanopeuden tulo, joten kaavan perusteella vääntömomentti on suoraan verrannollinen termiin  $\sin \beta$  generaattorin pyörimisnopeuden pysyessä vakiona. Tästä seuraa, että pätötehoa säädetään voimakoneen liike-energian avulla vaikuttamalla samalla saatuun vääntömomenttiin ja sitä kautta kulmaan  $\beta$ . (Lana 2008, 18). Kaavassa ensimmäinen osa kuvaa magnetoidulla roottorilla saatavan tehon ja jälkimmäinen roottorin epäsymmetriasta saatavan tehon. Suurin teho ja vääntömomentti saadaan napakulman ollessa alle  $90^\circ$ . (Hietalahti 2011, 92)

Generaattorin loisteho määritetään seuraavasti.

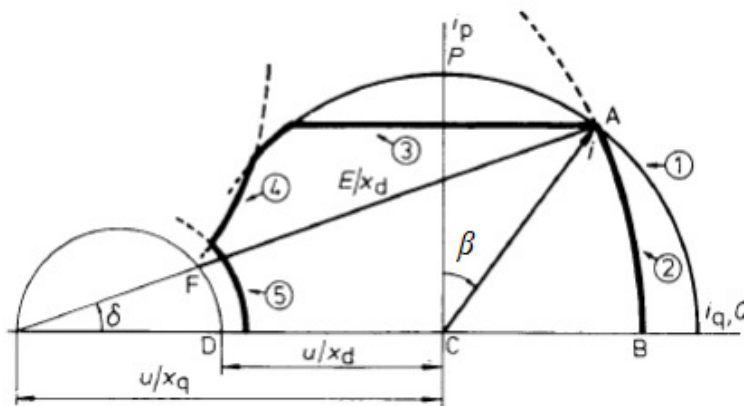
$$Q = 3 \left( \frac{EU_s}{X_d} \cos \beta - \frac{U_s^2}{X_d} \right), \quad (3)$$

missä

$Q$  on loisteho.

Roottorin vääntömomentti kasvaa generaattorin verkkoon syöttämän tehon kasvaessa. Tuolloin roottori pyörii edelleen verkon taajuudella mutta suuremmalla napakulman arvolla. Kasvatettaessa voimakoneen tehoa liikaa ja kulman kasvaessa yli  $90^\circ$ , roottorin ja staattorin magneettinapojen välinen yhteys katkeaa ja generaattori putoaa tahdistista. Tilanteessa kone toimii vuorotellen generaattorina tai moottorina magneettinapojen asemasta riippuen, aiheuttaen samalla verkkoon teho- ja jänniteheilahteluja. Napakulma  $\beta$  on nimellisarvoilla kuormitetussa generaattorissa noin  $20...30^\circ$ . (Havunen ym. 1998, hakupäivä 8.1.2013; Hietalahti 2011, 92)

Tahtigeneraattorin toimintaa voidaan havainnollistaa PQ-diagrammin avulla (kuvio 6). Koneen vääntömomenttia suurennettaessa napakulma  $\beta$  kasvaa ja generaattori ryhtyy tuottamaan pätötehoa. Ylimagnetointitilanteessa tehokulma  $\varphi$  on Q-akseliin nähden alle  $90^\circ$  kulmassa, jolloin generaattori syöttää verkkoon induktiivista loistehoa. Vastaavasti alimagnetoituna tehokulma on yli  $90^\circ$ , jolloin staattorin virta on kapasitiivista ja generaattori ottaa verkosta induktiivista loistehoa. Koneen pätö- ja loistehojen pitää olla tasapainossa siten, että koneen nimellinen näennäisteho ei ylitä. Generaattorin loistehon osuutta nostettaessa pätötehon osuutta on vastaavasti laskettava, jotta kuormitusvirta pysyy nimellisarvossa ja käyttö pysyy nimellispisteessä A (kuvio 6). (Räty 2010, 16-17; Hietalahti 2011, 99)



Kuvio 6. Tahtigeneraattorin PQ-diagrammi (ABB 2000, hakupäivä 20.2.2013)

missä

A on kuormituspiste (nimelliskäyttöpiste)

B on tyhjäkäyntipiste nimellismagnetoinnilla

C on tyhjäkäyntipiste tyhjäkäyntimagnetoinnilla

D on tyhjäkäyntipiste ilman magnetointia

CA on staattorivirta

FA on nimellismagnetointivirta

DC on tyhjäkäyntimagnetointivirta

1 on vakiostaattorivirtakäyrä, staattorin lämpenemisen asettama raja

2 on vakiomagnetointikäyrä, roottorin lämpenemisen asettama raja

3 on voimakoneen pätötehoraja

4 on käytännön stabiilisuusraja

5 on alimagnetointiraja

u on staattorijännite

P on pätöteho

Q on loisteho

i on staattorivirta

$i_p$  on staattorivirran pätökomponentti

$i_q$  on staattorivirran loiskomponentti

E on tyhjäkäyntijännite nimellismagnetoinnilla

$x_d$  on pitkittäinen tahtireaktanssi

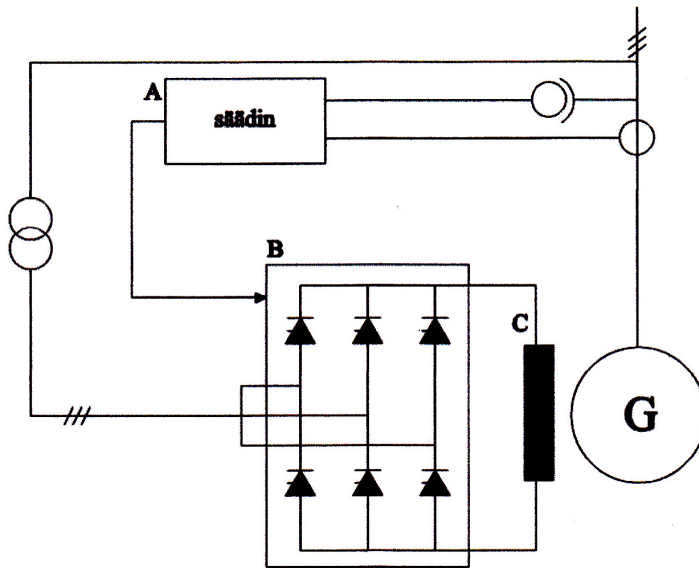
$x_q$  on poikittainen tahtireaktanssi

$\beta$  on kuormituskulma (napakulma)

$\varphi$  on tehokulma.

## 2.2 Tahtigeneraattorin magnetointi

Magnetointia tarvitaan generaattorin jännitteen tuottamiseksi. Magnetointitilanteessa tahtigeneraattorin roottorin magnetointikäämyksiin johdetaan harjojen ja liukurenkaiden avulla tasavirtaa, joka tuottaa roottoriin paikallaan pysyvän magneettivuon myös roottorin pyöriessä (kuvio 7).



Kuvio 7. Harjallinen magnetointi (Lana 2008, 21)

Elektroninen säädin A ohjaa tyristorisiltaa B, josta oikeen mukainen tasasuunnattu magnetointivirta johdetaan magnetointikäämille C hiiliharjojen kautta. (Lana 2008, 21)

Magnetointivirran muodostamaa magneettivuota kutsutaan päävuoksi. Roottorin pyöriessä staattorikäämitykseen indusoituu kolmivaiheinen sinimuotoinen lähdejännite. (Aura & Tonteri 2002, 346-347)

$$E = \omega\phi = \frac{2\pi \cdot f}{\sqrt{2}} \cdot f_k N \phi_m \approx 4,44 \cdot f_k N \phi_m, \quad (4)$$

missä

$E$  on lähdejännite

$f$  on taajuus

$f_k$  on käämityskerroin

$N$  on staattorin vaihekäämin sarjaan kytketyt johdinkierrokset

$\phi_m$  on yhden magneettinavan päävuo.

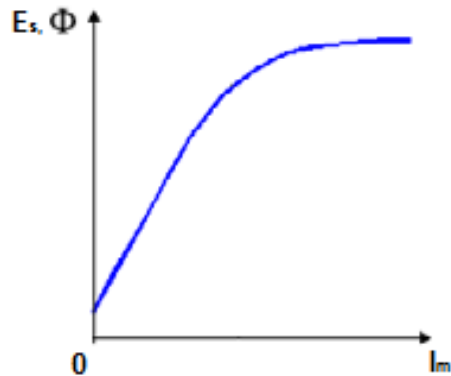
Päävuota  $\phi_m$  lukuun ottamatta kaikki muut jännitteeseen vaikuttavat tekijät ovat valmiissa koneessa vakioita, joten lähdejännite voidaan laskea seuraavasti. (Aura & Tonteri 2002, 347)

$$E = k \cdot \phi_m, \quad (5)$$

missä

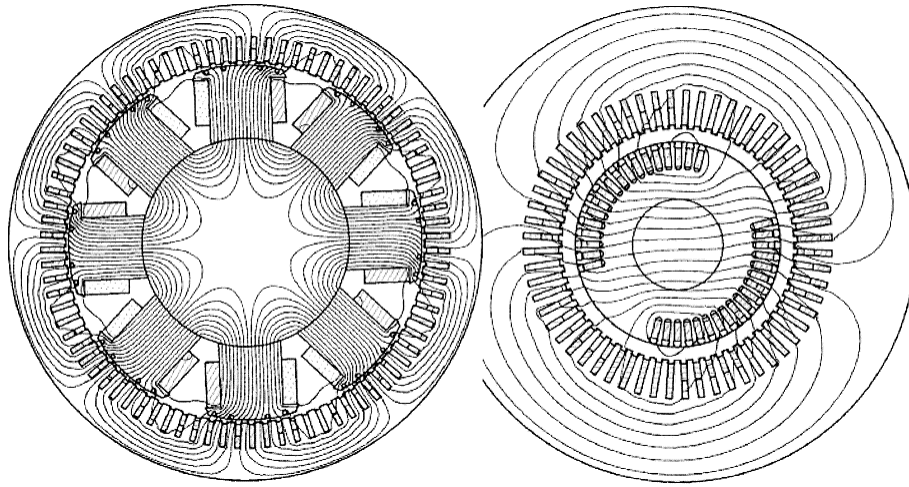
$k$  on koneen rakennetta ja raudan kyllästymistä mallintava vakio.

Magnetointivirran ollessa nolla generaattori kehittää remanenssimagneettivuosta johtuvan pienen lähdejännitteen. Lähdejännite kasvaa magnetointia lisättäessä aluksi magnetoimisvirtaan verrannollisena, mutta kasvu hidastuu magneettisen kyllästymisen seurauksena magnetointivirran ylittäessä tietyn rajan (kuvio 8). (Hietalahti 2011, 88)



Kuvio 8. Generaattorin lähdejännite magnetointivirran funktiona (Hietalahti 2011, 88)

Lähdejännitteen sinimuotoisuus saavutetaan magneettikentän muodolla ja sopivasti valitulla staattorikäädityksellä. Avonapageneraattoreissa magneettikentän muotoon voidaan vaikuttaa magneettinavan napakengän kaaren muodolla. Vastaavasti umpinapageneraattoreissa muutetaan roottorin magnetomotorista voimaa vakiona pysyvässä ilmvälissä siten, että magneettivuon tiheys muuttuu lähes sinimuotoisesti ilmvälilikehällä siirryttäessä. Staattorikäädityksessä yliaaltojen käämityskertoimet pyritään minimoimaan, jolloin  $smj$  indusoituu ainoastaan perusaallosta. Alla olevassa kuviossa on esitetty magneettikenttien kulkureitit roottori- ja staattoriraidoissa sekä koneiden ilmväleissä kuormitetulla avo- ja umpinapageneraattorilla (kuvio 9). (Aura & Tonteri 2002, 347; Hietalahti 2011, 87)



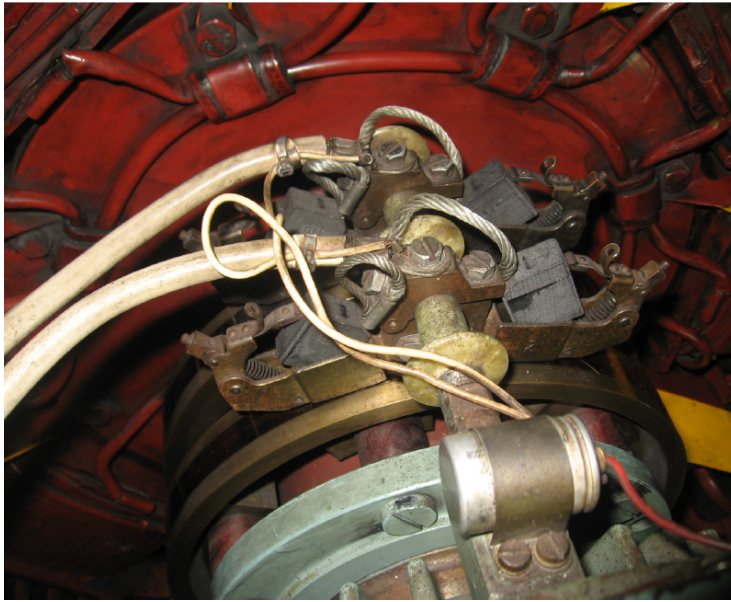
Kuvio 9. Magneettikentän muodostuminen kuormitetulla generaattorilla (Hietalahti 2011, 87)

### 2.2.1 Harjallinen magnetointi

Harjallisessa magnetoinnissa (kuvio 7) tasavirta johdetaan roottorikäämiin akselilla olevien liukurenkaiden ja niitä laahaavien hiiliharjojen välityksellä. Tasavirtalähteenä voi olla tahtikoneen kanssa samalle akselille asennettu magnetointigeneraattori tai erillinen tasasähkölähde. (Aura & Tonteri 2002, 348)

Harjallisen magnetoinnin huonona puolena on sen huoltotarve. Hiiliharjat ja liukurenkaat ovat kuluvia osia (kuva 5), joten ne vaativat säännöllistä huoltoa ja tarvittaessa vaihdon luotettavan toiminnan takaamiseksi. Toisaalta hiiliharjojen vaihtovälit voivat olla jatkuvassa käytössä vuosia. Hyvänä puolena on magnetoinnin nopea säätödynamiikka hiiliharjojen korvatussa magnetointikoneen, jolloin magnetointivirran säätö on nopeampaa pienemmän induktanssin johdosta. Generaattorin navoissa tapahtuvat jännitteen vaihtelut saadaan magnetoinnin säädöllä kompensoitua 0,15-0,3 sekunnissa. (Ilitchov 2012, 15)



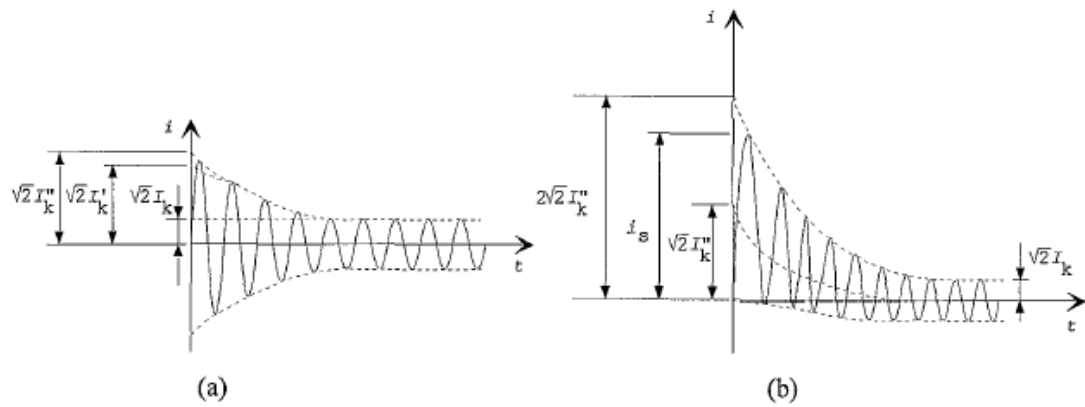


Kuva 5. Apugeneraattorin harjalaitteet (MDA Service, 2012)

### 2.3 Oikosulkuvirrat ja impedanssit

Teollisuusverkoissa oikosulkuvirrat pyrkivät kasvamaan suureksi niihin liitetystä muuntajista, generaattoreista ja sähkömoottoreista, jonka vuoksi verkon osien tulee kestää oikosulusta aiheutuvat termiset ja dynaamiset vaikutukset. Turvallisuuden ja vaurioiden välttämiseksi oikosulkuvirtojen olisi toisaalta oltava mahdollisimman pieniä. Sähköverkon suunnittelussa on tunnettava oikosulkuvirtojen suuruus jakeluverkon eri osissa ja suojauksen kannalta vallitsevalla hetkellä erilaisissa syöttötilanteissa sekä verkon mitoituksessa tulevaisuudessa tapahtuva kehitys. (Huotari & Partanen 1998, 1)

Oikosulussa on vaihtovirtakomponentin lisäksi tasavirtakomponentti, jonka vuoksi oikosulun alkutilanteessa oikosulkuvirran hetkellisarvo on vikaa edeltäneen virran suuruinen. Oikosulun tapahtuessa ajanhetkellä  $\alpha - \varphi_k = 0^\circ$  tai  $180^\circ$  tasavirtakomponenttia ei ole ja oikosulkuvirta on symmetrinen (kuvio 10a). Muussa tapauksessa oikosulkuvirta on epäsymmetrinen ja tasavirtakomponentti on suurimmillaan ajanhetkellä  $\alpha - \varphi_k = \pm 90^\circ$  (kuvio 10b).



