



**KESKITETYN VARAVOIMAJÄRJESTELMÄN SOVELTUVUUS SAIRAALAKO-
KONaisuuden SÄHKÖVERKON VARMISTAMISEEN**

Lappeenrannan–Lahden teknillinen yliopisto LUT

Sähkötekniikan diplomityö

2026

Jukka Rostedt

Tarkastaja(t): Apulaisprofessori Niko Nevaranta

Tutkijaopettaja Tuomo Lindh

TIIVISTELMÄ

Lappeenrannan–Lahden teknillinen yliopisto LUT

LUTin energiajärjestelmien tiedekunta

Sähkötekniikka

Jukka Rostedt

Keskitetyn varavoimajärjestelmän soveltuvuus sairaalakokonaisuuden sähköverkon varmistamiseen

Sähkötekniikan diplomityö

2026

75 sivua, 22 kuvaa, 2 taulukkoa ja 3 liitettä

Tarkastaja(t): Apulaisprofessori Niko Nevaranta

Tutkijaopettaja Tuomo Lindh

Avainsanat: keskitetty varavoima, varavoimajärjestelmä, sairaalasähköjärjestelmä, keski-jänniteverkko, saarekekäyttö, varavoimageneraattori, kuormanhallinta, luotettavuus

Tässä diplomityössä arvioidaan, voidaanko sairaalakokonaisuuden hajautetut rakennuskoh-
taiset varavoimageneraattorit korvata keskitetysti sijoitetulla varavoimajärjestelmällä. Ta-
voitteena on, että kriittisten toimintojen sähkönsyötön varmuus säilyy tai paranee ja että sa-
malla järjestelmän kokonaiskustannukset sekä käytön ja kunnossapidon vaatavuus pienene-
vät. Tarkastelu kohdistuu keskijännitetasoiseen toteutukseen, jossa varavoimatuotanto liite-
tään sairaala-alueen 10,5 kV verkkoon ja järjestelmä toimii sähkökatkon aikana saarekkeena.

Arviointi perustuu kirjallisuuskatsaukseen, kuormitus- ja mitoituslaskentaan, valmistajakoh-
taiseen generaattoridokumentaatioon sekä järjestelmätason kustannus- ja riskitarkasteluun.
Lisäksi tarkastellaan jakeluketjun yhteisten komponenttien vaikutusta toimintavarmuuteen
katkaisijoiden vikaantumisnopeuteen perustuvalla esimerkkilaskennalla. Kuormien luokit-
telu ja syötönsiirtoaikavaatimukset kytketään kuormanhallintaan siten, että kriittiset vara-
voimaryhmät voidaan turvata myös tilanteessa, jossa yksi generaattoriyksikkö on poissa
käytöstä.

Tulosten perusteella keskitetty, keskijännitteellä toteutettu varavoima voidaan arvioida to-
teutettavaksi laajassa sairaalakokonaisuudessa, kun toteutussuunnittelussa varmistetaan suo-
jaus-, selektiivisyys- ja automaattoratkaisut sekä käyttötilanteiden hallinta. Hyödyt painot-
tavat pienjännitekaapeloinnin ja jännitetason noston tarpeen vähenemiseen, huollon ja tes-
tauksen keskittämiseen sekä polttoainehuollon hallinnan yksinkertaistamiseen. Keskittämi-
sen keskeinen haitta on riippuvuus yhteisistä vikapisteistä, minkä vuoksi vaihtoehtoiset syöt-
törakenteet, redundanssi ja kuormanhallinta korostuvat ratkaisun toiminnallisina edellytyk-
sinä.

ABSTRACT

Lappeenranta–Lahti University of Technology LUT

LUT School of Energy Systems

Electrical Engineering

Jukka Rostedt

Suitability of a centralized backup power system for securing the electrical network of a hospital complex

Master's thesis

2026

75 pages, 22 figures, 2 tables and 3 appendices

Associate Professor Niko Nevaranta, Associate Professor Tuomo Lindh

Keywords: centralized backup power, emergency power system, hospital electrical system, medium-voltage network, islanded operation, standby generator, load management, reliability

In this master's thesis, the feasibility of replacing a hospital complex's distributed, building-specific standby generators with a centrally located emergency power system is evaluated in a way that maintains or improves the security of supply for critical functions while reducing total system costs and the demands of operation and maintenance. The analysis focuses particularly on a medium-voltage implementation in which emergency power generation is connected to the campus 10.5 kV network and the system operates as an island during a power outage.

The evaluation is based on a literature review, load and sizing calculations, manufacturer-specific generator documentation, and a system-level cost and risk assessment. In addition, the impact of shared components in the distribution chain on reliability is examined through an example calculation based on circuit-breaker failure rates. Load classification and transfer-time requirements are linked to load management so that critical emergency power groups can be secured even when one generator unit is out of service.

Based on the results, centralized emergency power implemented at medium voltage can be considered feasible in a large hospital campus, provided that the detailed design ensures appropriate protection, selectivity, and automation solutions as well as operational control of different use cases. The benefits are primarily related to reducing low-voltage cabling and the need for increasing voltage level, centralizing maintenance and testing, and simplifying fuel supply management. The key disadvantage of centralization is dependence on common points of failure, which is why alternative supply configurations, redundancy, and load management are emphasized as functional prerequisites for the solution.

SYMBOLI- JA LYHENNELUETTELO

Muuttujat

$p_{\varepsilon}, p_{\cdot\varepsilon}$	tehokerroin
t, v	aika, vuosia
$N(t)$	ehjien yksiköiden odotettu lukumäärä hetkellä t
N_0	alkuhetken ehjien lukumäärä
$N_v(t)$	vikaantuneiden määrä hetkellä t
$F(t)$	yksittäisen katkaisijan vikaantumistodennäköisyys
$R(t), r$	yksittäisen katkaisijan toimintatodennäköisyys
A_i, B_i, C_i, D_i	katkaisijoiden onnistumistapahtuma ($i = 1, 2, 3 \dots$); onnistuminen tarkoittaa katkaisijan toimintaa suunnitellulla tavalla
S_1, S_2, S_3	rakennuksen jakelun onnistumistapahtuma
$P(S_i)$	syötön onnistumistodennäköisyys ($i = 1, 2, 3$)
$F(S_i)$	syötön epäonnistumistodennäköisyys ($i = 1, 2, 3$)
Eta, η	hyötysuhde
I_k''	oikosulkuvirta, A
I_k	jatkuva vikavirta, A
λ	vikaantumisnopeus, $1/v$
C	integroitivakio

Lyhenteet, termit, yksiköt ja symbolit

$N+1$	mitoitusperiaate, jossa järjestelmään on toteutettu yksi ylimääräinen laiteyksikkö normaalisti tarvittavan kapasiteetin lisäksi (redundanssi)
N	laiteyksiköiden vähimmäismäärä, joka normaalisti tarvitaan tarkasteltujen kuormien syöttämiseen vaaditulla teholla
$N-1$	käyttö- tai vikatilanne, jossa yksi laiteyksikkö on poissa käytöstä vikaantumisen tai huollon vuoksi
VV-ryhmä	varavoimaryhmä; kuormat, joiden sähkönsyöttö on turvattava kaikissa käyttötilanteissa, mukaan lukien yksittäisen generaattorin vikaantuminen
NV-ryhmä	normaalivoimaryhmä; kuormat, jotka voidaan tarvittaessa irrottaa tai rajoittaa vikatilanteissa tai pitkäkestoisessa saarekekäytössä
FTA	Fault tree analysis
suursaareke	usean sairaalan muodostama sähköverkon saareke, joka voidaan erottaa valtakunnanverkosta; ei rakennuskohtaisia varavoimasaarekkeita.
COP	Continuous Power -generaattorikäyttöluokka
PRP	Prime Power -generaattorikäyttöluokka
LTP	Limited-time running Power -generaattorikäyttöluokka
ESP	Emergency Standby Power -generaattorikäyttöluokka
DCP	Data Centre Power -generaattorikäyttöluokka
UPS	Uninterruptible Power Supply, keskeytymätön tehonsyöttö
DRUPS	Diesel Rotary UPS, dieselmootorilla varmistettu pyörivä UPS
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers
HVO	Hydrotreated vegetable oil
MVA	Megavoltiampeeri
MW	Megawatti
kV	kilovoltti
kVA	kilovolttiampeeri
kW	kilowatti
A	ampeeri
V	voltti
U	unioni, joukko-opissa
\cap	leikkaus, joukko-opissa