Kuvio 10. Symmetrinen ja epäsymmetrinen oikosulkuvirta (Huotari & Partanen 1998, 4)

missä

$I_k''$  on alkuoikosulkuvirta

$I_k'$  on muutosoikosulkuvirta

$I_k$  on jatkuvan tilan oikosulkuvirta

$i_s$  on sysäysoikosulkuvirta.

Tasavirtakomponentti vaimenee jakeluverkon rakenteesta riippuvan aikavakion  $\tau$  mukaan. Kaavassa 6 impedanssin  $Z_k$  oletetaan muodostuvan tahtikoneen sekä verkon muiden komponenttien summasta, jolloin aikavakio voidaan esittää seuraavasti. (Huotari & Partanen 1998, 5)

$$\tau = \frac{X_d'' + X_n}{\omega(R_d + R_n)} \quad (6)$$

missä

$X_d''$  on generaattorin alkureaktanssi

$X_n$  on generaattorin ja vikapaikan välinen reaktanssi

$R_d$  on generaattorin resistanssi

$R_n$  on generaattorin ja vikapaikan välinen resistanssi

$\omega$  on kulmataajuus.

Oikosulkuvirran vaihtovirtakomponentti vaimenee tahti- ja epätahtikoneiden syöttämän oikosulkuvirran muodostaessa merkittävän osan kokonaisuikosulkuvirrasta.

Vaimenemisen aiheuttaa oikosulun kestoaikana tapahtuva koneiden sisäisen impedanssin kasvu. Kaavassa 7 olevalla oikosulkuvirralla tarkoitetaan oikosulun alkuketken oletettua tehollisarvoa. Muutos- ja pysyvän tilan oikosulkuvirrat lasketaan vastaavien tilojen smv:n ja reaktanssien arvoilla. (Huotari & Partanen 1998, 5-6)

$$I_k'' = \frac{E''}{\sqrt{(R_d + R_n)^2 + (X_d'' + X_n)^2}} \quad (7)$$

missä

$E''$  on generaattorin alkutilan smv

$X_d''$  on generaattorin alkureaktanssi

$R_d$  on generaattorin resistanssi

$R_n$  on generaattorin ja vikapaikan välinen resistanssi

$X_n$  on generaattorin ja vikapaikan välinen reaktanssi.

Generaattoreiden smv suuruudet riippuvat kuormitusvirran suuruudesta juuri ennen oikosulkutilannetta kaavan 8 mukaisesti. Muutos- ja pysyvän tilan oikosulkuvirrat lasketaan vastaavien tilojen smv:n ja reaktanssien arvoilla. (Huotari & Partanen 1998, 6)

$$E'' = \underline{U}_{ng} + jX_d'' \cdot \underline{I} \quad (8)$$

missä

$\underline{U}_{ng}$  on tahtikoneen nimellinen vaihejännite

$\underline{I}$  on tahtikoneen kuormitusvirta ennen oikosulkua.

Tyhjäkäynnissä olevan generaattorin smv lasketaan kaavan 9 ja oikosulkuvirran vaihtokomponentin aikavakiot kaavalla 10. Muutostilan aikavakiot lasketaan vastaavan tilan reaktanssin ja muutosaikavakion arvoilla. (Huotari & Partanen 1998, 7)

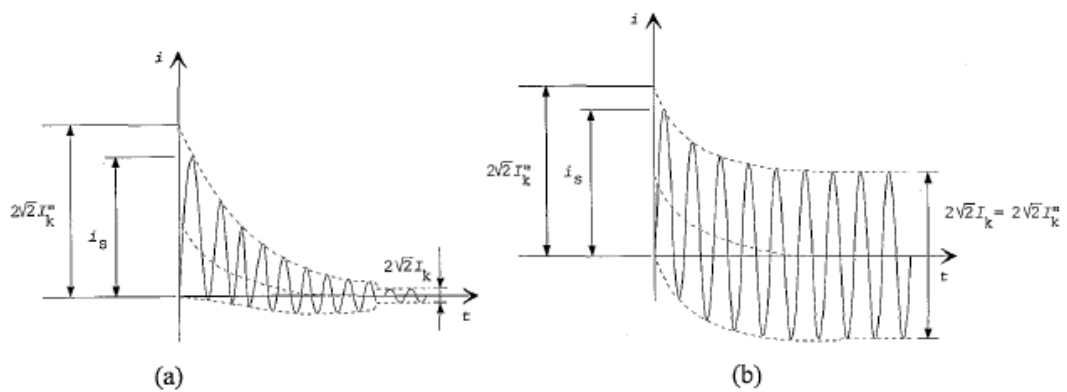
$$E'' = E' = E = \frac{U_{ng}}{\sqrt{3}} \quad (9)$$

$$\tau'' = \frac{X_d'' + X_n}{X_d' + X_n} \cdot \tau_{d0}'' \quad (10)$$

missä

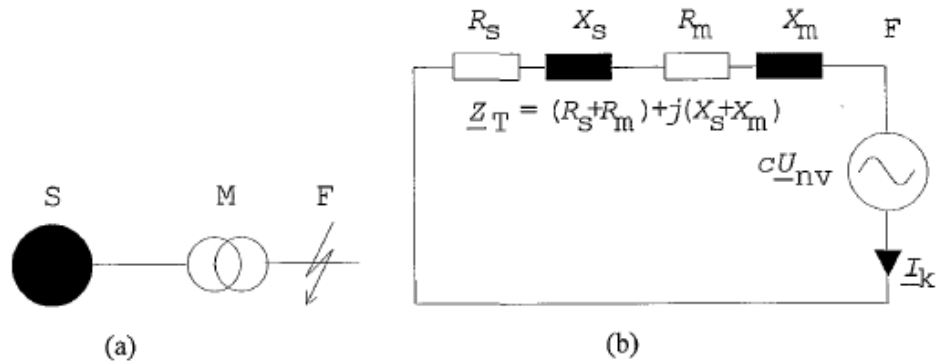
$\tau_{d0}''$  on tyhjäkäyntitilan alkuajakavakio.

Oikosulun aikana generaattorin impedanssin muutoksella ei ole kokonaisimpedanssin kannalta suurta merkitystä, kun generaattorin ja vikapaikan impedanssi kasvaa suureksi generaattorin impedanssiin verrattuna. Tuolloin oikosulkuvirran vaihtokomponentti ei vaimene, koska oikosulkuvirrat  $I_k''$ ,  $I_k'$  ja  $I_k$  tulevat samansuuruisiksi (kuvio 11b). Sitä vastoin vaihtokomponentti vaimenee eksponentiaalisesti aikavakioilla  $\tau''$  ja  $\tau'$  kohti pysyvän tilan arvoja oikosulun ollessa generaattorin lähellä (kuvio 11a). (Huotari & Partanen 1998, 7)



Kuvio 11. Oikosulkuvirta eri etäisyyksillä generaattorista (Huotari & Partanen 1998, 7)

Teollisuusverkon oikosulkuvirrat lasketaan Thevenin menetelmällä, jolloin vikapaikkaan muodostuvien useiden eri oikosulkulähteiden syöttämien oikosulkuvirtojen sähkömotoriset voimat voidaan korvata yhdellä vikapaikkaa sijoitetulla smv:llä. Menetelmässä kolmivaiheinen verkko korvataan yksivaiheisella sijaiskytkennällä (kuvio 12). (Huotari & Partanen 1998, 8)



Kuvio 12. Thevenin laskentamenetelmä (Huotari & Partanen 1998, 8)

missä

$S$  on syöttävä verkko

$M$  on muuntaja

$F$  on kolmivaiheinen vastukseton oikosulkupaikka

$R_S$  on syöttävän verkon oikosulkuresistanssi

$X_S$  on syöttävän verkon oikosulkureaktanssi

$R_m$  on muuntajan oikosulkuresistanssi

$X_m$  on muuntajan oikosulkureaktanssi

$\underline{Z}_T$  on oikosulkuimpedanssi.

Kuvion 12 mukainen kolmivaiheinen oikosulku voidaan määrittellä Thevenin sijaiskytkennän perusteella seuraavasti.

$$\underline{I}_k = \frac{c \cdot \underline{U}_{nv}}{\underline{Z}_T} \quad (11)$$

missä

$\underline{U}_{nv}$  on verkon nimellisvaihejännite

$\underline{Z}_T$  on impedanssi vikapaikan jännitetasoon redusoituna

$c$  on jännitekerroin, jolla huomioidaan sähkömotoristen voimien ja verkon nimellisjännitteen ero (taulukko 1).

Taulukko 1. Jännitekerroin standardin VDE 0102 mukaan (Huotari &amp; Partanen 1998, 9)

Nimellisjännite $U_n$	Suurinta oikosulkuvirtaa laskettaessa $c_{maks}$	Pienintä oikosulkuvirtaa laskettaessa $c_{min}$
Pienjännite 100 V - 1000 V		
a) 230/400 V	1,00	0,95
b) muut jännitteet	1,05	1,00
Keskijännite 1 kV - 35 kV	1,10	1,00
Suurjännite 35 kV - 230 kV	1,10	1,00

Kolmivaiheisen eli symmetrisen oikosulun laskennassa esiintyy vain myötäimpedansseja eli komponenttien tavallisia oikosulkuimpedansseja. Epäsymmetrisen oikosulun laskennassa verkon eri osille on lisäksi muodostettava vastaja nollaimpedanssit. Teollisuussähköverkot ovat yleensä maasta erotettuja, jolloin oikosulut rajoittuvat kaksi- ja kolmivaiheisiin oikosulkuihin. Oikosulkuvirrat lasketaan seuraavasti. (Huotari & Partanen 1998, 9-10).

$$I_{k3} = \frac{c \cdot \underline{U}_N}{\sqrt{3} \cdot \underline{Z}_1} \quad (12)$$

$$I_{k2} = \frac{c \cdot \underline{U}_N}{\underline{Z}_1 + \underline{Z}_2} \quad (13)$$

$$I_{k1} = \frac{\sqrt{3} \cdot c \cdot \underline{U}_N}{\underline{Z}_1 + \underline{Z}_2 + \underline{Z}_0} \quad (14)$$

missä

$I_{k3}$  on kolmivaiheinen oikosulkuvirta

$I_{k2}$  on kaksivaiheinen oikosulkuvirta

$I_{k1}$  on yksivaiheinen oikosulkuvirta

$\underline{U}_N$  on vikapaikan pääjännite

$\underline{Z}_1$  on myötäimpedanssi

$\underline{Z}_2$  on vastaimpedanssi

$\underline{Z}_0$  on nollaimpedanssi.

Kaksivaiheinen oikosulkuvirta saadaan laskettua kolmivaiheisen oikosulkuvirran avulla seuraavasti.

$$\underline{I}_{k2} = \frac{\sqrt{3}}{1 + \frac{\underline{Z}_2}{\underline{Z}_1}} \cdot \underline{I}_{k3} \quad (15)$$

Myötä- ja vastaimpedanssit ovat samansuuruiset muuntajilla, johdoilla, epätahtimoottoreilla sekä ei pyörivillä laitteilla. Sitä vastoin tahtikoneilla impedanssit poikkeavat toisistaan. Oikosulun alkuhetkillä tahtikoneen ja näin ollen koko oikosulkupiirin myötä- ja vastaimpedanssit ovat samansuuruiset. Tahtikoneen myötäreaktanssi saavuttaa oikosulun kestoaikana tahtireaktanssin arvon, jolloin vastaimpedanssin suhde myötäimpedanssiin on 0,1...0,15. Tämän seurauksena tahtikoneen lähellä tapahtuvan kaksivaiheisen oikosulun pysyvän tilan oikosulkuvirta voi olla jopa 1,4 x kolmivaiheinen oikosulkuvirta. Todellisuudessa kaksivaiheinen oikosulkuvirta on aina kolmivaiheista pienempi, koska yleensä oikosulku ei kestä pysyvän tilan arvoon saakka. (Huotari & Partanen 1998, 11)

Syöttävä verkko, tahtikoneet ja epätahtimoottorit ovat oikosulkuvirtaa syöttäviä komponentteja, joista verkko ja generaattorit tuottavat suurimman osan. Tahti- ja epätahtimoottoreiden syöttämä oikosulkuvirta on erityisesti huomioitava sysäyoikosulkuvirran määrittämisessä. Oikosulkuvirtaa rajoittavat komponenttien impedanssit, kuten muuntajat, kuristimet, johdot, kaapelit ja kiskot. Tahtikoneen reaktanssit voidaan määrittää kaavalla 16, reaktanssit, resistanssit ja aikavakiot löytyvät generaattorin valmistajalta. (Huotari & Partanen 1998,15, 17)

$$X = \frac{x}{100} \cdot \frac{U_n^2}{S_n} \quad (16)$$

missä

$x$  on suhteellinen alku-, muutos- tai tahtireaktanssi

$U_n$  on nimellispääjännite

$S_n$  on nimellinäennäisteho.

Sysäysoikosulkuvirran laskennassa käytetään oletettuja, oikosulkuvirran vaimenemisen ensimmäisen puolijakson aikana huomioivia generaattorin resistanssiarvoja (taulukko 2). (Huotari & Partanen 1998, 17)

Taulukko 2. Tahtikoneiden oletetut resistanssiarvot (Huotari & Partanen 1998, 17)

Nimellisjännite/kV	Nimellisteho/MVA	$R_d/X_d''$
>1	≥100	0,05
>1	<100	0,07
≤1	kaikki	0,15

Käytettäessä alku- ja sysäysoikosulkuvirran laskentaan ekvivalenttista jännitelähdettä kaavan 11 mukaisesti, on tahtikoneen resistanssi ja reaktanssi määriteltävä seuraavasti. (Huotari & Partanen 1998, 17)

$$K_G = \frac{U_n}{U_{nGM}} \cdot \frac{c_{maks}}{1 + x_d'' \sin \varphi_{nGM}} \quad (17)$$

missä

$c_{maks}$  on jännitekerroin

$U_n$  on verkon pääjännite

$U_{nGM}$  on generaattorin ja moottorin pääjännite

$x_d''$  on tahtigeneraattorin tai -moottorin suhteellinen alkureaktanssi

$\varphi_{nGM}$  on generaattorin tai moottorin nimellisvirran ja -jännitteen välinen kulma.