Sisällysluettelo

Tiivistelmä

Abstract

Symboli- ja lyhenneluettelo

1	Johdanto.....	9
2	Kirjallisuuskatsaus ja aiempi tutkimus.....	10
2.1	Varavoimageneraattoreiden luotettavuus empiirisen tutkimuksen valossa	11
2.2	Saarekekäytön luotettavuustarkastelut kirjallisuudessa	12
2.3	Sähkönsyötön jatkuvuuden laadullinen arviointi sairaalaympäristössä.....	13
2.4	Integroitujen varavoima- ja mikroverkkoratkaisujen oletukset ja rajoitteet	14
2.5	Kirjallisuuskatsauksen johtopäätökset	15
3	Tutkimusmenetelmät ja analyysit	16
3.1	Kuormitus- ja mitoituslaskenta.....	16
3.2	Vikavirtojen tarkastelu ja analyysin rajaukset.....	17
3.3	Varavoimajärjestelmän käynnistymisjärjestys ja kuormien kytkentä.....	18
3.4	Kustannus- ja riskianalyysi	19
3.4.1	Investointikustannukset.....	19
3.4.2	Käytön ja kunnossapidon kustannukset	20
3.4.3	Toiminnalliset riskit ja muutokset käytön aikana	21
3.4.4	Järjestelmätason riskit	22
4	Sähkönsyötön varmuus sairaalaympäristössä.....	23
4.1	Varavoimajärjestelmien merkitys ja perinteiset ratkaisut	23
4.2	Varavoiman vikatilanteet sairaaloissa.....	24
4.3	Hajautetun ja keskitetyn varavoiman vertailu	25
4.3.1	Varavoiman jakeluketju ja vikapisteiden lukumäärä	26
4.4	Hajautettu varavoima	27
4.4.1	Toteutusperiaate ja edut.....	27
4.4.2	Haasteet laajassa sairaalakokonaisuudessa.....	28
4.5	Keskitetty varavoima	29
4.5.1	Järjestelmätason hallinta ja polttoainehuolto.....	29
4.5.2	Jännitetaso valinnan teknistaloudelliset perusteet	31
4.6	Standardien näkökulma varavoimaratkaisun valintaan.....	32

4.6.1	Hajautettu varavoima standardien näkökulmasta (0,4 kV toteutus)	33
4.6.2	Keskitetty varavoima standardien näkökulmasta	34
4.7	Kuormien luokitus, syötönsiirtoajat ja järjestelmätason mitoitus	34
4.7.1	Syötönsiirtoaika korkeintaan 0,5 sekuntia.....	35
4.7.2	Syötönsiirtoaika korkeintaan 15 sekuntia.....	36
4.7.3	Syötönsiirtoaika yli 15 sekuntia.....	36
4.8	Varavoimasyötettyjen liityntöjen tunnistettavuus	37
4.9	Standardien rooli suunnitteluratkaisujen reunaehtoina	37
5	Keskitetyn varavoimaratkaisun tarkastelu.....	38
5.1	Varavoimakuormien toiminnalliset ryhmät.....	40
5.2	Varavoimakoneiden käyttöluokitukset	40
5.3	Keskijännitegeneraattorien liitäntä- ja kytkentäperiaatteet	42
5.3.1	Liitäntä keskijänniteverkkoon ja saarekekäyttö.....	43
5.3.2	Rinnankäyttö, kuormanjako ja tahdistus	44
5.3.3	Suojaus, automaatio ja käytettävyys	45
5.4	Laitekoonpano	46
5.4.1	Konttiratkaisu	46
5.5	Toteutuksen vaikutukset tilankäyttöön ja asennusaikaan	48
5.6	Generaattorien kytkentäkaavio	51
5.6.1	Katkaisijoiden vikaantumistodennäköisyyden arviointi	53
6	Tulokset ja johtopäätökset	59
6.1	Keskeiset päätulokset.....	59
6.2	Kustannus- ja tilasäästöjen arviointi	60
6.3	Luotettavuus ja huoltovarmuus	61
6.4	Kestävän kehityksen näkökulmat	62
6.5	Keskitetyn varavoimaratkaisun soveltuvuus sairaalakokonaisuuksiin	62
6.6	Jatkokehityksen ja tutkimuksen tarpeet	63
	Lähteet	65

Liitteet

Liite 1. Päämuuntajan tehonsiirron kuvaajat ajan funktiona

Liite 2. Caterpillarin generaattorin tekninen dokumentaatio

Liite 3. Stamfordin generaattorin tekninen dokumentaatio

Turnitin

Tämän opinnäytetyön alkuperäisyys on tarkistettu Turnitin – samankaltaisuuden tarkastuspalvelun avulla.

Tekoäly

Tämän opinnäytetyön kirjoittaja Jukka Rostedt on käyttänyt tekoälytyökaluna OpenAI:n ChatGPT:tä. Työkalua käytettiin kielen- ja tekstinhoitoon, eli tekstin muotoilun hiomiseen akateemiseen tyyliin sekä oikeinkirjoituksen tarkistamiseen.

Vastuu

Kirjoittaja, Jukka Rostedt, ottaa täyden vastuun tämän opinnäytetyön sisällöstä ja on tarkistanut ja muokannut mahdollisen tekoälytyökalujen käytön myötä syntyneen sisällön.

1 Johdanto

Suurissa sairaalakokonaisuuksissa sähkönsyötön varmuus on keskeinen osa toiminnan turvallisuutta. Varavoimajärjestelmät on perinteisesti toteutettu hajautetusti useilla rakennuskohtaisilla generaattoreilla, jotka on sijoitettu eri rakennuksiin sairaala-alueella. Sähkönsyötön varmuuden merkitys kasvaa jatkuvasti, sillä sairaalatoiminnan sähköntarve lisääntyy ja toimintojen kriittisyys korostuu erityisesti pitkäkestoisissa häiriötilanteissa.

Tässä diplomityössä tarkastellaan mahdollisuutta keskittää sairaalakokonaisuuden varavoimatuotanto yhteen yhteiseen järjestelmään. Tarkastelun kohteena on, miten keskitetty varavoimaratkaisu vaikuttaa kustannuksiin, luotettavuuteen, huoltovarmuuteen ja järjestelmän hallittavuuteen verrattuna perinteiseen hajautettuun toteutustapaan. Lisäksi arvioidaan, missä laajuudessa koko sairaalakokonaisuuden sähkönkäyttö voidaan kattaa varavoimalla ja missä tilanteissa kuormien rajaaminen on perusteltua.

Aiempi tutkimuskirjallisuus painottuu pääasiassa jakeluverkkojen luotettavuuslaskentoihin kriittisissä käyttöpaikoissa (Marqusee and Jenket, 2020), ei niinkään hajautetun varavoiman keskittämiseen. Aiemmat tutkimukset ovat keskittyneet varavoimajärjestelmien toimivuuteen ja käynnistysvarmuuteen yksittäisissä laitoksissa.

Tutkimusongelmana on selvittää, voidaanko useat hajautetut rakennuskohtaiset varavoimageneraattorit korvata keskitetysti sijoitetulla varavoimajärjestelmällä siten, että kriittisten toimintojen sähkönsyötön varmuus säilyy tai paranee ja samalla järjestelmän kokonaiskustannukset ja ylläpidon vaatavuus pienenevät. Työn tavoitteena on arvioida keskitetyn varavoimaratkaisun teknisiä edellytyksiä, mitoitusperiaatteita ja käyttövarmuutta sairaalakokonaisuuden keskijänniteverkossa sekä tunnistaa ratkaisun keskeiset hyödyt ja rajoitteet.

Työ rajataan varavoimajärjestelmän rakenteelliseen ja järjestelmätason tarkasteluun. Rakennuskohtaisen sähkönsyötön varmistuksen yksityiskohtainen mitoitus, polttoainehuollon operatiivinen logistiikka sekä ympäristö- ja lupakysymykset jätetään tarkastelun ulkopuolelle. Tarkastelu ei myöskään sisällä yksityiskohtaista toteutussuunnittelua, kuten kaapelointien tai suojausasetusten lopullista mitoitusta.