Alkuoikosulkuvirta on oikosulun syntyhetkellä oleva oikosulkuvirran vaihtovirtakomponentin tehollisarvo, jota ei käytetä suojauksen ja mitoituksen määrittämisessä. Sysäys- eli dynaaminen oikosulkuvirta on suurin mahdollinen oikosulkuvirran hetkellisarvo n. 10 ms:n kuluttua oikosulun syntyhetkestä ja sitä käytetään laitteiden mekaaniseen mitoitukseen. Jatkuvan tilan oikosulkuvirrassa kaikki muutosilmiöt ovat vaimentuneet. (Huotari & Partanen 1998, 23, 25)

$$i_s = \kappa \cdot \sqrt{2} \cdot I_k'' \quad (18)$$

missä

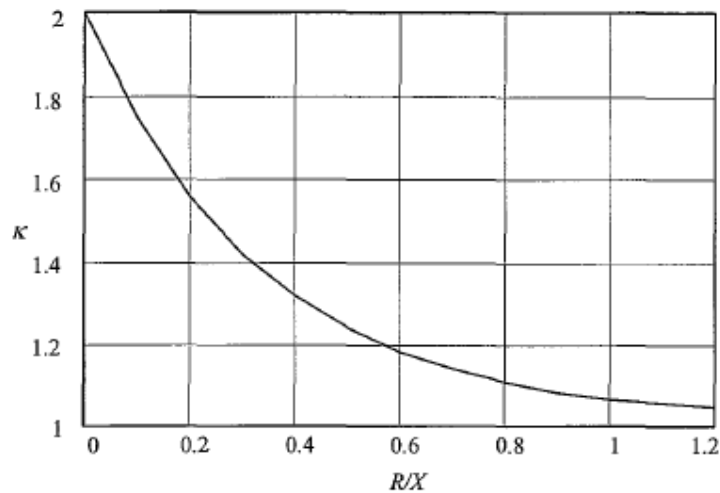


$I_k''$  on oikosulkuvirran tehollisarvo

$\kappa$  on sysäyskerroin.

Sysäyskerroin riippuu oikosulkupiirin resistanssin ja reaktanssin suhteesta ja saadaan ratkaistua kaavalla 19, kuviosta 13 tai taulukosta 3 pienjännitejakoelujärjestelmässä. (Huotari & Partanen 1998, 24)

$$\kappa = 1,02 + 0,98e^{-\frac{3R}{X}} \quad (19)$$



Kuvio 13. Sysäyskerroimen määrittäminen (Huotari & Partanen 1998, 24)

Taulukko 3. Sysäyskerroimet pienjännitteellä (Huotari & Partanen 1998, 24)

$I_k''/kA$	$\kappa$	$\cos\varphi$
$\leq 10$	1,2	0,5
$\leq 20$	1,4	0,3
$\leq 50$	1,5	0,25
$> 50$	1,6	0,2

Jatkuvan tilan oikosulkuvirta riippuu mm. tahtigeneraattoreiden magnetointitavasta ja säädöstä, generaattoreiden automaattisesta jänniteensäädöstä sekä verkon kytkentätilanteiden muutoksista oikosulun aikana, jonka vuoksi sille ei voi laskea tarkkaa arvoa. Oikosulkuvirran arvoa ei voida tarkkaan ratkaista, koska yleensä suojaukset ehtivät toimia ennen jatkuvan tilan saavuttamista. Suurin jatkuvan tilan oikosulkuvirta voidaan laskea tahtikoneille seuraavasti.

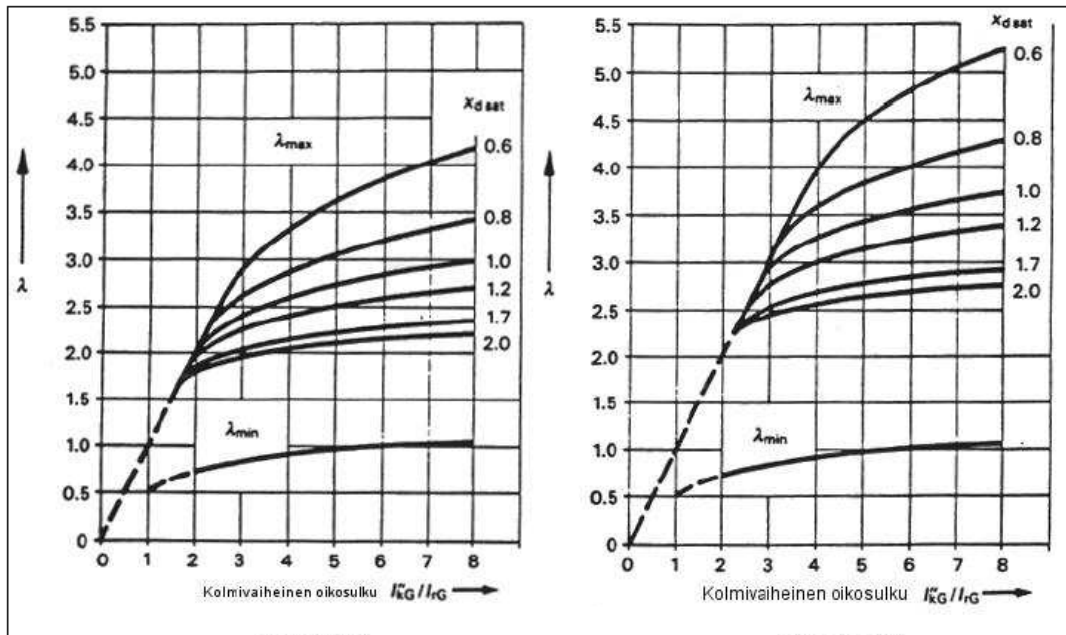
$$I_{k \max} = \lambda_{\max} \cdot I_n \quad (20)$$

missä

$\lambda_{\max}$  on maksimimagnetointia vastaava kerroin

$I_n$  on generaattorin nimellisvirta.

Avonapatahtigeneraattorin  $\lambda_{\max}$  saadaan kuvioista 14. Vasemmanpuoleisessa kuviossa generaattorin suurin magnetointijännite on 1,6-kertainen ja oikeanpuoleisessa 2,0-kertainen nimellismagnetointijännitteeseen verrattuna. (Salmi 2008, 24)



Kuvio 14. Kertoimen määrittäminen avonapatahtigeneraattorille (Salmi 2008, 24)

## 2.4 Generaattorin suojaus

Generaattorin suojaus koostuu komponenteista, joita ovat mittamuuntajat, katkaisijat ja suojareleet. Lisäksi suojausjärjestelmään liittyvät apuenergiälähteet, hälytys- ja raportointikeskukset sekä mittaus-, laukaisu- ja tiedonsiirtoyhteydet. (Mörsky 1992, 16)

### 2.4.1 Virtamuuntaja

Virtamuuntajissa (kuva 6) on yleensä useita toisiokäämityksiä, joilla on erilaisia vaatimuksia käyttötarkoituksesta riippuen. Mittauskäämityksillä varustettuja muuntajia käytetään yleensä laskutusmittauksiin. Suojauskäämityksellinen virtamuuntaja on tarkkuudeltaan huonompi, mutta ne eivät kyllästy niin helposti vikavirtatilanteissa ja soveltuvat näin paremmin suojaukseen. Yleisimmät toisiopiirin nimellisvirrat ovat 1 A ja 5 A. (Häsä 2009, 9)

Virtamuuntajan suojaussydämen tärkein ominaisuus on sen kyky toistaa virtoja oikosulkutilanteissa, jolloin kyllästymistä ei saisi tapahtua suurillakaan virran hetkellisarvoilla. Tämän vuoksi virtamuuntajan valinta ja suojausten mitoitus on tehtävä huolellisesti. Suojareiden valmistajilla on myös omat kriteerinsä toimittamiensa laitteiden kanssa käytettäville virtamuuntajille. (Häsä 2009, 9)

Virtamuuntajan tehtävänä on erottaa galvaanisesti ensiö- ja toisiopiiri toisistaan ja siten suojata toisiopiiriin kytkettyjä laitteita ylivirroilta ensiöpiirissä tapahtuvan vian aikana, muuntaa ensiöpiiriin virta sopivaan arvoon toisiopiiriin mittalaitteelle tai releelle sekä mahdollistaa mittalaitteiden ja releiden sijoitus etäälle virtamuuntajista mitoittaessa toisiopiiriin johtimet sopivan mittaisiksi. (Aura & Tonteri 2002, 296)



Kuva 6. Kiskovirtamuuntaja (ABB Oy, hakupäivä 1.3.2013)

Virtamuuntajien pysyminen tarkkuusluokassaan edellyttää virtamuuntajien ja johtimien valintaa siten, että ne muodostavat 25...100 % taakan mittamuuntajien nimellistaakasta. Mittauspiirissä voidaan käyttää tarvittaessa vastuksia riittävän taakan saavuttamiseksi.

Nykyaikaisten staattisten energiamittareiden pientä taakkaa ei tarvitse huomioida laskelmissa. (Polarmit Oy 2007, 1)

Mittauspiirin taakka voidaan määrittää laskemalla seuraavasti.

$$S_j = I_{sn}^2 \cdot \rho \cdot \left( \frac{l}{A_j} \right), \quad (21)$$

missä

$S_j$  on johtimen taakka

$I_{sn}$  on toisiopiirin nimellisvirta

$\rho$  on johtimen ominaisvastus

$l$  on johtimen pituus

$A_j$  on johtimen poikkipinta-ala.

Virtamuuntajan mittaussydämelle sallitut virheiden enimmäisarvot soveltuvat 25...100 % taakoille mitoitustaakasta tarkkuusluokissa 0,1...1 ja 50...100 % taakoille mitoitustaakoista luokissa 3 ja 5 (taulukko 1). Virheitä mitattaessa taakan tehokerroin on 1 taakan ollessa alle 5 VA, muussa tapauksessa tehokerroin on 0,8ind. Luokkien 0,2S ja 0,5S tarkkuudet määritellään 1 % virtaan saakka. (Uski 2001, 19)

Taulukko 4. Virtamuuntajan mittaussydämen virhearvot (Uski 2001, 19)

Virtamuuntajan tarkkuusluokka	Virtavirhe ± %					Kulmavirhe ± '			
	$a =$	$I_p = a \cdot I_{pn}$					$I_p = a \cdot I_{pn}$		
	0,05	0,2	0,5	1,0	1,2	0,05	0,2	1,0	1,2
0,1	0,4	0,2		0,1	0,1	15	8	5	5
0,2	0,75	0,35		0,2	0,2	30	15	10	10
0,5	1,5	0,75		0,5	0,5	90	45	30	30
1	3,0	1,5		1,0	1,0	180	90	60	60
3			3,0		3,0				
5			5,0		5,0				

## 2.4.2 Katkaisija

Katkaisija on sähköverkon ensiöpiirin osa, jonka on kyettävä suorittamaan kaikki tarvittavat kytkentätoimenpiteet siinä paikassa, mihin se on sijoitettu. Katkaisijat voivat olla varustettu suojareleellä, esimerkiksi Schneider Electricin Masterpact NW-katkaisijat ovat aina varustettu vaihdettavalla, elektronisella suojareleellä (kuva 7). Suojareleet antavat katkaisijan auki- tai kiinniohjauskelalle koskettimiensa välityksellä oikea-aikaisia toimintaohjeita. Katkaisijaa voi ohjata myös paikallisesti (mekaanisesti) katkaisijan painikkeilla tai sähköisesti etäohjauksella esim. valvomosta. Etäohjauksella toiminnon suorittaa kiinni-ohjauksessa kiinnitykentäkela ja auki-ohjauksessa työvirtalaukaisija tai alijännitelaukaisija. Katkaisijalle on saatavissa lisävarusteena mm. apukoskettimia ja apulaitteita, kuten automaattisesti katkaisijan jousimekanismin virittävän moottoriohjaimen. Katkaisijalta on kytkettävissä useita tilatietoja esim. valvontajärjestelmään potentiaalivapaiden vaihtokoskettimien välityksellä. (Mörsky 1992, 16; Schneider Electric, hakupäivä 8.5.2013)

Jäänmurtaja Urhossa generaattorikatkaisijoilla ja hätätaulun kiskokatkaisijalla etäohjaus on mahdollista kojeistojen ovissa olevilta painikkeilta tai PMS-järjestelmän ohjaamana. Lisäksi katkaisijan voi laukaista kojeiston ovesta olevasta 0-1-valintakytkimestä. Katkaisijoiden auki-ohjaus on toteutettu alijännitelaukaisijalla ja sen kanssa sarjaan kytketyllä viiveyksiköllä. Viiveyksikön tehtävänä on estää katkaisijan avautuminen lyhyiden jänniteheilahtelujen aikana.



Kuva 7. Ulosvedettävä Masterpact NW-katkaisija (Schneider Electric, hakupäivä 9.3.2013)

### 2.4.3 Suojarele

Suojareleiden tärkeimpänä tehtävänä on vikojen havaitseminen, vika-alueen rajoittaminen mahdollisimman pieneksi sekä sitä kautta suojata sähköverkon laitteita. Generaattorikäytössä yleisimpiä vikatilanteita ovat ylivirta, yllämpö, maasulku, ylijännite, epäsymmetrinen kuormitus, taajuuspoikkeama, takateho ja ryntäys. Jännitteen ja virran mittaukseen perustuvat suojareleet liitetään toisiopiireihin. Ensiöpiireissä on vielä tyypillisesti lämpötilaan, paineeseen ja muihin ei sähköisiin suureisiin perustuvia suoja. Suojareletyypit jaetaan kolmeen eri sukupolveen; sähkömekaanisiin, staattisiin ja numeerisiin suojiin (kuva 8). (Häsä 2009, 9; Laiti 2010, 21-22)



Kuva 8. Sähkömekaaninen, staattinen ja numeerinen suojarele (ABB Oy, hakupäivä 3.3.2013)

Sähkömekaaniset suojareleet ovat vanhimpia toisiopuolelle liitettäviä laitteita ja niiden toimintaperiaate on perustunut erilaisiin mekaanisiin komponentteihin. Havahtumisrajasta käynnistyvän aseteltavan viiveen kuluttua rele antaa katkaisijalle ohjauskäskyn, ellei ylivirta putoa havahtumisrajan alle ennen viiveajan päättymistä. Sähkömekaanisten suojareleiden huonona puolena on niiden tehon kulutus, joissain tapauksissa jopa 10...20 VA vaiheelta sekä mekaaninen hitaus. Hitauden vuoksi rele seuraa valvottavan suureen tehollisarvoa. Samasta syystä rele ei kykene seuraamaan virhetoimintoihin johtavia oikosulun alussa esiintyviä nopeita muutosilmiöitä. (Häsä 2009, 10; Martimo 2011, 12)

Staattisissa suojareleissä toiminta perustuu elektronisilla komponenteilla varustettuihin logiikkapiireihin, jossa valvottavat suuret muutetaan releen sisäisillä ylijännitteiltä ja -virroilta suojaavilla sovitustuuntajilla elektroniikalle sopivaksi. Hyviä puolia

sähkömekaanisiin suojaroleisiin nähden on mm. nopea toiminta-aika, pieni tehonkulutus ja fyysinen koko, hyvä värinänkestävyys ja monipuolisempi tiedonkäsittely. Vastaavasti huonoja puolia sähkömekaanisiin releisiin verrattuna ovat apuenergian tarve ja häiriöherkkyys. (Martimo 2011, 12-13)

Numeeriset suojaroleet perustuvat mikroprosessoritekniikkaan, joten ne eivät sisällä liikkuvia osia tai huoltoa tarvitsevia komponentteja. Etuja em. suojaroleityyppeihin nähden on laitteen sisältämät useat suojaus- mittaus- sekä I/O-toiminnot, joka johtaa pienempään tilantarpeeseen. Muita etuja ovat tallentava omavalvonta sekä kaukokäyttömahdollisuus. (Häsä 2009, 11)

### 3 PMS-JÄRJESTELMÄ

Laivan sähköntuotannon ohjausjärjestelmä (eng. Power Management System, PMS-järjestelmä) koostuu konekohtaisista ohjaus- ja suojausyksiköistä, joiden tehtävänä on hallita dieselgeneraattoreiden toimintoja, kuten automaattisia käynnistyksiä ja sammutuksia ja sitä kautta huolehtia laivan sähköntuotannosta kuormitustilanteesta riippuen. Lisäksi järjestelmän tehtävänä on suojata dieselmootoreita ja generaattoreita tuotantokatkoksia aiheuttavilta häiriöiltä. Suojaustoimenpiteitä ovat esimerkiksi koneen pysäytys moottorin öljyn paineen laskiessa tai jäähdytysveden lämpötilan noustessa yli asetusarvon sekä generaattorikatkaisijan laukaisu ylikuormitustilanteessa tai takatehon ylittyessä generaattoreiden rinnankäytöllä. PMS-järjestelmä osallistuu satamassa aluksen sähkönjakeluun maasyötön ohjaus- ja suojausyksiköllä. Yksikkö hoitaa maasyötön katkaisijan ohjaus- ja suojaustoimenpiteet sekä osallistuu osana PMS-järjestelmää laivan sähköntuotantoon esimerkiksi kuorman siirrossa maasyötöltä generaattoreille ja päinvastoin.

Urhon vanha PMS-järjestelmä oli toteutettu Strömbergin yksikkörakenteisella SSE-dieselautomaattikajärjestelmällä. Järjestelmä oli koottu toiminnallisista kokonaisuuksista, johon sisältyi erikseen valittavat komponentit ja toiminnallisuudet kuten dieselien ohjausyksiköiden kehikot, piirikortit ja releet (kuva 9). Toiminnallisuus on käsittänyt mm. dieselmootorin käynnistys-, valvonta- ja pysäytystoiminnot sekä generaattoreiden tehonsäädön.

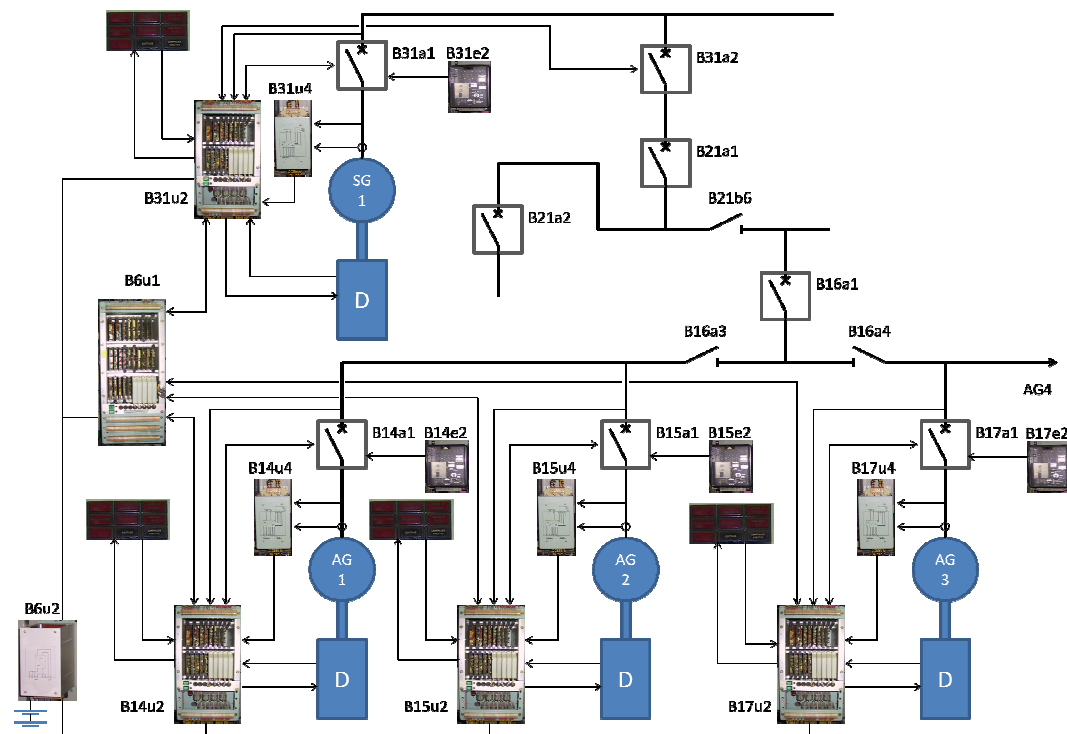


Kuva 9. Apudieselgeneraattorin ohjausyksikkö



Kuvassa 9 oleva apudieselgeneraattorin ohjausyksikköön on koottu kehikon, riviliittimien, piirikorttikehikon ja releiden lisäksi mm. jännitteen ja nopeuden valvontapiiri dieselin kierrosluvun, generaattorin jännitteen ja automatiikan apujännitteen valvontaan, käynnistys- ja pysäytyspiirit molempia toimintoja varten sekä niiden valvontaan, vikavalvontapiiri generaattorin vikojen valvontaan sekä tahdistuskäskyapiiri generaattorin tahdistusta, tehon ohjearvon pudottamista ja katkaisijan auki-ohjausta varten.

Vanha PMS-järjestelmä (kuvio 15) koostui keskusyksiköstä (K-yksikkö) B16u1, viidestä dieselgeneraattorikohtaisesta automatiikkayksiköstä (A-yksikkö) B14-B18u2 ja B31u2, generaattoritehon mittamuuntimista (P-yksikkö) B14-B18u2 ja B31u2 sekä generaattorisuojista B14-B18e2 ja B31e2. Lisäksi A-yksiköihin oli liitetty kojeistojen oviin asennetut hälytysmerkkilamput ja häiriönkuittauspainikkeet (M-yksikkö). A- ja K-yksiköt saivat 48 VDC käyttöjännitteen akkujännittestabilaattorilta B16u2. Tilanpuutteen vuoksi järjestelmäkaaviossa ei ole esitetty AG4:sta ja siihen liittyviä laitteita.



Kuvio 15. Vanha PMS-järjestelmä

K-yksikkö sisälsi dieselgeneraattoreiden yhteiset ohjaukset ja toiminnot, jotka eivät suoraan ohjanneet dieselgeneraattoreita. Sitä vastoin A-yksikkö sisälsi suoraan

dieselgeneraattoreita ohjaavat piirit. Seuraavassa on lueteltu yksiköiden ohjaukset ja toiminnot.

K-yksikön tehtävät:

- käynnistää apu- tai hätä-/satamadieselgeneraattori käynnistysjärjestyksen mukaisesti A-yksikön välityksellä sekä hallita dieselgeneraattoreiden toimintoja
- ohjata kallistuspumput tai hinausvintturi käyntiin konekohtaisen käynnistyspyynnön perusteella
- järjestää tehon ennakkovaraus antamalla A-yksiköiden välityksellä käynnistys- ja tahdistusluvan riittävälle määrälle dieselgeneraattoreita kallistuspumppujen tai hinausvintturin käytön yhteydessä
- välittää yksikön 48 VDC alijännitteen hälytyssignaali valvontajärjestelmään.

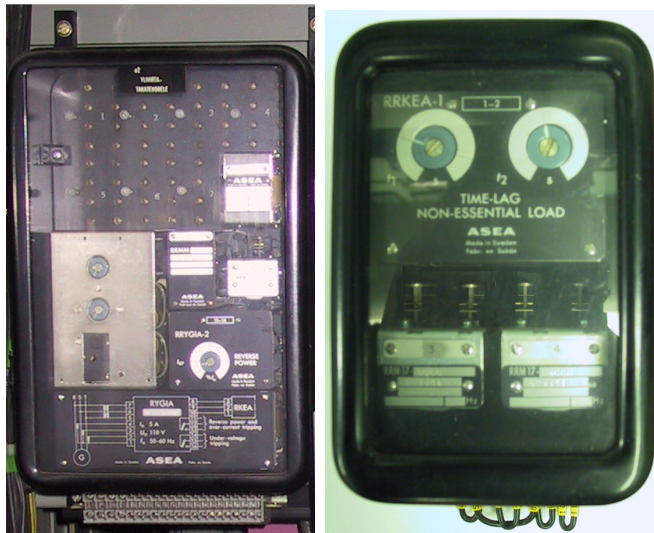
A-yksikön tehtävät:

- ohjata dieselgeneraattoria K-yksiköltä saatavien käskyjen perusteella
- käynnistää ja pysäyttää dieselmoottori
- valvoa dieselin pyörimisnopeutta takometrilta tulevan jännitesignaalin perusteella
- ohjata generaattorikatkaisija auki tai kiinni, hätä-/satamadieselgeneraattorilla lisäksi kiskokatkaisija kiinni
- tehdä tarvittavat dieselin suojaustoimenpiteet öljynpaineen tai jäähdytysveden lämpötilan hälyttäessä
- lähettää hälytyssignaalit K-yksikölle, kojeiston merkkilampuille sekä valvontajärjestelmään.

P-yksikkö määrittelee virran ja jännitteen perusteella generaattorin tehon sekä muuntaa sen A-yksikölle sopivaksi 0...10 V jänniteviestiksi. A-yksikkö välittää signaalin K-yksikölle, joka tekee generaattoreiden kuormanjaon sekä kuormituksen kannalta tarvittavat säätötoimenpiteet ja lähettää tehon ohjearvon vastaavalla jänniteviestillä takaisin A-yksikölle.

Generaattoreiden suojaus oli toteutettu staattisella suojareleellä (kuva 10), jossa oli ylikuormitus-, ylivirta- ja oikosulku-, takateho- sekä alijännitesuojaustoiminnot. Suojarele oli kytketty sarjaan kojeiston ovesa olevien A- ja kW-mittareiden kanssa generaattorin virtamittauksen toisiopiiriin. Generaattorisuojat muodostivat yhdessä

epäolennaisen kuorman katkaisevan aikareleen (kuva 10) kanssa preference-trip-järjestelmän, jonka tarkoituksena oli katkaista vähemmän tärkeiden kuluttajien kuormat kahdessa portaassa. Generaattoreiden suojarieleet oli kytketty rinnan aikareleen ohjauspiiriin. Ylikuormitusilanteessa generaattorisuojassa olevan ylikuormitusreleen vahvistinpiiri syötti aikareleen ohjauspiiriä, joka katkaisi kuorman asetellun viiveen kuluttua. Järjestelmän 1. portaaseen on liitetty keittiö, lämmitys, sisä- ja konetilan tuulettimet sekä puolet pääkoneiden tuulettimista. 2. portaaseen on liitetty kallistuspumput.



Kuva 10. Generaattorisuoja ja epäolennaisen kuorman katkaiseva aikarele

## 4 UUSI PMS-JÄRJESTELMÄ

Vanhan ja uuden järjestelmän vertailu tehtiin tutustumalla kohteen modernisointivaatimuksiin, piirikaavioihin ja toimintaselostukseen, joiden perusteella määriteltiin uusi PMS-järjestelmä. Alus on Suomen merenkulkuviranomaisten luokittelema, joten modernisoinnin ensisijaisena vaatimuksena oli toteuttaa vastaavat toiminnot kuin vanhassa järjestelmässä. Lisäksi erikseen haluttiin täyttää myös merenkulun e0 luokitusvaatimukset. E0 vaatimuksissa noudatettiin pääasiassa DNV standardia ja säännöksiä. Kaikki uudet komponentit tuli olla ensisijaisesti DNV:n tai mahdollisesti jonkun muun vastaavan luokituslaitoksen laivakäyttöön hyväksymiä komponentteja.

Modernisoinnissa oli seuraavia vaatimuksia:

- kaikissa asennuksissa ja muutoksissa käytetään mahdollisuuksien mukaan nykyisiä kaapeleita
- uusissa laitteissa käytetään ensisijaisesti kenttäväylää tai hajautettua I/O:ta
- modernisoitavat laitteita ovat generaattoreiden ja maasyötön suojareleet sekä PMS-ohjausjärjestelmä sekä generaattoreiden jännitteensäätäjät (magnetointisäätimet)
- nykyisen automaation taso säilytetään
- mahdollinen liitäntä automaatiojärjestelmään tehdään väyläyhteydellä.

Generaattoreiden jännitteensäätimet modernisoitiin vaihtamalla olemassa olevien Strömberg SMUJ säätimien tilalle Protaccon Oy:n Siemens Sinamics teknologiaan perustuvat jännitteensäätimet. (Vuorinen 2013)

### 4.1 DNV-vaatimukset laivan sähköntuotannolle

Aluksella on oltava kaksi molemminpuolisesti itsenäistä ja toisista riippumatonta sähkönjakelujärjestelmää; pääsähkönjakelujärjestelmä ja hätäsähkönjakelujärjestelmä. Aluksen normaalikäyttöön vaadittavat toiminnot on oltava toimintakunnossa hätäsähkönjakelun ollessa käytössä samalla kun pääsähkönjakelu on poikki, ellei toimintoja syötetä vain hätäjakelujärjestelmästä. (DNV 2011, 21)

Pääsähkönjakelujärjestelmästä syötetään kuluttajat, joiden toiminnot ovat välttämätöntä olla saatavilla normaalikäytössä. Poikkeus tehdään yhdelle ylimääräiselle kuluttajalle, joka vaaditaan kylmän laivan saattamiseksi toimintakuntoon. Hätäsähkönjakelujärjestelmästä syötetään kuluttajat, jotka on välttämätöntä olla saatavilla hätäkäytössä. Määräyksiä on sovellettu kuluttajille, jotka vaativat molemmat jakelujärjestelmät toimintojen varten. Ensisijaisesti syöttö tulee pääjärjestelmästä. (DNV 2011, 21)

#### 4.1.1 Generaattorit

Rinnankäyvien generaattoreiden tehonjako on oltava sellainen, että jaettava pätö- ja loisteho pysyvät vakaina kaikilla kuormilla. Jokaisen generaattorin nimellisvirrasta sallitaan alle  $\pm 20$  % heilahtelut. (DNV 2011, 78)

Jokaisen generaattorin nimellisellä 20...100 % loistehoalueella todellinen pätöteho (keskiarvo, jos vaihteluja esiintyy) saa poiketa suhteellisesta kokonaisloistehokuorman jaosta enintään 10 % rinnalla olevan suurimman generaattorin tai enintään 25 % pienimmän generaattorin nimellisestä loistehokuormasta, jos tämä on vähemmän kuin edellinen. (DNV 2011, 78)

#### 4.1.2 Hätägeneraattori

Hätätehon lähteen on kytkeydyttävä automaattisesti hätätauluun pääsähkönjakelujärjestelmän toimintahäiriön sattuessa. Jos tehonlähde on generaattori, sen on käynnistytävä automaattisesti ja syötettävä 45 sekunnissa vähintään hätä- ja siirtotehoa vaativia toimintoja. (DNV 2011, 27)

Hätätehon lähde ei saa käyttää sähkönjakeluun aluksen ollessa normaalikäytössä. Poikkeuksellisesti ja lyhyellä aikavälillä sitä voidaan käyttää blackout-tilanteissa, jossa hätägeneraattori käynnistetään kylmästä laivasta ja käytetään lyhytaikaisesti rinnan pääsähkönjakelujärjestelmän kanssa tarkoituksena kuorman siirtäminen ja hätätehonlähteen rutiinitestaus. (DNV 2011, 27)

Hätägeneraattorilaitteistoa suojaavat pysäytystoiminnot on rajoitettava tarpeellisiin estämään välitön konerikko. Muiden suojaustoimintojen kuten ylivirran ja yllilämmön on annettava ainoastaan hälytys. Lisäksi on suositeltavaa, että hälytykset liitetään päähälytysjärjestelmään. Jos ylivirtasuojauksen laukaisu on integroitu katkaisijaan, laukaisu on viritettävä maksimiarvoon. (DNV 2011, 31)

#### 4.1.3 Generaattoreiden suojaus

Ylivirtasuojaus on normaalisti asetettava siten, että generaattorikatkaisija laukeaa 110...125 % normaalivirrasta 20...120 s viiveellä. Oikosulkusuojaus on asetettava pienempään arvoon kuin generaattorin jatkuvan tilan oikosulkuvirta ja mahdollisimman lyhyellä aikaviiveellä. Viive enintään 1 s. (DNV 2011, 39)

Jokaisessa rinnankäytettävässä generaattorissa on oltava generaattorikatkaisijan laukaiseva takatehorele 3...10 s aikaviiveellä. Mäntämoottoreilla käytetyillä generaattoreilla katkaisijan on lauettava enintään 15 % nimellistehosta. Laukaisuteho saa poiketa asetusarvosta enintään 50 % jännitteen laskiessa 60 % nimellisestä, koskee myös vaihtojännitejärjestelmiä jokaisella tehokertoimen vaihtelualueella. (DNV 2011, 39)

Generaattorikatkaisijan on lauettava alijännitteestä. Alijännitesuojan on laukaistava katkaisija generaattorin jännitteen pudotessa 70...35 % nimellisjännitteestä. Alijännitesuojalla on oltava aikaviive oikosulkusuojan oikeanlaisen toiminnan sallimiseksi (ts. pitempi viive, kuin oikosulkusuojauksessa). Alijännitesuojauksen on sallittava katkaisijan sulkeutua jännitteen ja taajuuden ollessa 85...110 % nimellisarvosta. Oikosulku-, ylivirta- ja takatehoreleiden asettelut on oltava sellaisia, että katkaisija on mahdollista kytkeä uudelleen 30 sekunnin päästä laukaisusta. Tämä edellyttää, että jännite on 85...110 % nimellisarvosta. (DNV 2011, 40)