Johdantoa seuraa kirjallisuuskatsaus ja menetelmät, minkä jälkeen esitetään vaatimukset ja keskitetyn varavoimaratkaisun analyysi sekä tulokset ja johtopäätökset.

2 Kirjallisuuskatsaus ja aiempi tutkimus

Sähköjärjestelmien luotettavuutta poikkeus- ja häiriötilanteissa on perinteisesti tarkasteltu yksittäisten komponenttien suorituskyvyn kautta, mutta viimeaikainen tutkimus korostaa järjestelmätason tarkastelua, jossa sähkönsyötön varmuus nähdään teknisten, taloudellisten ja toiminnallisten tekijöiden yhteisvaikutuksena (Zhang *et al.*, 2022). Tällöin luotettavuus ei ole yksinomaan laitteiden vikaantumistodennäköisyyksien summa, vaan seurausta koko järjestelmän rakenteesta, ohjattavuudesta ja päätöksenteon periaatteista.

Sähköverkon häiriötilanteita ja niihin liittyvää resurssien kohdentamista on käsitelty tutkimuskirjallisuudessa päätöksenteko-ongelmina, joissa joudutaan tasapainottamaan useita keskenään ristiriitaisia tavoitteita (Liu *et al.*, 2023). Näitä ovat esimerkiksi taloudellisten menetysten minimointi, kriittisten toimintojen turvaaminen sekä järjestelmän oikeudenmukainen ja hallittu käyttö häiriötilanteen aikana, joihin vaikuttavat olennaisesti jo ennakkoon tehdyt investointi- ja rakenneratkaisut. Tutkimuksissa on esitetty malleja, joissa sähkönjakelun ja -rajoittamisen ratkaisuja arvioidaan usean kriteerin perusteella, ja joissa korostuu koko järjestelmän toiminnan optimointi yksittäisten osajärjestelmien sijaan (Liu *et al.*, 2023). Keskeinen havainto on, että rakenteelliset ratkaisut – kuten verkon topologia, syöttöpisteiden lukumäärä ja varavoiman sijoittelu – vaikuttavat ratkaisevasti siihen, miten järjestelmä käyttäytyy vakavissa häiriötilanteissa.

Varavoimajärjestelmien osalta tämä tarkoittaa sitä, että hajautettu ja keskitetty toteutustapa eivät ole ainoastaan teknisiä vaihtoehtoja, vaan ne edustavat erilaisia järjestelmätason toimintamalleja. Hajautetussa ratkaisussa luotettavuus perustuu useisiin toisistaan riippumattomiin yksiköihin, joiden toiminta ja kunto vaihtelevat, kun taas keskitetty ratkaisu nojaa yhtenäiseen tuotantokokonaisuuteen, jossa kuormanjako, priorisointi ja vikatilanteiden hallinta voidaan toteuttaa koordinoidusti. Aiempi tutkimus viittaa siihen, että järjestelmän kokonaistoimintavarmuus häiriötilanteissa määräytyy pitkälti siitä, kuinka hyvin nämä hallintamekanismit on toteutettu, eikä pelkästään varavoimakapasiteetin nimellistehosta (Marqusee and Jenket, 2020).

Sairaalaympäristössä järjestelmätason näkökulma korostuu erityisesti, koska sähkönsyötön häiriöillä on välitön yhteys potilasturvallisuuteen ja hoitotoiminnan jatkuvuuteen.

Pitkäkestoisissa sähkökatkotilanteissa pelkkä yksittäisten kriittisten kuormien varmistaminen ei välttämättä riitä, jos järjestelmän kokonaisuus ei kykene ylläpitämään toiminnallisesti hyväksyttäviä olosuhteita. Tämän vuoksi varavoimaratkaisun luotettavuutta on perusteltua tarkastella osana koko sairaalakokonaisuuden sähköjärjestelmää, jossa päätöksenteko, kuormien priorisointi ja rakenteelliset valinnat muodostavat yhtenäisen kokonaisuuden. (Liu *et al.*, 2023)

2.1 Varavoimageneraattoreiden luotettavuus empiirisen tutkimuksen valossa

Varavoimajärjestelmien luotettavuutta on kansainvälisessä tutkimuksessa tarkasteltu erityisesti hätä- ja varavoimakäytössä olevien dieselgeneraattorien näkökulmasta (Marqusee and Jenket, 2020). Erityisesti pitkäkestoisissa sähkökatkotilanteissa varavoiman epäonnistuminen ei ole harvinainen poikkeus, vaan tilastollisesti merkittävä riski, joka on syytä huomioida varavoimaratkaisujen suunnittelussa.

Empiirisiin aineistoihin perustuvat analyysit osoittavat, että perinteisesti käytetty keskimääräinen vikaväli ei sovellu kuvaamaan varavoimageneraattoreiden luotettavuutta sähkökatkotilanteissa. Tämä johtuu ennen kaikkea generaattorien käyttöprofiilista. Varavoimageneraattorit ovat suurimman osan elinkaarestaan pysähdyksissä ja käynnistyvät vasta todellisen verkkohäiriön tai testauksen yhteydessä. Tällöin merkittävä osa vikaantumisista liittyy nimenomaan käynnistyshetkeen tai kuorman kytkentään, eikä näitä vikoja kyetä tunnistamaan tai ennustamaan pelkkien käyttöaikaan perustuvien tunnuslukujen avulla.

Tutkimuksissa on myös pyritty arvioimaan varavoimageneraattoreiden luotettavuutta teoreettisista lähtökohdista mallintamalla järjestelmän osakomponentteja ja niiden vikaantumismekanismia (Marqusee and Jenket, 2020). Tällaiset lähestymistavat ovat kuitenkin osoittautuneet epävarmoiksi, koska varavoimageneraattorit muodostavat monimutkaisia kokonaisjärjestelmiä, joissa on suuri määrä erilaisia ja osin toisistaan riippumattomia vikaantumismekanismia. Näitä ovat muun muassa käynnistysjärjestelmän viat, polttoainejärjestelmän häiriöt, säätö- ja ohjausjärjestelmien toimintahäiriöt sekä jäähdytys- ja voitelujärjestelmiin liittyvät ongelmat. Vikaantumiseen vaikuttavat lisäksi huoltokäytännöt, testausjaksot, ympäristöolosuhteet sekä se, kuinka pitkän seisonta-ajan jälkeen generaattori joutuu äkillisesti kuormitettuihin käyttöön.

Keskeinen havainto empiirisessä tutkimuksessa on kunnossapidon ratkaiseva merkitys varavoimageneraattorien luotettavuudelle. Huonosti ylläpidetyt generaattorit epäonnistuvat huomattavasti useammin joko käynnistyksessä tai käytön aikana jo lyhyen käyttöajan kuluessa. Hyvin huolletut ja nykyaikaiset generaattorit ovat selvästi luotettavampia, mutta eivät nekään tarjoa täydellistä varmuutta useiden päivien tai viikkojen mittaisissa sähkökatkolanteissa. Yksittäinen varavoimageneraattori on hyvin huolletunakin vain rajallisen todennäköinen turvaamaan sähkönsyötön koko pitkäkestoisen häiriön ajan. (Marqusee and Jenket, 2020)

Tutkimusten perusteella varavoiman luotettavuus ei ole ensisijaisesti yksittäisen generaattorin tekninen ominaisuus, vaan järjestelmätason kysymys. Generaattorien lukumäärä, keskinäinen redundanssi, kuormien priorisointi, kuormien hallittu irtikytkentä sekä järjestelmän kyky sopeutua vikatilanteisiin määrittävät lopullisen toimintavarmuuden. Tämä korostaa tarvetta tarkastella varavoimaratkaisuja kokonaisina järjestelminä eikä erillisinä laitteina, erityisesti sairaalaympäristössä, jossa sähkönsyötön häiriöillä on välitön vaikutus potilasturvallisuuteen ja toiminnan jatkuvuuteen. (Marqusee and Jenket, 2020)

2.2 Saarekekäytön luotettavuustarkastelut kirjallisuudessa

Aiemmassa tutkimuksessa saarekekäytössä toimivien mikroverkkojen luotettavuutta on tarkasteltu pääosin pienjännitetasoisten, rajatun laajuuden järjestelmien näkökulmasta (Li, Yuan and Li, 2010). Näissä tarkasteluissa mikroverkko irtautuu jakeluverkosta häiriötilanteessa ja toimii itsenäisesti ennalta määritellyn, tyypillisesti lyhyen ajan. Luotettavuusanalyysi keskittyy tällöin komponenttien vikaantumistodennäköisyyksiin käyttöjakson aikana, eikä korjaustoimintaa tai huoltotoimenpiteitä yleensä huomioida.

Tyypillinen lähestymistapa perustuu vikapuuanalyysiin (fault tree analysis, FTA), jossa sähkönsyötön keskeytyminen mallinnetaan kuormakohtaisina ylätapahtuma. Menetelmä mahdollistaa yksittäisten komponenttien, vikajoukkojen ja rakenteellisten riippuvuuksien vaikutuksen arvioinnin lyhytaikaisessa hätäkäytössä. Järjestelmätason luotettavuus johdetaan kuormien epäluotettavuuksista painottamalla niitä kuormien teholla tai kapasiteetilla, jolloin saadaan kokonaismittari mikroverkon toiminnalle poikkeustilanteessa.

Mikroverkkotutkimuksissa korostuu usein paikallisen tuotannon ja energiavarastoinnin rooli sähkönsyötön jatkuvuuden parantamisessa (Li, Yuan and Li, 2010; Marqusee and Jenket, 2020). Tämä lähtökohta perustuu siihen, että tarkasteltavat verkot ovat rakenteeltaan hajautettuja ja niiden ensisijainen tavoite on turvata yksittäisten kuormien sähkönsaanti rajatussa verkko-osassa. Tällaisessa kontekstissa luotettavuus kytkeytyy vahvasti siihen, onko kuorman läheisyydessä omaa tuotantoa tai varastointia.

Sairaalakokonaisuuden keskitettyä varavoimaratkaisua tarkasteltaessa lähtökohta on olennaisesti erilainen. Tavoitteena ei ole yksittäisten kuormien omavaraisuus, vaan koko sairaala-alueen sähkönsyötön hallittu ylläpito, kuormien priorisointi ja järjestelmätason toimintavarmuus pitkäkestoisissa häiriötilanteissa. Mikroverkkokirjallisuudessa esitetyt tulokset eivät siten ole sellaisenaan yleistettävissä keskitettyyn varavoimaan, mutta ne tarjoavat hyödyllisiä menetelmällisiä työkaluja, erityisesti vikapuuanalyysin ja komponenttien kriittisyyden arvioinnin osalta.

Kirjallisuus osoittaa, että luotettavuus poikkeustilanteissa ei ole yksittäisten laitteiden ominaisuus, vaan seurausta järjestelmän rakenteesta, redundanssista ja hallintamekanismeista. Tämä havainto tukee järjestelmätason tarkastelua myös keskitetyn varavoiman yhteydessä, vaikka mikroverkkotutkimusten rakenteelliset oletukset ja mittakaava poikkeavat olennaisesti sairaalakokonaisuuden keskijännitetasoisesta sähköjärjestelmästä. (Li, Yuan and Li, 2010)

2.3 Sähkönsyötön jatkuvuuden laadullinen arviointi sairaalaympäristössä

Sairaalasähköjärjestelmien tarkastelussa luotettavuus ei yksin riitä kuvaamaan sähkönsyötön todellista toimivuutta kriittisissä tilanteissa. Kirjallisuudessa on esitetty lähestymistapoja, joissa sähkönsyötön jatkuvuutta arvioidaan laadullisena kokonaisuutena, joka muodostuu useista toisiinsa liittyvistä tekijöistä (Marqusee and Jenket, 2020). Näissä malleissa sähkönsyötön jatkuvuus nähdään moniulotteisena ominaisuutena, jossa tekninen luotettavuus on vain yksi osatekijä muiden joukossa.

Laadullisessa tarkastelussa sähkönsyötön jatkuvuuteen vaikuttaviksi tekijöiksi tunnistetaan muun muassa saatavuus, riittävä teho, sähkön laatu, järjestelmän vastekyky, varmuus sekä turvallisuus. Näiden tekijöiden vaikutus ei ole toisistaan riippumaton, vaan ne muodostavat

kerroksellisen ja osin epälineaarisen kokonaisuuden. Epäluotettavuuden on todettu kasvavan epälineaarisesti käyttöajan kasvaessa (Li, Yuan and Li, 2010). Tämän vuoksi sairaalakäytössä on esitetty malleja, joissa sähkönsyötön jatkuvuutta kuvataan yhtenä yhdistettynä laatumittarina useiden osatekijöiden perusteella.

Keskeinen havainto kirjallisuudessa on, että perinteiset luotettavuusindikaattorit eivät kykene huomioimaan kaikkia niitä tekijöitä, jotka vaikuttavat sähkönsyötön toimivuuteen sairaalaympäristössä. Erityisesti ohjausjärjestelmät, varavoiman käynnistymisviiveet, jakeluketjun eri vaiheet sekä inhimilliset ja organisatoriset tekijät vaikuttavat kokonaisuuteen tavalla, jota ei voida kuvata pelkillä vikaantumisnopeuksilla. Tämän vuoksi epävarmuuden mallintamiseen perustuvat menetelmät on esitetty vaihtoehtoisena tai täydentävänä lähestymistapana.

Laadullinen tarkastelu korostaa järjestelmätason näkökulmaa, jossa sähkönsyötön jatkuvuus muodostuu tuotannon, siirron, jakelun ja kuormien yhteistoiminnasta. Tämä lähestymistapa soveltuu erityisesti sairaalakokonaisuuksien keskitettyihin varavoimaratkaisuihin, joissa tavoitteena ei ole yksittäisten laitteiden omavaraisuus vaan koko järjestelmän hallittu ja enustettava toiminta poikkeustilanteissa. (Stawowy *et al.*, 2021)

2.4 Integroitujen varavoima- ja mikroverkkoratkaisujen oletukset ja rajoitteet

Kirjallisuudessa esitettyjen integroitujen varavoima- ja mikroverkkoratkaisujen hyöty perustuu usein oletukseen, että kuormat, tuotantokapasiteetit ja käytettävyys poikkeavat toisistaan rakennusten välillä. Tällöin kapasiteetin yhteiskäyttö ja kuormien uudelleenjako voivat parantaa järjestelmän kokonaistoimintavarmuutta ja pienentää tarvittavaa kokonaismoititusta. (Zhang *et al.*, 2022)

Mikäli yksittäisen rakennuksen kriittinen kuorma on mitoitettu vastaamaan sen omaa varvoimakapasiteettia ja todellinen kuorma vaihtelee rajatusti tämän mitoituksen sisällä, integroidusta syötöstä ei synny toiminnallista lisähyötyä valtakunnan verkon yhteisessä vikatilanteessa. Tällaisessa tilanteessa jokainen varvoimayksikkö kykenee itsenäisesti syöttämään oman rakennuksensa ilman tarvetta kapasiteetin jakamiseen tai kuormien siirtoon rakennusten välillä. Integraatio ei tällöin paranna sähkönsyötön jatkuvuutta eikä pienennä todennäköisyyttä tai alttiutta sille, että sähkönsyöttö keskeytyy.

Lisäksi integroidut ratkaisut lisäävät järjestelmän rakenteellista ja toiminnallista monimutkaisuutta. Yhteen kytkentä edellyttää laajempaa suojaus-, ohjaus- ja valvontajärjestelmää sekä tarkempaa yhteistoiminnan testausta, mikä voi kasvattaa vikojen leviämiskäskyä ja vaikeuttaa käyttöä poikkeustilanteissa. Mikäli integraatiosta ei saavuteta selkeää luotettavuus- tai mitoitushyötyä, tämä lisämonimutkaisuus ei ole perusteltua.