#### 4.1.4 Toiminnallisuus

Ainakin kaksi erillisiin pääkiskoihin kytkettyä generaattorilaitteistoa on varustettava blackout-tilanteessa käynnistävällä järjestelmällä. Vain yksi varalla oleva generaattori

voidaan sallia, jos sitä ei ole tarkoitus käyttää aluksen normaaliin toimintaan. Kaikki generaattorit on varustettava automaattisella kuorman erotuksella tai muulla automatiikalla estämään minkä tahansa generaattorin jatkuva ylikuorma. (DNV 2011, 26)

Kun sähköä tuotetaan tavallisesti yhdellä generaattorilla, on sähkökatkotilanteessa varauduttava varalla olevien generaattoreiden automaattiseen käynnistymiseen ja kytkeytymiseen päätauluun riittävällä kapasiteetilla sekä välttämättömien apulaitteiden automaattisella käynnistyksellä tarvittaessa peräkkäisinä toimenpiteinä. Varalla olevan generaattorin käynnistyminen ja kytkeytyminen päätauluun on tapahduttava mieluummin 30 sekunnissa, joka tapauksessa enintään 45 sekunnissa sähkökatkosta. (DNV 2011, 26)

Kun useamman kuin yhden generaattorilaitteiston on välttämätöntä turvata normaalit kuormat merellä, sähkönjakelujärjestelmä on varustettava soveltuvilla välineillä kuluttajien kuorman vähentämiseen tai laukaisuun. Tärkeiden kuluttajien kuormat voidaan laukaista järjestyksessä, jotta mahdollistetaan potkureiden ja ohjauksen toiminta sekä varmistetaan turvallisuus. Jos jäljellä olevat generaattorit eivät kykene mahdollistamaan em. toimintoja ja turvallisuutta, on varauduttava varalla olevan generaattorin käynnistämiseen ja kytkemiseen päätauluun. (DNV 2011, 26)

#### 4.2 DEIF PPM-3

Korvaavaksi järjestelmäksi valittiin tanskalaisen DEIF A/S:n valmistama suojaus- ja tehonhallintajärjestelmä PPM-3 (kuva 11). PPM-3:n vakiotoiminnot, suojureleet ja PMS yhdistyivät kustannustehokkaasti yhdeksi kokonaisuudeksi ja soveltuivat toiminnallisuudeltaan hyvin vanhan järjestelmän tilalle. Vaihtoehtona olisi voinut käyttää erillisiä suoja- ja tahdistusreileitä ja PMS-ohjauksissa esim. ohjelmoitavaa logiikkaa osana koneistonvalvontajärjestelmän automaatiojärjestelmää.

PPM-3 on merenkulkualalle soveltuva monipuolinen ja täysin redundanttinen järjestelmä, joka on laajennettavissa useille generaattorisovelluksille, kahdelle maasyötölle sekä kahdeksalle kiskokatkaisijalle. Jokaiselle yksikölle voidaan liittää näyttö- ja operointipaneeleita, mikä mahdollistaa järjestelmän käytön useasta kohteesta



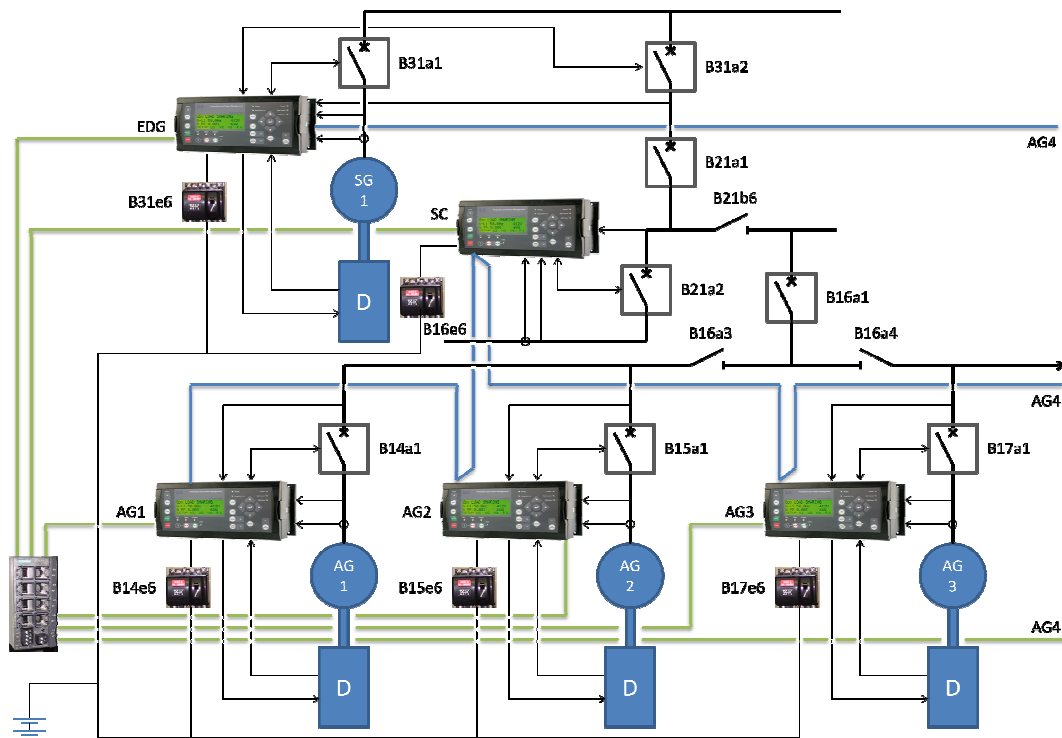




Kuva 13. Tarvikkeet lisäoperointipaneelin liittämistä varten (DEIF A/S 2013, 6)

Uuteen PMS-järjestemään (kuvio 16) sisältyi neljä dieselgeneraattoriyksikköä AG1-4, hätä-/satamageneraattoriyksikkö EDG sekä maasyötön yksikkö SC. Vanha generaattorikohtaisesti neljästä erillisestä yksiköstä (A, M, P ja generaattorisuoja) koostunut järjestelmä korvattiin uudella ohjaus- ja suojausjärjestelmällä, jossa toiminnallisuus on integroitu samaan yksikköön.

Jokaiselle yksikölle on liitetty 24 VDC jännitesyöttö katkaisijoiden e6 kautta, generaattorin jännite- ja virtamittaukset, jakelukiskoston jännitemittaus sekä dieseleiden ja katkaisijoiden ohjaukset ja tilatiedot. Kaaviossa sinisellä värillä on korostettu yksiköiden välinen sisäinen tiedonsiirtoyhteys, joka on toteutettu redundantisella CAN-väyläyhteydellä. Tiedonsiirtoyhteyden tehtävänä on osallistua generaattoreiden sekä maasyötön tehonhallintaan esim. jakamalla käytössä oleva kuorma tasan käytettävien generaattoreiden kesken sekä kuorman jakoon esim. siirryttäessä generaattoreilta maasyötölle tai päinvastoin. Jokainen yksikkö on lisäksi liitetty Ethernet-verkkoon sekä Profibus-väylällä koneistovalvontajärjestelmän automaatiojärjestelmään. Ethernet-yhteys on yksiköiden parametrien tallennusta varten ja Profibus valvomosta tehtävää etäkäyttöä varten. Tilanpuutteen vuoksi järjestelmäkaaviossa ei ole esitetty AG4:sta ja siihen liittyviä laitteita.



Kuvio 16. Uusi PMS-järjestelmä

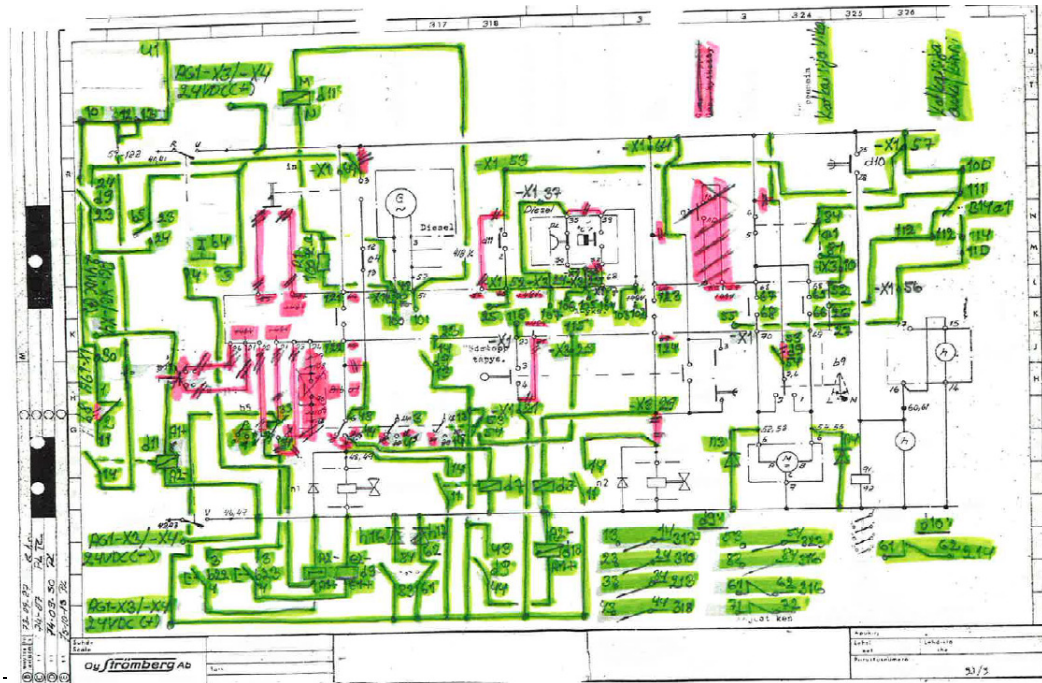
### 4.3 Suunnittelu

Suunnittelun lähtökohtana oli päivittää olemassa olevat piirikaaviot uutta järjestelmää vastaavaksi sekä suunnitella layout-kuvat, kytkentälistat ja komponenttiluettelot asennuslevyjen kokoonpanoa varten. Jäänmurtajalla tehtäviä asennuksia varten suunniteltiin lisäksi komponentti- ja kaapeliluettelot. Koestusta ja käyttöönottoa varten suunniteltiin suoja-areiden testauspöytäkirjat sekä parametrintiluehdot.

#### 4.3.1 Piirikaaviot

Piirikaaviosuunnittelu toteutettiin punakynäkuvinä piirtämällä ja merkitsemällä käsin muutokset vanhoihin piirikaavioihin, koska vanhoja piirikaavioita ei ollut käytettävissä sähköisesti editoitavassa muodossa. Purettavat johtimet merkittiin punaisella ja lisättävät vihreällä yliviihaustussilla (kuva 17). Käytöstä poistuneet ja keskukseen jääneet komponentit merkittiin sinisellä yliviihaustussilla. Piirikaaviot päivitetään myöhemmin sähköiseen muotoon. Korvaavat komponentit merkittiin vanhoilla positiioilla suunnittelun nopeuttamiseksi. Kokonaan uusille laitteille annettiin uudet

positiot. Liitteessä 3 on apugeneraattorin pää- ja mittausspiirikaavio ja liitteessä 4 dieselin ohjausspiirikaavio. Seuraavassa on punakynäesimerkki AG1 dieselin ohjausspiirikaaviosta.



Kuvio 17. AG1 dieselin ohjausspiirikaavio

#### 4.3.2 Asennuslevyt

Apu- ja hätä-/satamageneraattorikojeistoissa A- ja P-yksikön sekä generaattorisuojan tilalle suunniteltiin kaksi asennuslevyä, joihin tuli tarvittavat riviliittimet, johtokourut, komponentit ja PPM-3-ohjausyksiköt. K-yksikön tilalle suunniteltiin maasyötön asennuslevy samalla periaatteella, kuin generaattorikojeistojen asennuslevyt.

Levyjen pääasiallinen tarkoitus oli nopeuttaa kenttäasennuksia mm. käyttöön jäävien kenttäkaapeleiden kytkentöjen ja ohjausyksiköiden johdotusten osalta. Levyjen kokoonpano ja johdotus toteutettiin alihankintana kojeistovalmistajalla. Layout-kuvien lisäksi suunniteltiin kytkentälistat ja komponenttiluettelot kojeistovalmistajille tehtäviä tarjouspyyntöjä varten, jotka liitettiin urakan päätyttyä päivitettyinä loppudokumentteihin.

Riviliittiminä käytettiin ruuviliittimiä jotta vanhat holkitetut kaapelit saataisiin luotettavasti asennettua uusiin riviliittimiin. Apugeneraattorikojeiston asennuslevyjen layout-kuvat ovat liitteessä 5.

#### 4.3.3 KytKentälistat

KytKentälistat suunniteltiin asennuslevyissä olevien PPM-3-yksiköiden johdotuksen helpottamiseksi DEIF:n suunnittelu- ja asennusohjeiden mukaisesti. Ohjeissa oli selitetty kattavasti yksiköiden kytKentäohjeet ja toiminnallisuus. Samalla selvitettiin järjestelmän vaihdon yhteydessä tehtävät muutokset eräiden toiminnallisuuksien osalta. Apugeneraattorin kytKentälista on liitteessä 6.

Selvitettäviä asioita olivat:

- vanhan K-0-A-ohjauskytkimien korvaus 0-1-avanvalintakytkimellä sekä toiminnallisuuden määrittely uudella kytkimellä
- käsi-/automaattikäytön toiminnallisuuden toteutus
- generaattoreiden ja katkaisijoiden ohjauspiirien toteutus välireleillä
- öljyn paineen ja jäähdytysveden lämpötilan I/O-tulon selvitys sekä kytKentä erillisinä PPM-3:lle sekä 24 VDC apujännitejakelu tarvittaville komponenteille
- kallistuspumppujen ohjauspyyntöjen ja ohjausten kytKentä
- generaattorin ja kiskoston jännite- ja virtamittausten kytKennät.

Generaattoreiden ohjauskytkimiksi vaihdettiin 0-1-avainvalintakytkimet 0-asennossa irrotettavalla avaimella ja toiminnallisuus siten, että 0 = käytön esto ja 1 = sallittu. Irrotettavalla avaimella varustettu kytkin valittiin dieselgeneraattorin huolto- ja korjaustoimenpiteitä varten, jolloin avaimen voi ottaa huollon ajaksi mukaansa.

Dieselgeneraattoreiden käsikäytön valinta oli johdotettava PPM-3:n I/O-tuloon. Käsikäytöllä koneen ohjaukset tehdään kojeistokytkimillä ja koneen vauriosuojaukset jäävät käyttöön PPM-3:lla. Käsikäytön valinnan I/O-tieto oli tuotava jatkuvana signaalina ohjausyksikölle ja sitä varten asennuslevyyn suunniteltiin käsi-/auto-painonapeilla ohjattava sysäysrele. Kojestokytkimillä tehtävät ohjaukset johdotettiin myös sysäysreleen koskettimien kautta, jotta esim. vahingossa tapahtuvat käsiohjaukset eivät vaikuta koneen toimintaan sen ollessa automaattikäytöllä.

Dieselin 24 VDC ja generaattorikatkaisijan 230 VAC ohjaukset oli toteutettu vanhassa PMS-järjestelmässä ilman välireleitä, eli molemmat piirit kiersivät ohjausyksikön koskettimien kautta. Uuden järjestelmän ohjausjännitejakelussa pyrittiin välttämään 230 VAC jännitteen kierrättämistä PPM-3:n kautta, joten katkaisijan ohjauspiiriin lisättiin välireleet. Dieselin käynti- ja seis-ohjauspiireihin lisättiin myös välireleet käynnistys- ja pysäytysolenoidien kuormituksen takia.

Öljyn paineen ja jäähdytysveden lämpötilan hälytystiedot oli liitetty rinnan vanhaan ohjausyksikköön yhtenä digitaalitulona. Hälytykset liitettiin erillisinä PPM-3:lle helpottamaan vianhakua häiriötilanteissa. Signaalit ohjelmoitiin yksikölle vastustuloina siten, että  $0 \Omega =$  hälytys. Kaikkien PPM-3 ohjausyksiköiden 24 VDC ohjausjännitejakelussa käytettiin yhteistä 24 VDC/25 A UPS-varmennettua jännitelähdettä.

Kolmen kallistuspumppujen käynnistyspyynnöt ja ohjaukset suoritti vanhassa järjestelmässä K-yksikkö. Käynnistyspyynnöt ja ohjaukset liitettiin uudessa järjestelmässä AG1-3 PPM-3:lle, yhden pumpun ohjaus kullekin. Alun perin pumppujen käynnistyspyyntö ohjauspulssi, mutta tieto oli tuotava jatkuvana signaalina uusille yksiköille. Käynnistyspyynnön piiriin lisättiin sysäysrele, jonka koskettimen kautta käynnistyspyyntö saatiin jatkuvana ohjausyksikölle.

Kiskoston ja generaattorin jännitemittauksissa oli selvitettävä mittauspiirin suojalaitteen tyyppi ja oikosulkukestoisuus. Oikosulkulaskut ovat jäljempänä kappaleessa 4.5. Virtamittauksen osalta oli selvitettävä generaattorikiskoston virtamuuntajien muuntosuhde sekä käyttömahdollisuus uusien PPM-3-yksiköiden kanssa. Virtamuuntajien muuntosuhde 2000/5 A oli sopiva, joten vanhoja virtamuuntajia oli mahdollista käyttää uusilla yksiköillä.

#### 4.3.4 Luettelot

Layout-kuvien ja kytkentälistojen suunnittelun yhteydessä tehtiin asennuslevyjen komponenttiluettelot, luettelo kojeistojen oviin asennettavista vääntökytkimistä ja merkkivalopainikkeista sekä kaapeliluettelo. Komponentti- ja kaapelimäärityksissä

huomioitiin DNV:n ja vastaavien luokituslaitosten säännökset. Laitteiden on oltava mahdollisimman toimintavarmoja, koska korjaustoimenpiteitä voi olla mahdotonta hoitaa merellä. Lisäksi laitteiden ja kaapeleiden on oltava valmistettu tulipaloa hidastavista materiaaleista. Komponenttien on myös kestävä voimakasta tärinää ja iskuja sekä merivettä, kosteutta ja korkeita lämpötiloja. (Satakunnan ammattikorkeakoulu, hakupäivä 7.5.2013)

Asennuslevyjen komponenttiluettelo määriteltiin levykohtaisesti, jonka lisäksi luetteloon merkittiin asennusten yhteydessä levyihin ja kojeistoihin lisätyt komponentit. Kytkimien ja merkkivalopainikkeiden luettelo määriteltiin kojeistokohtaisesti. Apugeneraattorikojeiston komponenttiluettelo on liitteessä 7.

#### 4.4 Mittauspiirin taakka

Generaattoreiden ja maasyötön virtamittauspiirin taakka oli syytä laskea, koska generaattorisuojien vaihto, maasyötön suoja-alueen lisäys sekä johdinpituuden muutos vaikuttaa mittauspiirin taakkaan. Lisäksi taakkaa lisäävät samaan piiriin kytketyt A- ja kW-taulumittarit sekä A-taulumittariin liitetty valintakytkin vaihekohtaista virran tarkistusta varten. Virheellinen taakka vaikuttaa virtamuuntajan tarkkuusluokkaan ja sitä kautta suoja-alueen toiminta-aikaan. Komponenttien taakat on esitetty alla olevassa taulukossa (taulukko 5).

Taulukko 5. Kiinteät taakat mittauspiirissä

<b>Komponentin taakka [VA]</b>	
Generaattorisuoja Rygia	1,5
Generaattorisuoja PPM-3	0,3
A-taulumittari	0,15
kW-taulumittari	0,2
Valintakytkin	1,1

Laskennassa oli huomioitava myös mittauspiirin johtimien ominaisvastus, pituus ja poikkipinta. Mittauspiirien johdinmateriaalina oli kupari, jonka ominaisvastus on  $0,0175 \Omega\text{mm}^2/\text{m}$ .

## 4.4.1 Apugeneraattorit

Virtamuuntajien tiedot on esitetty alla olevassa taulukossa (taulukko 6), jonka mukaan virtamuuntajan tarkkuusluokka on parhaimmillaan 40 VA kuormalla.

Taulukko 6. Virtamuuntajien tiedot

AG virtamuuntajat	
Muuntosuhde A	2000/5
Taakka VA	40/50/60
Tarkkuusluokka Cl	0,5/1/3
Varmuuskerroin $F_s$	< 3
Terminen oikosulkuvirta $I_{th}$ kA	120
Jännite kV	0,6/3
Taajuus Hz	50

Määriteltiin mittauspiirin taakka ennen muutostöitä. Johtimien pituus 10 m.

$$S_j = I_{sn^2} \cdot \rho \cdot \left( \frac{l}{A_j} \right) = (5VA)^2 \cdot 0,0175 \frac{\Omega \cdot mm^2}{m} \cdot \left( \frac{10m}{1,5mm^2} \right) + 2,95VA \approx 5,87VA$$

$$S_{\%} = \left( \frac{5,87VA}{40VA} \right) \cdot 100 \approx 14,7\%$$

Mittauspiirin taakka tarkistettiin muutostöiden jälkeen, johtimien pituus 12 m.

$$S_j = (5VA)^2 \cdot 0,0175 \frac{\Omega \cdot mm^2}{m} \cdot \left( \frac{12m}{1,5mm^2} \right) + 1,75VA \approx 5,25VA$$

$$S_{\%} = \left( \frac{5,25VA}{40VA} \right) \cdot 100 \approx 13,1\%$$

Taakan olisi oltava vähintään 10 VA, jotta 25 % vähimmäisvaatimus saavutettaisiin.

Taakkaa voi kasvattaa jatkamalla johtimia 34 m asti tai lisäämällä vastus mittauspiiriin.

Mittausvirhe on taulukon 1 mukaan n.  $\pm 0,9$  % virtamuuntajan tarkkuusluokan ollessa 0,5.

## 4.4.2 Maasyöttö

Virtamuuntajien tiedot on esitetty alla olevassa taulukossa (taulukko 7), jonka mukaan virtamuuntajan tarkkuusluokka on parhaimmillaan 15 VA kuormalla.

Taulukko 7. Virtamuuntajien tiedot

SC virtamuuntajat	
Muuntosuhde A	600/5
Taakka VA	15/30/50
Tarkkuusluokka Cl	0,5/1/3
Varmuuskerroin $F_s$	
Terminen oikosulkuvirta $I_{th}$ kA	
Jännite kV	
Taajuus Hz	50

Määriteltiin mittauspiirin taakka ennen muutostöitä. Johtimien pituus 15 m.

$$S_j = (5VA)^2 \cdot 0,0175 \frac{\Omega \cdot mm^2}{m} \cdot \left( \frac{15m}{1,5mm^2} \right) + 1,45 \approx 5,83VA$$

$$S_{\%} = \left( \frac{5,83VA}{10VA} \right) \cdot 100 \approx 58,3\%$$

Mittauspiirin taakka tarkistettiin muutostöiden jälkeen. Mittauspiiri kulki päätaulun kojeistoon B16 asennetun PPM-3-yksikön kautta. Kojeistojen välille vedettiin poikkipinnaltaan 1,5 mm<sup>2</sup> kaapelit, jonka vuoksi mittauspiirin taakka kasvoi kohtalaisesti. Johtimien pituus 45 m.

$$S_j = (5VA)^2 \cdot 0,0175 \frac{\Omega \cdot mm^2}{m} \cdot \left( \frac{45m}{1,5mm^2} \right) + 1,75VA \approx 14,9VA$$

$$S_{\%} = \left( \frac{14,9VA}{15VA} \right) \cdot 100 \approx 99,2\%$$

Taakka oli hyvin lähellä suositusten enimmäisrajaa. Mittausvirhe on taulukon 1 mukaan n. ± 0,5 % virtamuuntajan tarkkuusluokan ollessa 0,5.

Taakkaa voi tarvittaessa pienentää kaksinkertaistamalla kojeistojen välisten kaapeleiden johdinpoikkipinnat kytkemällä vapaat johtimet rinnalle mittauspiiriin.



$$S_j = (5VA)^2 \cdot 0,0175 \frac{\Omega \cdot mm^2}{m} \cdot \left( \left( \frac{17m}{1,5mm^2} \right) + \left( \frac{28m}{3mm^2} \right) \right) + 1,75VA \approx 10,8VA$$

$$S_{\%} = \left( \frac{10,8VA}{15VA} \right) \cdot 100 \approx 72\%$$

#### 4.4.3 Häätä-/satamageneraattori

Virtamuuntajien tiedot on esitetty alla olevassa taulukossa (taulukko 8), jonka mukaan virtamuuntajan tarkkuusluokka on parhaimmillaan 45 VA kuormalla.

Taulukko 8. Virtamuuntajien tiedot

SG virtamuuntajat	
Muuntosuhde A	1250/5
Taakka VA	45/50/60
Tarkkuusluokka Cl	0,5/1/3
Varmuuskerroin $F_s$	< 3
Terminen oikosulkuvirta $I_{th}$ kA	80
Jännite kV	0,6/3
Taajuus Hz	50

Määriteltiin mittauspiirin taakka ennen muutostöitä. Mittauspiiri kulki hätätaulusta päätaulun kojeiston B16 kW- ja A-aulumittareille ja sieltä takaisin hätätauluun. Tämän vuoksi johtimien pituudeksi tuli n. 85 m. Taulujen välille oli vedetty poikkipinnaltaan 4 mm<sup>2</sup> kaapeli, joka kattoi n. 70 m mittauspiirin johdinpituudesta. Laskennassa on huomioitu kaksi A-aulumittaria valintakytkimineen.

$$S_j = (5VA)^2 \cdot 0,0175 \frac{\Omega \cdot mm^2}{m} \cdot \left( \left( \frac{15m}{1,5mm^2} \right) + \left( \frac{70m}{4mm^2} \right) \right) + 4,2VA \approx 16,2VA$$

$$S_{\%} = \left( \frac{16,2VA}{45VA} \right) \cdot 100 \approx 36\%$$

Mittauspiirin taakka tarkistettiin muutostöiden jälkeen, 1,5 mm<sup>2</sup> johtimien pituus 17 m.

$$S_j = (5VA)^2 \cdot 0,0175 \frac{\Omega \cdot mm^2}{m} \cdot \left( \left( \frac{17m}{1,5mm^2} \right) + \left( \frac{70m}{4mm^2} \right) \right) + 3VA \approx 15,6VA$$

$$S_{\%} = \left( \frac{15,6VA}{45VA} \right) \cdot 100 \approx 34,7\%$$

Taakka oli riittävä. Mittausvirhe on taulukon 1 mukaan  $n. \pm 0,5 \%$  virtamuuntajan tarkkuusluokan ollessa 0,5.

#### 4.5 Oikosulkuvirtojen tarkastelu

Laivan oikosulkuvirtoja laskettaessa selvitetään yleensä generaattorin navoissa, päätaulussa, jakelutaulussa, hätätaulussa sekä valaistus- ja lämmitysryhmätaulussa esiintyvät suurimmat oikosulkuvirrat. Oikosulkuvirtojen laskenta suoritetaan Theveninin menetelmällä huomioiden generaattoreiden ja moottoreiden reaktanssit sekä kaapeleiden ja muuntajien impedanssit. (Satakunnan ammattikorkeakoulu, hakupäivä 7.5.2013)

Jokaiselle PPM-3-ohjausyksikölle liitettäviin generaattorin ja kiskoston jännitemittauspiireihin oli asennettava kaksi C2A johdonsuojakatkaisijaa suojaamaan ohjausyksikköä ylivirroilta ja -jännitteiltä. Suurin oikosulkuvirta laskettiin päätaulun, jakelutaulun ja hätätaulun kiskostoissa suojalaitteiden oikosulkukestoisuuden määrittämiseksi. Apugeneraattoreiden tiedot sekä generaattoreiden ja päätaulun väliset kaapelointitiedot ovat seuraavissa taulukoissa.

Taulukko 9. Apugeneraattoreiden leimausarvot

<b>Apugeneraattorit AG1-4</b>	
Nimellisteho	870 kVA
Tehokerroin $\cos\phi$	0,8
Jännite	400 V
Taajuus	50 Hz
Virta	1256 A
Pyörimisnopeus	750 rpm
Magnetointivirta	53 A
Magnetointijännite	175 V
Tahtireaktanssi $x_d$	1,57 p.u
Muutosreaktanssi $x'_d$	0,3 p.u
Alkureaktanssi $x''_d$	0,2 p.u

Taulukko 10. Kaapelointitiedot

Apugeneraattoreiden kaapelointi	
Kaapelityyppi	3 x 70 mm <sup>2</sup>
Kaapelointipituus	25 m
Kaapelimäärä	7
Resistanssi +45 °C	0,299 Ω / km
Reaktanssi	0,074 Ω / km

Laskettiin apugeneraattoreiden sekä apugeneraattoreiden ja päätaulun välisten kaapelointien reaktanssit ja reaktanssit, jonka jälkeen ratkaistiin oikosulkuvirtapiiriin kokonaisimpedanssi apugeneraattoreilta päätauluun sekä oikosulkuvirta päätaulussa.

$$X_d'' = \frac{x_d''}{100} \cdot \frac{U_n^2}{S_n} = \frac{0,2}{100} \cdot \frac{(400V)^2}{870kVA} \approx 0,368\Omega$$

$$R_d = 0,15 \cdot 0,368 \Omega \approx 0,055 \Omega$$

$$X_{jAG-B1} = \frac{0,074 \frac{\Omega}{km} \cdot 25 \cdot 10^{-3} km}{7} \approx 0,264 m\Omega$$

$$R_{jAG-B1} = \frac{0,299 \frac{\Omega}{km} \cdot 25 \cdot 10^{-3} km}{7} \approx 1,07 m\Omega$$

$$Z_{AG-B1} = \sqrt{(R_d + R_j)^2 + (X_d'' + X_j)^2}$$

$$Z_{AG-B1} = \sqrt{(55m\Omega + 1,07m\Omega)^2 + (368m\Omega + 0,264m\Omega)^2} \approx 0,372\Omega$$

$$Z_{TAG-B1} = (4 \cdot 0,372\Omega^{-1})^{-1} \approx 0,093\Omega$$

$$I_{kB1}'' = \frac{c \cdot U}{\sqrt{3} \cdot Z_T} = \frac{1,0 \cdot 400V}{\sqrt{3} \cdot 0,093\Omega} \approx 2,5kA$$

Oikosulkuvirtaan täytyy lisätä moottoreiden aiheuttama lisä, joka on alkuoikosulkuvirralla 3 kertaa ja sysäyoikosulkuvirralla 8 kertaa oikosulkuhetkellä liitettyinä olevien moottoreiden nimellisvirta. Todellisuudessa moottoreiden nimellisvirtaa ei tiedetä oikosulkuhetkellä, joten virraksi määritellään 2/3 samanaikaisesti liitettävissä olevien generaattoreiden nimellisvirrasta.