Edellä esitetty korostaa, että integroitujen varavoimajärjestelmien hyödyt ovat kontekstisidonnaisia. Kirjallisuudessa raportoidut parannukset perustuvat tyypillisesti heterogeenisiin kuormaprofiileihin, epäsymmetriseen mitoitukseen tai tilanteisiin, joissa yksittäisten varavoimayksiköiden käytettävyyden vaihtelee. Homogeenisesti mitoitettussa sairaalakokonaisuudessa, jossa jokainen rakennus on varustettu omaa kriittistä kuormaansa vastaavalla varavoimalla, nämä oletukset eivät välttämättä toteudu, eikä integraatiosta saada vastaavaa hyötyä. (Zhang *et al.*, 2022)

2.5 Kirjallisuuskatsauksen johtopäätökset

Kirjallisuuskatsaus osoittaa, että sairaalasähköjärjestelmien luotettavuutta on tarkasteltu pääosin joko hajautettuihin mikroverkkoihin perustuvina saarekekäyttöanalyysinä tai rakennuskohtaisiin varavoimajärjestelmiin kohdistuvina jatkuvuus- ja epävarmuustarkasteleluina. Integroidut varavoima- ja mikroverkkoratkaisut perustuvat kirjallisuudessa usein oletukseen kuormien ja varavoimakapasiteettien epäsymmetriasta sekä kapasiteetin jakamisen tarpeesta rakennusten välillä. Näiden oletusten varaan rakennetut mallit osoittavat merkittäviä luotettavuus- ja kustannushyötyjä, mutta ne eivät sellaisenaan kuvaa tilannetta, jossa jokainen rakennus on jo itsenäisesti mitoitettu oman kriittisen kuormansa kattamiseen.

Kirjallisuudessa on siten rajallisesti tarkasteltu keskitetyn varavoiman toimintavarmuutta sairaalakokonaisuuden tasolla tilanteessa, jossa järjestelmä on homogeenisesti mitoitettu ja integroidun syötön mahdollinen hyöty ei perustu kapasiteettivajeisiin tai kuormien epäsymmetriaan. Erityisesti puuttuu analyysi siitä, milloin integroidut ratkaisut eivät tuo lisähyötyä ja millaisia järjestelmätason tekijöitä tällöin korostuu.

Tämä työ vastaa tähän tarpeeseen tarkastelemalla sairaalakokonaisuuden keskitettyä varavoimajärjestelmää ja arvioimalla sen toimintavarmuutta ilman mikroverkkokirjallisuudelle tyypillisiä oletuksia hajautetusta tuotannosta tai kuormien epätasaisuudesta.

3 Tutkimusmenetelmät ja analyysit

Tässä luvussa esitetään diplomityössä käytetyt tutkimusmenetelmät ja analyysiperusteet, joiden avulla keskitetyn varavoimaratkaisun soveltuvuutta arvioidaan. Tarkastelu perustuu laskennalliseen mitoitukseen, valmistajakohtaiseen tekniseen dokumentaatioon sekä varavoimajärjestelmän eri käyttötilojen analyysiin.

Tutkimus on luonteeltaan teknistaloudellinen ja järjestelmätasoinen. Analyysi kohdistuu varavoimajärjestelmän mitoitukseen, kuormien jaotteluun, käyttötilanteisiin sekä varavoiman liittämiseen sairaalakokonaisuuden keskijänniteverkkoon. Yksityiskohtainen toteutussuunnittelu, kuten kaapelointien mitoitus, kojeistojen mekaaninen suunnittelu ja suojausasetusten lopullinen yhteensovitus, rajataan työn ulkopuolelle.

3.1 Kuormitus- ja mitoituslaskenta

Varavoimaratkaisun mitoitus perustuu sairaalakokonaisuuden kuormitustietoihin sekä kuormien luokitteluun käyttövarmuusvaatimusten mukaan. Mitoituksessa tarkastellaan kahta käyttötilaa:

1. normaali varavoimakäyttö ja
2. rajoitettu käyttötila, jossa yksi generaattoriyksikkö on poissa käytöstä vian tai huollon vuoksi.

Laskennassa hyödynnetään kriittisten ja ei-kriittisten kuormien erottelua sekä niiden yhteenlaskettua näennäistehoa. Generaattorien sähköiset ominaisuudet ja kuormitettavuus perustuvat valmistajien toimittamaan tekniseen dokumentaatioon.

Tässä työssä $N+1$ viittaa mitoitusperiaatteeseen, jossa järjestelmään on toteutettu yksi ylimääräinen laiteyksikkö normaalisti tarvittavan kapasiteetin lisäksi (redundanssi). Tässä yhteydessä N tarkoittaa sitä laiteyksiköiden vähimmäismäärää, joka normaalisti tarvitaan tarkasteltujen kuormien syöttämiseen vaaditulla teholla. $N-1$ viittaa käyttö- tai vikatilanteeseen, jossa yksi laiteyksikkö on poissa käytöstä vikaantumisen tai huollon vuoksi. $N+1$ kuvaa siis rakenteellista mitoitusta, kun taas $N-1$ kuvaa järjestelmän toimintaa yksittäisen vian aikana.

3.2 Vikavirtojen tarkastelu ja analyysin rajaukset

Oikosulkuvirtojen ja generaattorien sähköisten vikavirtojen arviointi perustuu valmistajadatan mukaiseen generaattorin käyttäytymiseen. Esimerkiksi 4 MVA / 10,5 kV -luokan generaattorien vikavirrat ovat valmistajien ilmoittamien tietojen perusteella luonteeltaan rajallisia. Caterpillarin generaattoridatan mukaan (Liite 2, kuva 2) generaattorin alkuhetken kolmen vaiheen oikosulkuvirta on noin 1240 A. Valmistajan esittämän virran alenema-käyrän perusteella vikavirta pienenee nopeasti alkuhetken jälkeen ja asettuu selvästi alemmalle tasolle vakiintuneessa tilassa. Stamfordin generaattoridatan mukaan (Liite 3, kuva 1) vastaavan generaattorin alkuhetken kolmen vaiheen oikosulkuvirta (I_k'') on noin 1189 A ja jatkuva vikavirta (I_k) noin 660 A per generaattori.

Vaikka tarkasteltavan kuorman mitattu tehokerroin on korkea ($p_f \approx 0,99$), generaattorit on perusteltua mitoittaa tavanomaisen 0,8-tehokertoimen mukaisesti. Generaattorin nimellistehokerroin määrittää käytännössä käyttöalueen, jossa generaattorin lämpö-, virta- ja jäähdytyskesto on mitoitettu jatkuvaan käyttöön. Esimerkiksi 4 MVA:n generaattorilla 0,8-tehokertoimella nimellinen pätöteho on 3,2 MW, eikä samaa konetta voida jatkuvasti kuormittaa suuremmalla pätöteholla pelkästään korkean käyttötehokertoimen vuoksi. Vaikka teoreettisesti 4 MVA:n näennäistehorajalla saavutettaisiin 0,99-tehokertoimella lähes 4 MW pätöteho, rajoittaviksi tekijöiksi muodostuvat generaattorin ja käyttömootorin lämpömitoitus, jäähdytys sekä pitkäaikaiskestävyys.

Poikkeuksellinen mitoitus $p_f = 0,99$:n mukaan pienentäisi generaattorin kVA- ja loistehoreserviä, mikä heikentäisi jännitepitoa ja häiriönsietokykyä erityisesti siirtymä- ja vikatilanteissa, kuten moottorilähdöissä, muuntajien magnetointipiikeissä sekä epälineaaristen kuormien aiheuttamissa transienttitalanteissa. Tästä syystä korkeaa mitattua tehokerrointa hyödynnetään ensisijaisesti käyttöstrategiassa ja kuormanhallinnassa, ei generaattorien mitoitusperusteena. Tässä työssä vikavirtojen tarkastelu perustuu valmistajien ilmoittamiin oikosulkuvirta-arvoihin, eikä kuorman tehokerroin muuta olennaisesti vikavirtojen suuruusluokkaa. Tarkasteltavan kohteen päämuuntajan tehokerroin on laskettu pätö- ja näennäistehojen suhteena, ja sen ajallinen käyttäytyminen on esitetty kaaviossa (Liite 1, kuva 4). Kuvaaja havainnollistaa, että tehokerroin on pääosin korkea, mutta vaihtelee kuormitus- ja käyttötilanteiden mukaan.

Rinnankytkettyjen generaattorien tapauksessa kokonaisvikavirta on likimäärin verrannollinen käytössä olevien generaattorien lukumäärään, jolloin yhden generaattorin poiskytkettyminen pienentää kokonaisvikavirtaa likimäärin suhteessa $1/n$, missä n on rinnankytkettyjen generaattorien lukumäärä.