Alkuoikosulkuvirraksi tulee näin päätauluun lasketun oikosulkuvirran ja moottoreista aiheutuvan lisävirran summa. (Satakunnan ammattikorkeakoulu, hakupäivä 7.5.2013)

$$I''_{kM} = 3 \cdot \left( \frac{2}{3} \cdot 4 \cdot 1256A \right) \approx 10kA$$

$$I''_k = I''_{kB1} + I''_{kM} = 2,5kA + 10kA = 12,5kA$$

Laskettiin oikosulkuvirtapiiriin kokonaisresistanssi ja -reaktanssi sysäyskerrointa varten sekä lopuksi sysäysoikosulkuvirta huomioituna moottoreiden tuottamalla lisävirralla.

$$R_T \approx 0,13\Omega \quad X_T \approx 0,85\Omega$$

$$\kappa = 1,02 + 0,98e^{-\frac{3R}{X}} = 1,02 + 0,98e^{-\left(\frac{3 \cdot 0,13\Omega}{0,85\Omega}\right)} \approx 1,64$$

$$i_{sB1} = \kappa \cdot \sqrt{2} \cdot I''_k = 1,64 \cdot \sqrt{2} \cdot 12,5kA \approx 29kA$$

$$i_{sM} = 8 \cdot \left( \frac{2}{3} \cdot 4 \cdot 1256A \right) \approx 26,8kA$$

$$i_s = i_{sB1} \cdot i_{sM} \approx 56kA$$

Jännitemittauspiirien suojalaitteiksi valittiin ABB S203M-C2 johdonsuojakatkaisijat, joiden oikosulkuvirran katkaisukyky on määritelty rajoittamattomaksi ison sisäisen resistanssinsa takia. Tästä syystä oikosulkuvirta ei pääse kasvamaan suureksi, mikä mahdollistaa johdonsuojakatkaisijan käytön jännitemittauspiireissä. (Hautamäki, 13.5.2013, sähköposti)

Oikosulkuvirran suuruus pätee myös jakelu- ja hätätauluun, koska taulujen välisten sähkönjakelukaapeleiden kokonaisimpedanssi on hyvin pieni ja sillä on vähäinen vaikutus oikosulkuvirran suuruuteen. Tämän seurauksena suojalaitteiden oikosulkukestoisuuden on oltava sama, kuin päätaulun suojalaitteilla. Seuraavassa on jakelutaulujen välisen impedanssin ja oikosulkuvirran tarkastelu.

Taulukko 11. Taulujen välinen kaapelointi

<b>Hätätaulu-jakelutaulu</b>	
Kaapelityyppi	3 x 95 mm <sup>2</sup>
Kaapelointipituus	25 m
Kaapelimäärä	5
Resistanssi +45 °C	0,226 Ω / km
Reaktanssi	0,073 Ω / km
<b>Jakelutaulu-päätäulu</b>	
Kaapelityyppi	3 x 70 mm <sup>2</sup>
Kaapelointipituus	10 m
Kaapelimäärä	10
Resistanssi +45 °C	0,299 Ω / km
Reaktanssi	0,074 Ω / km

$$X_{jB3-B2} = \frac{0,073 \frac{\Omega}{km} \cdot 25 \cdot 10^{-3} km}{5} \approx 0,365 m\Omega$$

$$R_{jB3-B2} = \frac{0,226 \frac{\Omega}{km} \cdot 25 \cdot 10^{-3} km}{5} \approx 1,13 m\Omega$$

$$X_{jB2-B1} = \frac{0,074 \frac{\Omega}{km} \cdot 10 \cdot 10^{-3} km}{10} \approx 0,074 m\Omega$$

$$R_{jB2-B1} = \frac{0,299 \frac{\Omega}{km} \cdot 10 \cdot 10^{-3} km}{10} \approx 0,299 m\Omega$$

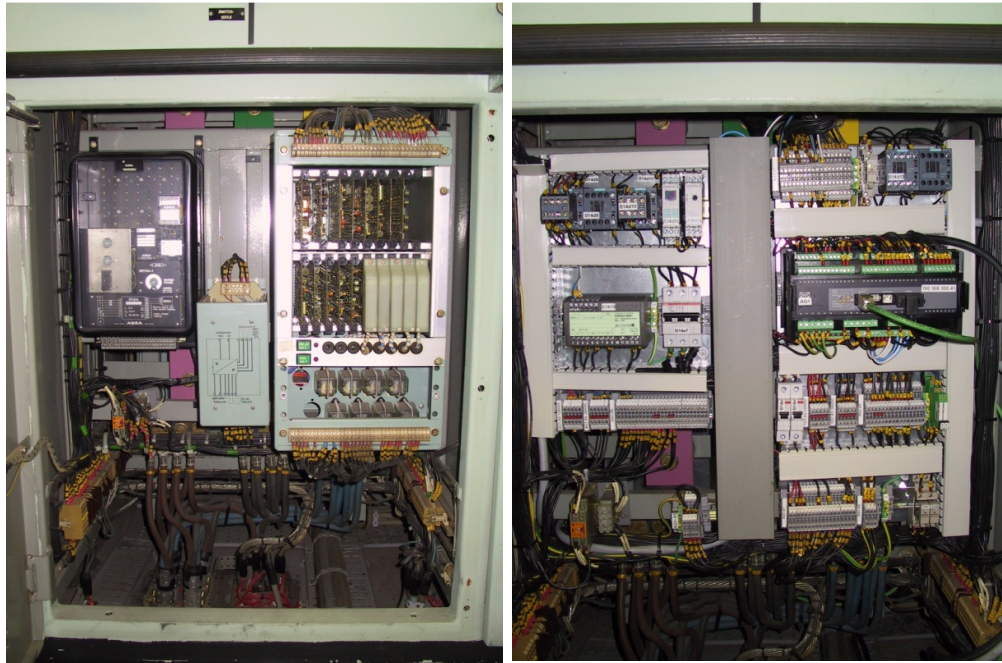
$$Z_{TSG1-B1} = \sqrt{(1,13 m\Omega + 0,299 m\Omega)^2 + (0,365 m\Omega + 0,074 m\Omega)^2} \approx 0,0015 \Omega$$

$$I_{kB3}'' = \frac{c \cdot U}{\sqrt{3} \cdot Z_T} = \frac{1,0 \cdot 400V}{\sqrt{3} \cdot (0,093 \Omega + 0,0015 \Omega)} \approx 2,45 kA$$

#### 4.6 Asennukset

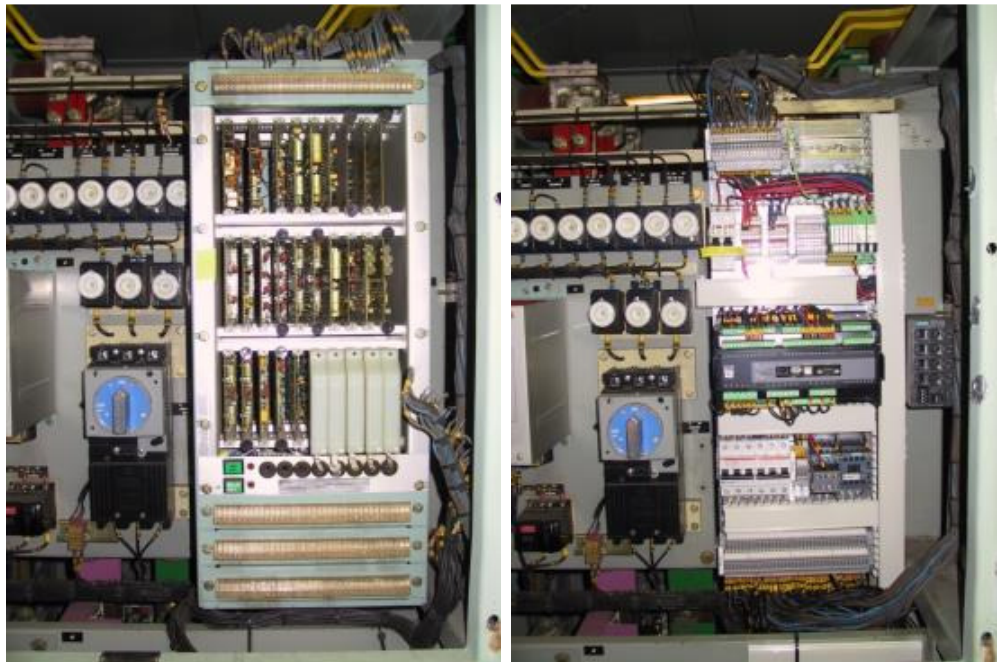
Asennusten yhteydessä kojeistoista purettiin vanhan PMS-järjestelmän komponentit ja generaattorisuojat ja tilalle kiinnitettiin asennuslevyt. Apugeneraattorikojeistoissa toinen asennuslevyistä kiinnitettiin generaattorisuojan ja toinen A-yksikön paikalle. P-yksiön paikalle asennettiin johtokouru kenttäjohtotuksia varten (kuva 14). Vanhoilta

komponenteilta irrotetut johtimet liitettiin asennuslevyjen riviliittimille tai niille lisättiin riviliittimet kojeistoon. Asennuksen olisi voinut suunnitella yhdellä levyllä, mutta kojeistosta puuttui suunnitteluvaiheessa layout-mittakuva vanhojen komponenttien asennuksesta. Toisaalta kiinnitys saattoi olla helpompaa erillisillä asennuslevyillä. Häätä-/satamageneraattorikojeiston asennukset tehtiin vastaavasti, kuin apugeneraattorikojeistoissa.



Kuva 14. Asennukset apugeneraattorikojeistossa

K-yksikön tilalle kiinnitettiin maasyötön PPM-3-yksikön käsittävä asennuslevy (kuva 15). Asennustöiden helpottamiseksi maasyötön katkaisijan ohjausreleet ja jännitemittausten johdonsuojakatkaisijat siirrettiin myöhemmin asennuslevystä jakelutauluun maasyötön katkaisijan viereen (kuva 16), jotta välttyttiin ylimääräiseltä kaapeloinnilta taulujen välillä. Johdonsuojakatkaisijat oli siirrettävä suojiksi syötön alkupäähän.



Kuva 15. K-yksikön purkuvaihetta ja asennuslevy paikoillaan



Kuva 16. Lisätyt komponentit ja riviliittimet jakelutaulussa

Apugeneraattoreiden ja hätä-/satamageneraattorin kojeistoissa operointipaneelit asennettiin M-yksikön tilalle. Merkkilamppujen ja painikkeiden asennusaukkojen välissä olleet runko-osat poistettiin ja yhtenäistä aukkoa suurennettiin (kuva 17), jotta paneeli saatiin asennettua oven keskelle. Aukkoa suurentamalla mahdollistettiin paneelin ja ohjausyksikön sarjaliikenneliitäntä ja lisäpaneelin CAN-väyläliitäntämahdollisuus. Paneelien alapuolelle asennettiin käynninesto-avainvalintakytkin sekä käsi-/auto-tilavalinnan merkkivalopainikkeet (kuva 18).

Hätä-/satamageneraattorin lisäoperointipaneeli sekä maasyötön operointipaneelit asennettiin myös samaan tauluun apugeneraattoreiden paneelien kanssa. Paneelien alapuolelle asennettiin käsi-/autotilavalinnan merkkivalopainikkeet, hätägeneraattorin lisäpaneelin viereen lisäksi satama-/hätägeneraattori-painikkeet.



Kuva 17. Hälytysmerkkilamppujen purku



Kuva 18. Operointipaneelin, käynninestokytkimen ja painikkeiden asennus



#### 4.7 Parametrointi ja testaus

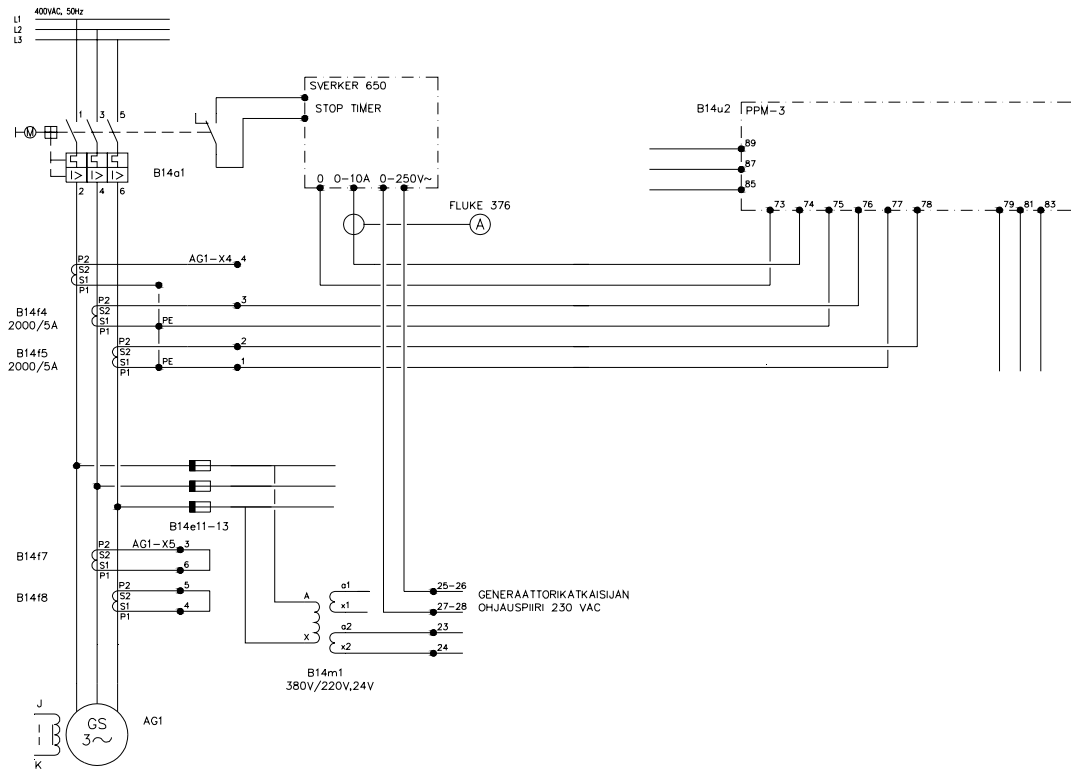
Testaukset suoritettiin laiturikokeina Katajanokalla. Suojareleiden testaus tehtiin Sverker 650-releenkoestuslaitteella (kuva 19). Koestuslaitteella voidaan testata virta-, jännite- ja tehoreleet, virta- ja jännitereleillä yli- ja alikuormitustoiminnot. Tässä tapauksessa testattiin suojareleiden ylivirtatoiminnot. Koestuksessa käytettiin lisäksi Fluke 376-yleismittaria virran asettelun seuraamiseksi.



Kuva 19. Suojareleen koestuslaite

Koestuslaitteelta kytkettiin katkaisijan ohjausvirtapiiriin 230 VAC apujännite ja PPM-3 virtamittaustuloon säädettävä 0-10 A AC-virran syöttö. Lisäksi katkaisijan apukosketin kytkettiin pysäytysajastimeen ylivirran havahtumisen ja katkaisijan laukaisuvälin mittausta varten (kuvio 18). PPM-3:ssa ylivirtasuojana on käänteisaikaylivirtarele ja suojaus on mahdollista toteuttaa enintään 4-portaisena. Käänteisaikaylivirtareleen toimintahidastus on virtaan nähden käänteinen, eli virran kasvaessa laukaisuaika lyhenee.

Koestuspiirin kytkentä on myös liitteessä 8.



Kuvio 18. Suojareleen koestuskytkentä

Suojaus- ja ohjausparametrit määriteltiin pääpiirteittäin vanhan järjestelmän mukaisesti esimerkiksi generaattorisuojan ja epäolennaisen kuorman katkaisevan aikareleen säätöjen sekä asiakkaalta saadun parametriluettelon perusteella.

Apugeneraattorin suojareleen testauspöytäkirja on liitteessä 9.

Järjestelmän testauksessa suoritetaan seuraavat kokeet:

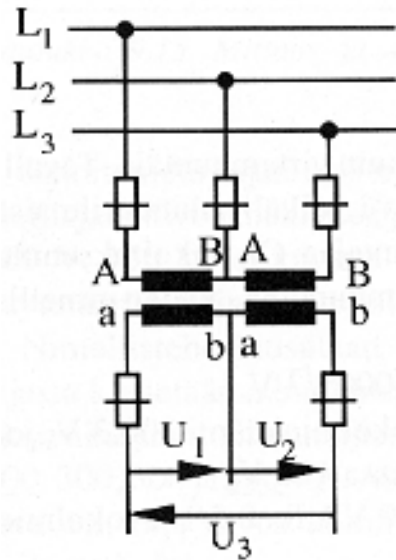
- Dieselgeneraattorin käynnistys ja kytkeytyminen verkkoon, jossa käynnistetään yksi apukone ja tarkistetaan automaattinen jännitteen nousu ja generaattorin kytkeytyminen verkkoon.
- Generaattoreiden rinnankäyttö ja kuormanjaot, jossa käynnistetään toinen apukone ja tarkistetaan automaattinen jännitteen nousu, generaattorin tahdistuminen ensimmäisen rinnalle, kytkeytyminen verkkoon sekä kuormanjako tasaisesti generaattoreiden kesken.
- Häätägeneraattorin käynnistys ja kytkeytyminen verkkoon black-out-tilanteessa, jossa estetään apukoneiden käynnistyminen dieselien 0-1-ohjauskytkimestä ja avataan maasyötön katkaisija sekä tarkistetaan hätä-/satamakoneen käynnistyminen asetellun viiveen kuluttua, automaattinen jännitteen nousu ja generaattorin kytkeytyminen hätäverkkoon.