Yksityiskohtainen oikosulku- ja selektiivisyystarkastelu, mukaan lukien vikavirtojen jakautuminen eri haaroihin, katkaisijoiden katkaisukyky, kiskostojen terminen ja dynaaminen kesto sekä releiden asettelut, rajataan toteutussuunnitteluvaiheeseen. Näiden tarkastelujen tulokset riippuvat valittavista generaattorityypeistä ja niiden lukumäärästä, kaapelireiteistä, muuntajista sekä kojeistovalinnoista, joita ei tässä työssä määritellä. Kyseiset tarkastelut edellyttävät yksityiskohtaista laitekohtaista mitoitusta sekä iteratiivista laskentaa ja suojausasetusten yhteensovitusta osana myöhempää toteutussuunnittelua.

Tässä työssä vikavirtojen tarkastelun tavoitteena on osoittaa, että generaattoripohjaisen varavoimaratkaisun vikavirrat ovat lähtökohtaisesti hallittavissa ja että rajoitetussa käyttötilanteessa kuormanhallinta muodostaa keskeisen keinon järjestelmän toimintavarmuuden varmistamiseksi.

3.3 Varavoimajärjestelmän käynnistymisjärjestys ja kuormien kytkentä

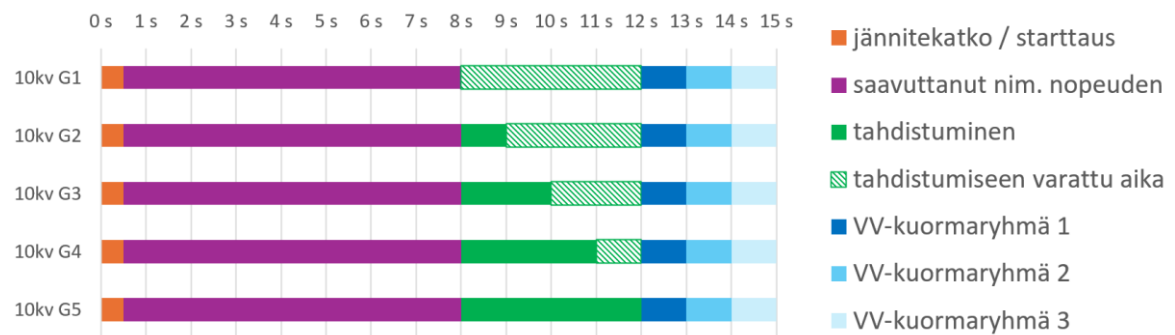
Varavoimajärjestelmän käynnistymisen ja kuormien kytkennän ajallinen eteneminen havainnollistetaan Gantt-kaaviona kuvassa 1. Kaavio kuvaa generaattorien käynnistymistä sähkökatkon jälkeen sekä varavoimakuormien vaiheittaista kytkeytymistä generaattorien saavutettua vaaditun käyttötilan.

Sähkökatkon jälkeen generaattorit käynnistyvät ja kiihtyvät nimellinopeuteen, minkä jälkeen järjestelmässä varataan erillinen tahdistumisaika ennen generaattorien kytkemistä yhteiseen keskijännitekiskostoon. Tahdistumisajan tarkoituksena on varmistaa jännitteen, taajuuden ja vaihesuhteiden yhteensopivuus ennen rinnankytkentää, mikä vähentää generaattoreihin kohdistuvia mekaanisia ja sähköisiä rasituksia.

Kuormien kytkentä on esitetty kuvassa sinisen eri sävyillä. Kaaviossa esitetään ainoastaan varavoimajakelu, sillä normaalivoimajakelu ei ole standardien perusteella sidottu vastaaviin aikarajoihin. Kuormien kytkennät on jaettu useampaan kuormaryhmään, jotka liitetään varavoimaverkkoon porrastetusti. Vaiheittainen kuormien kytkentä rajoittaa generaattoreihin

kohdistuvaa äkillistä kuormitusaskelta ja parantaa järjestelmän vakautta erityisesti käynnistysvaiheessa. Ensimmäisenä kytketään kriittisimmät varavoimakuormat, minkä jälkeen muut varavoimakuormat liitetään järjestelmään generaattorikapasiteetin ja käyttötilan sallissa. Vaikka esimerkiksi Caterpillarin C175-20-dieselgeneraattori sallii valmistajan mukaan 100 % kertakuorman, on kuormien kytkentä tässä työssä esitetty porrastettuna edellä mainituista syistä sekä mahdollisten vikatilanteiden hallittavuuden parantamiseksi.

Kaavio toimii havainnollistavana esityksenä varavoimajärjestelmän toiminnallisesta logiikasta eikä edusta yksityiskohtaista toteutussuunnitelmaa. Tarkat aikaviiveet, kuormaryhmien koostumus sekä kytkentäjärjestys määritellään toteutussuunnitteluvaiheessa käytettävien generaattorien, automaatiojärjestelmän ja kuormaprofiilien perusteella.



Kuva 1. Gantt-kuvaaja varavoiman käynnistymisestä

3.4 Kustannus- ja riskianalyysi

Keskitetyn varavoimaratkaisun kustannus- ja riskianalyysi perustuu teknistaloudelliseen ja toiminnalliseen tarkasteluun, jossa verrataan hajautetun ja keskitetyn varavoiman vaikutuksia investointivaiheessa sekä järjestelmän koko elinkaaren aikana. Tarkastelu ei perustu yksityiskohtaiseen hankekohtaiseen kustannuslaskentaan, vaan suuruusluokkatason arvioon, jonka tavoitteena on tunnistaa ratkaisujen väliset keskeiset kustannus- ja riskitekijät erityisesti käytön aikaisesta näkökulmasta.

3.4.1 Investointikustannukset

Hajautetussa ratkaisussa investointikustannukset jakautuvat useisiin rakennuskohtaisiin generaattoreihin, kojeistoihin, polttoainejärjestelmiin sekä tilakohtaisiin palo-, ilmanvaihto- ja

ääneneristysratkaisuihin. Yksittäisen generaattorin hankintahinta on tyypillisesti alhaisempi kuin keskitetyn ratkaisun suurten yksiköiden, mutta kokonaisinvestointi kasvaa useiden rinnakkaisten järjestelmien vuoksi. Lisäksi jokainen kohde edellyttää oman suunnittelun, lupamenettelyt ja rakentamisen, mikä lisää suunnittelu- ja asennuskustannuksia.

Keskitetyssä ratkaisussa investointikustannus kohdistuu suurempiin generaattoriyksiköihin, keskijännitekojeistoon, automaatioon ja yhteen keskitettyyn polttoainejärjestelmään. Vaikka yksittäisen järjestelmän investointikustannus on suurempi, mittakaavaedut pienentävät kokonaiskustannusta suhteessa siirrettävään tehoon. Keskijännitetasoinen toteutus vähentää raskaita pienjännitekaapeloitteja ja muuntajatarvetta, mikä pienentää sekä materiaalikustannuksia että asennustyön laajuutta.

3.4.2 Käytön ja kunnossapidon kustannukset

Käytön aikaiset kustannukset muodostuvat useista erillisistä huolto- ja ylläpitotoimenpiteistä. Jokainen generaattori edellyttää määräaikaishuollot, testiajot, dokumentoinnin sekä nimettyjen vastuuhenkilöiden ylläpidon. Huoltotoimenpiteet ja testaukset kohdistuvat useisiin fyysisesti erillisiin sijainteihin, mikä kasvattaa työaika, logistiikkakustannuksia ja ihmisten virheiden riskiä.

Erityisen merkittävä kustannus- ja riskitekijä on polttoaineen hallinta. Polttoaine vanhenee kaikissa säiliöissä riippumatta niiden koosta tai käyttöiheydestä. Hajautetussa ratkaisussa tämä tarkoittaa useita erillisiä säiliöitä, joissa polttoaineen laatu on valvottava ja kierrätettävä erikseen. Polttoaineen vanheneminen, veden ja epäpuhtauksien kertyminen sekä biologinen kasvu lisäävät huoltotoimenpiteitä ja riskiä siitä, että generaattori ei käynnisty tai käy häiriötilanteessa luotettavasti. Käytännössä tämä nostaa hajautetun ratkaisun elinkaarikustannuksia merkittävästi verrattuna pelkkiin investointikustannuksiin.

Lisäksi hajautetuissa ratkaisuissa polttoainesäiliöiden koko on usein rajallinen. Rakennuskohtaiset säiliöt mitoitetaan tyypillisesti lyhyttä käyttöaika varten, eikä polttoainekapasiteetti riitä useiden vuorokausien yhtäjaksoiseen ajoon ilman toistuvia täydennyksiä. Tämä kasvattaa operatiivista riskiä pitkäkestoisissa häiriötilanteissa.

Keskitetty ratkaisu mahdollistaa huollon, testauksen ja ylläpidon keskittämisen yhteen sijaintiin. Määräaikaishuollot, koekäytöt ja dokumentointi voidaan toteuttaa yhdenmukaisin

menettelyin, mikä vähentää ylläpidon kokonaiskustannuksia ja parantaa toiminnan ennakoitavuutta. Vastuuhenkilöiden roolit ja vastuut ovat selkeämmin määriteltävissä kuin useiden erillisten järjestelmien tapauksessa.

Polttoaineen hallinta on keskitetyn ratkaisun keskeinen etu. Yksi tai muutama suuri säiliö on helpompi valvoa, kierrättää ja huoltaa kuin useat pienet säiliöt. Keskitetyt säiliöt voidaan pitää normaalitilanteessa osittain täytettyinä, mikä pienentää polttoaineen vanhenemisriskiä. Hyvien liikenneyhteyksien ansiosta polttoainetta voidaan täydentää säännöllisesti myös häiriötilanteen aikana, mikä parantaa huoltovarmuutta erityisesti monen päivän tai viikon mittaisissa sähkökatkoissa.

3.4.3 Toiminnalliset riskit ja muutokset käytön aikana

Hajautettuun ratkaisuun liittyy merkittäviä pitkän aikavälin toiminnallisia riskejä, jotka eivät välttämättä näy investointivaiheessa. Rakennusten saneerausten ja käyttötarkoituksen muutosten yhteydessä sähköntarve kasvaa usein vähitellen tai porrasmaisesti. Rakennuskohtainen generaattori voi tällöin jäädä alimitoitetuksi suhteessa todelliseen kuormaan, vaikka se olisi alkuperäisessä suunnittelutilanteessa ollut riittävä.

Lisäksi saneerattaviin tiloihin saatetaan suunnitella uusia toimintoja tai laitteita, joiden varmistamiseen kyseisen rakennuksen varavoima ei teknisesti tai mitoituksellisesti riitä. Tällaisissa tilanteissa joudutaan joko hyväksymään puutteellinen varmistustaso tai tekemään kalliita ja tilallisesti haastavia jälkikäteen tehtäviä laajennuksia. Hajautetussa mallissa tällaiset ongelmat toistuvat useissa kohteissa erikseen.

Keskitetty ratkaisu sietää paremmin kuormituksen kasvua ja toiminnallisia muutoksia. Usean rakennuksen yhteinen varavoimajärjestelmä voidaan mitoittaa siten, että se sallii kohtuullisen kuormituksen kasvun ilman välittömiä laiteuusintoja. Lisäksi kuormanhallinnan avulla voidaan priorisoida uusia tai muuttuvia toimintoja ilman, että koko järjestelmää joudutaan rakentamaan uudelleen.

3.4.4 Järjestelmätason riskit

Hajautetussa ratkaisussa riskit jakautuvat useisiin kohteisiin, mutta samalla järjestelmän kokonaisriskiprofiili monimutkaistuu. Kokonaisluotettavuus määräytyy heikoimman yksittäisen osajärjestelmän mukaan, eikä varautumista ole helppo arvioida yhtenä kokonaisuutena. Huolto- ja testauskäytäntöjen vaihtelu lisää riskiä siitä, että osa järjestelmistä ei toimi todellisessa häiriötilanteessa odotetulla tavalla.

Keskitetyn ratkaisun keskeinen riski liittyy järjestelmän keskittämiseen: vakava vika keski-jännitekojeistossa, automaatiossa tai polttoainejärjestelmässä voi vaikuttaa laajasti koko sairaala-alueeseen. Näitä riskejä hallitaan rakenteellisilla ratkaisuilla, kuten generaattorien rinnankäytöllä, kuormanhallinnalla, redundanteilla ohjaus- ja valvontajärjestelmillä sekä selkeillä käyttö- ja kunnossapitomenettelyillä. Keskitetty järjestelmä on myös helpommin testattavissa kokonaisuutena, mikä pienentää piilevien vikojen riskiä.

4 Sähkönsyötön varmuus sairaalaympäristössä

Sähkönsyötön varmuuden merkitys korostuu erityisesti häiriö- ja poikkeustilanteissa, joissa sähköverkkoon kohdistuu vikaantumisia (esimerkiksi luonnonilmiöiden seurauksena) tai kriittisen infrastruktuurin sähkönsaanti keskeytyy. Normaalitilanteessa sähkön olemassaolo jää usein huomaamatta, eikä varavoiman tarvetta mielletä.

4.1 Varavoimajärjestelmien merkitys ja perinteiset ratkaisut

Vuonna 1903 vesille laskettu venäläinen jokialus Vandal oli ensimmäinen diesel-sähköisellä potkurikäytöllä varustettu alus. Taustalla oli vuonna 1902 esitetty ajatus asentaa dieselmoottorit jokiproomuihin öljyn kuljetusta varten Volgan alajuoksulta Pietariin ja Suomeen. Aluksen voimalaitos koostui kolmesta 3-sylinterisestä, 120 hevosvoiman dieselmoottorista, joita ajettiin vakionopeudella 240 r/min. Sähköistä voimansiirtoa ohjattiin raitiovaunumaista vipua käyttäen, ja sillä voitiin säätää kolmen potkurin pyörimisnopeutta 30–300 r/min. (Skjong *et al.*, 2015, p. 6)

Sittenmin dieselgeneraattorien sähkötuotanto on tullut osaksi kiinteää rakentamista maalle. Sitä käytetään merkittävästi kriittisen infrastruktuurin sähkövoiman turvaamisessa. Sairaalakohteissa varavoima on perinteisesti toteutettu vaiheittain sitä mukaa, kun uusia käyttöpaikkoja on rakennettu. Varavoimaa on maailmanlaajuisesti pidetty lähinnä välttämättömänä pahana sähkökatkojen varalta, minkä seurauksena sen ylläpitoon ja kehittämiseen on usein kiinnitetty vain rajallista huomiota.

Kokonaisvaltaista sähkövarmuuden tarkastelua ei ole perinteisesti tehty, vaan ratkaisut on toteutettu pääosin vähimmäisvaatimukset täyttävällä tasolla. Rakennushankkeet ovat useimmiten olleet laajuudeltaan rajattuja suhteessa koko sairaala-alueeseen, minkä vuoksi varavoimajärjestelmiä ei ole tarkasteltu tai uudistettu yhtenä kokonaisuutena. Käytännössä tämä on johtanut vaiheittaiseen ja paikalliseen toteutustapaan, jossa kukin hanke on ratkaistu erillisenä kokonaisuutena. Tämän seurauksena sähkön varmennus muodostuu epätasaiseksi: osa verkosta on uudempaa ja hyvässä kunnossa, osa taas teknisesti vanhentunutta.

Kokonaisuutena tämä heikentää järjestelmän yhtenäisyyttä ja siten sen kykyä täyttää sähkövarmuuden keskeinen tavoite.

4.2 Varavoiman vikatilanteet sairaaloissa

Maailmalla tapahtuneet viime vuosien sähkökatkot ovat olleet vaikutukseltaan massiivisia. Espanjan ja Portugalin sähkökatko vuonna 2025 oli Euroopan vakavin viimeiseen 20 vuoteen. Espanjan terveysministeriö tiedotti häiriön mentyä ohi, että he olivat onnistuneet ylläpitämään leikkaussalien, teho-osastojen ja ensiavun välttämättömän toiminnan generaattorien ansiosta. (Soler, 2025)

Yhdysvaltojen ja Kanadan yhteinen sähkökatko 2003 vaikutti noin 50 miljoonaan ihmiseen kahdeksassa Yhdysvaltain osavaltiossa ja kahdessa Kanadan provinssissa. Noin 63 gigawattia kuormaa keskeytyi, mikä vastaa noin 11 % koko Pohjois-Amerikan Eastern Interconnection -sähköjärjestelmän kokonaiskuormasta. Tapahtuman aikana yli 400 siirtojohtoa ja 531 tuotantoyksikköä yhteensä 261 voimalaitoksessa irtosi verkosta. (Andersson *et al.*, 2005, p. 1)

Yhdysvaltojen tapauksessa ei varavoiman osalta selviydytty yhtä hyvin kuin Espanjassa. New Yorkin kaupungin 75 sairaalasta 4 pimeni täysin, vaikka heillä oli varavoimageneraattorit asennettuna käyttöön (Beatty *et al.*, 2006, p. 39).