- Siirtyminen hätägeneraattorilta apugeneraattorille, jossa tarvittavien apukoneiden käynnistyttyä ja kytkeydyttyä verkkoon black-outin jälkeen, tarkistetaan apugeneraattoreiden tahdistuminen hätäverkkoon sekä verkkokatkaisijan kytkeytyminen ja hätägeneraattorin sammuminen.
- Hätägeneraattorin toiminta satamageneraattorina, jossa hätä-/satamageneraattori valitaan satamakäytölle kojeiston painonapista, tarkistetaan hätä-/satamakoneen automaattinen käynnistyminen sekä generaattorin kytkeytyminen verkkoon apugeneraattoreiden rinnalle normaalina generaattorina.
- Dieselgeneraattoreiden käynnistysjärjestys, jossa tarkistetaan koneiden käynnistyminen ja kytkeytyminen verkkoon käynnistysjärjestyksen mukaisesti sekä hätä-/satamageneraattorin käynnistys ensimmäisenä satamakäytössä.
- Siirtyminen apugeneraattoreilta maasyötölle, jossa maasyöttö valitaan aktiiviseksi ja tarkistetaan maasyötön tahdistuminen laivaverkkoon, maasyötön katkaisijan sulkeutuminen sekä generaattoreiden kuorman luovutus maasyötölle ja apukoneiden sammuminen.
- Siirtyminen maasyötöltä apugeneraattoreille, jossa tarkistetaan dieselgeneraattoreiden käyntivalmius, pyydetään maasyötön katkaisija auki ja tarkistetaan tarvittavien dieselgeneraattoreiden käynnistyminen käynnistysjärjestyksen mukaisesti, tahdistuminen maasyötön verkkoon sekä kuorman luovutus generaattoreille ja maasyötön katkaisijan avautuminen.
- Generaattoreiden tehonvaraus raskaalla tehokuormalla, jossa tehdään raskaan tehokuorman käynnistyspyyntö ja tarkistetaan tarvittavien apugeneraattoreiden käynnistyminen asetellun tehonvarauksen mukaisesti sekä raskaan kuorman ohjaus käyntiin kun tehonvaraus sähköjakeluverkossa on riittävä.
- Epäolennaisten kuormien katkaisu ylikuormitustilanteessa, jossa tarkistetaan epäolennaisten kuormien katkaisut asetellussa tehorajassa ja lisägeneraattoreiden käynnistyminen ja tahdistuminen verkkoon, jakeluverkon kuormitettavuuden noustua tarkistetaan epäolennaisten kuormien kytkeytyminen takaisin.

#### 4.8 Soveltuvuus keskijännitejärjestelmään

PPM-3 soveltuu käytettäväksi keskijännitejärjestelmässä. Generaattorin ja kiskoston jännitemittauksissa ensiöpiirin jännite on aseteltavissa PPM-3:lla 100...25000 V ja toisiopiirin jännite 100...690 V. Jännitemittaus on toteutettavissa kahdella

kaksinapaisella muuntajalla, jotka kytketään kolmivaiheiseksi V-kytkennällä (kuvio 19). Virtamittaus toteutetaan vastaavasti, kuin pienjännitejärjestelmässä. PPM-3:n ensiöpiirin virta on aseteltavissa 5...9000 A ja toisiopiirin 1...5 A.



Kuvio 19. Jännitemuuntajan V-kytkentä (Uski 2001, 12)

Jännitemuuntajan valinnassa huomioon otettavia asioita:

- merenkulkualan vaatimukset ja standardit
- ensiö- ja toisiopiirin jännite
- nimellisteho toisiopiirin yhteenlaskettujen kuormien mukaisesti, PPM-3:n taakka on 0,25 VA vaihetta kohden
- tarkkuusluokka, tavallisesti 0,5 tai 1
- muuntajan rakenne.

Keskijännitejärjestelmän mahdollisten suurempien häiriöiden kytkeytymisen kannalta PPM-3:n tulo- ja ohjaussignaalit olisi suositeltavaa toteuttaa pulsseina. Osa tulosignaaleista on kytkettävissä jatkuvana signaalina ja osa pulsseina, tarvittaessa jatkuvatoimiset signaalit olisi liitettävä sysäysreleiden välityksellä yksikölle. Ohjauspuolella signaalin kytkentäaika on aseteltavissa PPM-3:n sovellusohjelmasta.

## 5 JOHTOPÄÄTÖKSET JA POHDINTA

Opinnäytetyössä käsiteltiin jäänmurtaja Urhon PMS-järjestelmän modernisointi. PMS-järjestelmä koostuu dieselgeneraattori- ja maasyöttökohtaisista ohjaus- ja suojausyksiköistä, joiden tehtävänä on huolehtia aluksen sähköntuotannosta satamassa ja merellä. Lisäksi järjestelmän tehtävänä on suojata dieselmoottoreita ja generaattoreita tuotantokatkoksia aiheuttavilta häiriöiltä ja osallistua kuorman siirtoon maasyötöltä generaattoreille ja päinvastoin.

Teoriaosuudessa käsiteltiin jäänmurtajan sähkönjakelujärjestelmä sekä sähköntuotannon kannalta oleellisempien laitteiden, kuten generaattoreiden ja suojalaitteiden toimintaa sekä niiden vaikutusta sähköntuotannon kannalta. Lisäksi selvitettiin PMS-järjestelmän toiminnallisuus ja sen myötä korvaavan järjestelmä vanhan tilalle. Uudeksi järjestelmäksi valittiin DEIF A/S:n valmistama mikroprosessoripohjainen suojaus- ja tehonhallintajärjestelmä PPM-3.

Opinnäytetyön lopputuloksena saatiin helposti ohjelmoitava, käyttäjäystävällinen ja luotettava PMS-järjestelmä, jonka etuna on aikaisemmin erillisistä yksiköistä koostuneiden toimintojen ja komponenttien yhdistyminen yhdeksi kokonaisuudeksi sekä yksikkökohtaiset operointi- ja valvontapaneelit, joilla käyttäjä voi helposti vaikuttaa laivan sähköntuotantoon tehdasohjelmoitujen ohjaussekvenssien välityksellä. Järjestelmä on vartenotettava vaihtoehto vastaavissa modernisointiprojekteissa ja soveltuu käytettäväksi myös keskijännitejärjestelmässä. Keskijännitteellä asennusvaatimuksiin, jännitemuuntajien valintaan ja häiriösignaalien ehkäisemiseen on kiinnitettävä erityistä huomiota. Opinnäytetyötä hyödyntäen voi perehtyä laivan PMS-järjestelmään ja sen tehtäviin laivan sähköntuotannossa sekä järjestelmän modernisoinnissa huomioon otettavista asioista ja siihen liittyvistä tehtävistä.

Oma oppiminen karttui runsaasti projektin aikana, koska merenkulualalta ei ollut aikaisempaa suunnittelu- ja asennuskokemusta. Samasta syystä johtuen projekti vaati runsaasti selvittelytyötä PMS-järjestelmästä. Projektissa täytyi huomioida merisäännökset ja -määräykset huomioimalla merihyväksytyt komponentit ja kaapelit suunnittelussa ja asennuksessa sekä asianmukaiset käyttö- ja suojausasetukset järjestelmän testauksessa ja käyttöönotossa.

## LÄHTEET

- ABB Oy 2013. Electromechanical relays. Hakupäivä 3.3.2013.  
<[http://library.abb.com/global/scot/scot229.nsf/veritydisplay/e4faf9bd700e7a3fc125766500706c57/\\$File/em\\_relay\\_flyer.pdf](http://library.abb.com/global/scot/scot229.nsf/veritydisplay/e4faf9bd700e7a3fc125766500706c57/$File/em_relay_flyer.pdf)>
- ABB Oy 2013. IEC virtamuuntajat. Hakupäivä 1.3.2013.  
<<http://www.abb.com/product/fi/9AAC720072.aspx>>
- ABB Oy 2013. Kennotermiinaali REF 541, -543, -545 tuoteopas. Hakupäivä 3.3.2013.  
<[http://www05.abb.com/global/scot/scot229.nsf/veritydisplay/f9eb02a6dff44160c12577c90029b8bd/\\$file/REF54\\_tob\\_755512\\_FId.pdf](http://www05.abb.com/global/scot/scot229.nsf/veritydisplay/f9eb02a6dff44160c12577c90029b8bd/$file/REF54_tob_755512_FId.pdf)>
- ABB Oy 2013. Under/over voltage relay type VHXM. Hakupäivä 3.3.2013.  
<[http://www05.abb.com/global/scot/scot235.nsf/veritydisplay/c6c24dc7dca5716e65257194003cd4c1/\\$file/VHXM%20Brochure.pdf](http://www05.abb.com/global/scot/scot235.nsf/veritydisplay/c6c24dc7dca5716e65257194003cd4c1/$file/VHXM%20Brochure.pdf)>
- ABB Oy 2000. TTT-käsikirja luku 17: Moottorit ja generaattorit. Hakupäivä 20.2.2013.  
<[http://heikki.pp.fi/opetus/pedanet/papkem/170\\_0007.pdf](http://heikki.pp.fi/opetus/pedanet/papkem/170_0007.pdf)>
- Arctia Shipping Oy 2013. IB Urho. Hakupäivä 2.1.2013.  
<<http://arctia.fi/urho>>
- Arctia Icebreaking Oy 2013. Oy Strömberg Ab, J/M Urho Sähköasema dokumentointi. Hakupäivä 8.5.2013.
- Aura, Lauri & Tonteri, Antti, J. 2002. Teoreettinen sähkötekniikka ja sähkökoneiden perusteet, 3-4. painos. Helsinki: WSOY.
- DEIF A/S 2013. Protection and Power Management, PPM-3. Hakupäivä 10.3.2013.  
<[http://www.deif.com/Ecom/Marine\\_-\\_Offshore\\_Technology/Marine\\_-\\_Offshore\\_Control\\_Technology/Products/Power\\_Management/PPM\\_3.aspx](http://www.deif.com/Ecom/Marine_-_Offshore_Technology/Marine_-_Offshore_Control_Technology/Products/Power_Management/PPM_3.aspx)>
- DEIF A/S 2013. Quick start guide. Hakupäivä 10.3.2013.  
<[http://217.195.189.178/DocCenterPro/Publication/DownloadDocument.ashx?id=R1564e4067-af39-4f4b-a3bb-0a3e2405ca63&FileName= PPM-3\\_quick\\_start\\_guide\\_4189340740\\_UK](http://217.195.189.178/DocCenterPro/Publication/DownloadDocument.ashx?id=R1564e4067-af39-4f4b-a3bb-0a3e2405ca63&FileName= PPM-3_quick_start_guide_4189340740_UK)>
- Det Norske Veritas (DNV) 2011. Offshore standard DNV-OS-D201, electrical installations. Hakupäivä 12.3.2013.  
<<http://exchange.dnv.com/publishing/Codes/download.asp?url=2011-04/os-d201.pdf>>
- Hautamäki, Terttu, tekninen tuki, ABB Oy. Re: S203M-C2. Sähköpostiviesti [tuomo.kanniainen@protacon.com](mailto:tuomo.kanniainen@protacon.com) 13.5.2013.
- Havunen, Ilpo & Kaartinen, Simo & Korpinen, Leena & Lehtelä, Riitta & Silvennoinen, Sami. Sähkökoneet, osa 1. Hakupäivä 8.1.2013.  
<[http://www.leenakorpinen.fi/archive/svt\\_opus/10sahkokoneet\\_1osa.pdf](http://www.leenakorpinen.fi/archive/svt_opus/10sahkokoneet_1osa.pdf)>
- Hietalahti, Lauri 2011. Muuntajat ja sähkökoneet, 1. painos. Tampere: Amk-Kustannus Oy
- Huotari, Kari & Partanen Jarmo 1998. Teollisuusverkkojen oikosulkuvirtojen laskeminen. Opetusmoniste 3. Lappeenrannan teknillinen korkeakoulu, Lappeenranta
- Häsä, Sanna 2009. Generaattorisuojauksen uusinta. Diplomityö. Teknillinen korkeakoulu, Espoo.
- Ilitchov, Ilja 2012. Dieselgeneraattorin jännitesäätäjän koestuslaitteiston suunnittelu. Opinnäytetyö. Satakunnan ammattikorkeakoulu, Pori.
- Laiti, Petteri 2010. Taajuusmuuttajaan perustuva voimantuotannon liittäminen heikkoon sähköverkkoon. Insinööriyö. Metropolia Ammattikorkeakoulu, Helsinki.
- Lana, Andrey 2009. Pienitehoisen CHP-laitoksen verkkoonliityntä. Diplomityö. Lappeenrannan teknillinen yliopisto, Lappeenranta.
- MDA Service Oy 2012. Tahtikoneen tarkastusraportti. Hakupäivä 5.5.2013.

- Martimo, Antero 2011. Relesuojaus. Luentomoniste. Kemi-Tornio ammattikorkeakoulu, Kemi.
- Marttinen, Minna 2010. Vesivoimageneraattorien magnetointijärjestelmien eliniän arviointi. Diplomityö. Tampereen teknillinen yliopisto, Tampere.
- Mörsky, Jorma 1992. Relesuojaustekniikka, 1. painos. Hämeenlinna: Otatieto Oy.
- Polarmit Oy 2013. Energiamittauslaitteiston suunnitteluohje. Hakupäivä 26.3.2013.  
<[http://www.polarmit.fi/assets/site/files/apua\\_sahkomittauksiin/Mittausohje\\_jakeluv\\_erkko.pdf](http://www.polarmit.fi/assets/site/files/apua_sahkomittauksiin/Mittausohje_jakeluv_erkko.pdf)>
- Räty, Marko 2010. Finlaysonin vesivoimalaitoksen generaattoriuusinnat. Opinnäytetyö. Tampereen ammattikorkeakoulu, Tampere
- Salminen, Petri 2008. Teollisuusverkon mallintaminen ja vikavirtatarkastelut. Diplomityö. Tampereen teknillinen yliopisto, Tampere.
- Satakunnan ammattikorkeakoulu. Laivojen sähköasennukset. Hakupäivä 7.5.2013.  
<<http://salabra.tp.samk.fi/er/siirto/laiva.doc>>
- Schneider Electric 2003. Masterpact NW08-63 käyttäjän käsikirja. Hakupäivä 9.3.2013.  
<[http://www.global-download.schneider-electric.com/8525797C002E49F6/all/0BB6FEB88FB8A6DB852579E00005DA70/\\$File/masterpact\\_nwfi.pdf](http://www.global-download.schneider-electric.com/8525797C002E49F6/all/0BB6FEB88FB8A6DB852579E00005DA70/$File/masterpact_nwfi.pdf)>
- Tiainen, Esa 2006. D1 käsikirja rakennusten sähköasennuksista, 23. painos. Espoo: Sähköinfo Oy.
- Tiainen, Esa 2008. Maadoitusopas, 1. painos. Helsinki: Sähköinfo Oy
- Uski, Sanna 2001. 20 kV virta- ja jännitemuuntajat. Seminaarityö. Lappeenrannan teknillinen korkeakoulu, Lappeenranta.
- Vuorinen Toni 2013. Tahtigeneraattorin magnetointi Sinamics-teknologiaa hyödyntäen. Opinnäytetyö. Jyväskylän ammattikorkeakoulu, Jyväskylä.

## LIITTEET

- Liite 1. Jäänmurtajan kiskostokaavio
- Liite 2. Eristystilan valvontapiirikaavio
- Liite 3. AG1 pää- ja mittauspiirikaavio
- Liite 4. AG1 dieselin ohjauspiirikaavio
- Liite 5. Asennuslevyjen AG1 ja B14 layout-kuvat
- Liite 6. AG1 kytkentälista
- Liite 7. AG1 asennuslevyjen komponenttiluettelot
- Liite 8. Suojareleen koestuskytkentä
- Liite 9. AG1 suojareleiden testauspöytäkirja