Yleisesti ottaen New Yorkin kaupungin sairaaloissa varavoiman toimivuus arvioitiin erittäin välttäväksi. Jamaica-, Flushing- ja Brookdale-sairaaloitten omistavan terveysverkoston johtaja David Rosen sanoi, että New Yorkin pitäisi olla kiitollinen, että pahemmalta vältyttiin. ”Sairaalapotilaita siirrettiin eilen kuin shakkinappuloita, koska noin puolilla kaupungin 58 sairaalasta varavoimajärjestelmät pettivät sähkökatkon aikana.” (NYSERDA, U.S. Department of Energy (DOE), and the City of Troy / Rensselaer Polytechnic Institute / Samaritan Hospital, 2016)

Nämä esimerkit korostavat kriittisen sairaalainfrastruktuurin toimintavarmuuden merkitystä laajoissa sähkökatkoissa, joissa varavoimajärjestelmän häiriöt tai puutteet voivat johtaa välittömiin vaikutuksiin potilasturvallisuuteen ja hoidon jatkuvuuteen.

4.3 Hajautetun ja keskitetyn varavoiman vertailu

Hajautetun ja keskitetyn varavoimaratkaisun vertailu on keskeinen osa sairaalakokonaisuuden sähkönsyötön varmistamista koskevaa tarkastelua. Erot ratkaisujen välillä eivät rajoitu yksittäisten generaattorien lukumäärään tai sijoitteluun, vaan koskevat järjestelmän rakennetta, hallittavuutta, käyttövarmuutta sekä teknistaloudellisia reunaehtoja. Laajassa sairaalainfrastruktuurissa varavoimajärjestelmän on kyettävä vastaamaan suuriin tehotarpeisiin ja samalla täyttämään korkeat toimintavarmuus- ja huollettavuusvaatimukset, mikä korostaa järjestelmätason tarkastelun merkitystä.

Keskeinen tarkastelunäkökulma on varavoiman jakeluketju varavoimakoneelta kulutuslaitteelle saakka. Järjestelmän toimintavarmuus ei määräydy ainoastaan käytettävissä olevan varavoimakapasiteetin perusteella, vaan myös sen mukaan, kuinka monen peräkkäisen komponentin kautta sähkö kulkee poikkeustilanteessa. Jakeluketjuun sisältyvät kytkinlaitteet, suojakomponentit, muuntajat ja jakelurakenteet muodostavat sarjassa olevia vikamahdollisuuksia, joiden vaikutus korostuu erityisesti keskitettyä ratkaisua tarkasteltaessa.

Hajautetussa varavoimaratkaisussa varavoiman tuotanto ja jakelu ovat tyypillisesti rakennuskohtaisia. Tällöin varavoimakone syöttää suoraan rajattua osaa rakennuksen omasta jakeluverkosta, ja varavoimakoneen sekä kriittisten kuormien välinen jakeluketju on rakenteellisesti lyhyt. Yksittäisen rakennuksen sisäinen vikaantuminen ei lähtökohtaisesti vaikuta muiden rakennusten varavoimasyöttöön, mikä rajoittaa vian vaikutusalueita mutta toisaalta johtaa useisiin erillisiin ja toisistaan riippumattomiin järjestelmiin.

Keskitetty varavoimaratkaisu muodostaa yhtenäisen, usean sairaalan kokonaisuuden, jossa varavoimakoneet syöttävät yhteistä keskijänniteverkkoa. Tässä mallissa varavoiman jakeluketju on väistämättä pidempi ja sisältää useampia yhteisiä komponentteja, joiden kautta koko järjestelmän sähkönsyöttö kulkee. Tällöin yksittäisten jakeluketjun alkupään komponenttien merkitys korostuu, ja niiden toimintavarmuudella on keskeinen vaikutus koko varavoimajärjestelmän hyödynnettävyyteen poikkeustilanteissa.

Vertailu hajautetun ja keskitetyn ratkaisun välillä ei ole siten yksiselitteisesti kysymys generaattorien määrästä, kokonaistehosta tai investointikustannuksista, vaan järjestelmän rakenteellisesta haavoittuvuudesta, vikojen vaikutusalueesta ja hallittavuudesta. Näiden tekijöiden ymmärtäminen edellyttää tarkastelua, jossa varavoimajärjestelmää arvioidaan

kokonaisuutena tuotannon, jakelun ja kuormien näkökulmasta. Tätä järjestelmätason vertailua syvennetään seuraavissa alaluvuissa tarkastelemalla hajautettua ja keskitettyä varavoimaa erikseen.

4.3.1 Varavoiman jakeluketju ja vikapisteiden lukumäärä

Kun vertaillaan hajautettua ja keskitettyä varavoimaa, keskeinen luotettavuustekijä on kuorman kulkureitti varavoimakoneelta kulutuslaitteelle ja se, kuinka monta sarjassa olevaa komponenttia tähän reittiin sisältyy. Jokainen sarjassa oleva komponentti (esim. katkaisija, kojeistokisko, kaapelointi, muuntaja, suojalaitteet ja ohjauspiirit) muodostaa oman vikamahdollisuutensa, jolloin jakeluketjun pidentyessä myös koko syöttöpolun epäonnistumisen todennäköisyys kasvaa. Keskitetty ratkaisu kasvattaa tyypillisesti yhteisten komponenttien (ja siten yhteisten vikapisteiden) osuutta, kun taas hajautetussa ratkaisussa vikojen vaikutusalue rajautuu useammin paikalliseksi.

Tarkastelu rajataan keskijännitekatkaisijoihin, koska niiden lukumäärä ja kytkentäjärjestelyt eroavat selkeimmin hajautetun ja keskitetyn ratkaisun välillä, ja niille on saatavilla yhtenäisiä kirjallisuuslähtöisiä vikaantumisnopeuksia. Katkaisijan vikaantumisnopeus tulkitaan kattamaan katkaisijan laitekokonaisuuden (mekanismi ja katkaisijan operointiin liittyvät toiminnot), mutta erilliset suojaus- ja ohjausjärjestelmät (esim. releistys, automaatio ja apusähkö) rajataan tarkastelun ulkopuolelle. Muuntajien, kaapelien ja generaattorien vikaantumisnopeudet riippuvat voimakkaasti kohdekohtaisista ratkaisuista ja kunnossapidosta, minkä vuoksi niitä ei sisällytetä tähän määrälliseen vertailuun.

Luotettavuustarkastelussa jakeluketjua voidaan kuvata periaatteellisenä sarja - rinnankytkentänä: sarjassa olevat laitteet lisäävät vikaherkkyyttä, kun taas rinnakkaiset syöttöpolut (esim. rengassyöttö, kahdennetut katkaisijakentät, vaihtoehtoiset kiskojärjestelyt tai valikoitu kaksoissyöttö) tuovat redundanssia ja pienentävät yhden vian vaikutusta. Tässä kappaleessa tarkastellaan jakeluketjua ja vikapisteitä yleisellä tasolla. Tarkempi tapauskohtainen erittely esitetään kytkentäkaavion yhteydessä luvussa 5.6.1.

Vikapisteiden määrällisessä arvioinnissa voidaan käyttää kirjallisuudessa esitettyjä laitekohtaisia vikaantumisnopeuksia lähtöarvoina silloin, kun kohdekohtaisia pitkän aikavälin havaintoaineistoja ei ole saatavilla. IEEE standardi 493 (Institute of Electrical and Electronics

Engineers (IEEE), 2007) kokoaa teollisuus- ja liikerakennusten sähkönjakelujärjestelmissä käytettyjen laitteiden vikaantumisnopeuksia ja antaa suositusarvoja käytettäväksi tilanteissa, joissa parempaa kohdekohtaista dataa ei ole.

IEEE standardi 493 esittää taulukossa 10–2 ulosvedettävät metal-clad-katkaisijat omana laiteluokkana. Katkaisijoita koskevassa taulukon osassa (Kuva 2) rivin “Metal-clad drawout type — Above 600 V^c” mukainen vikaantumisnopeus on $\lambda = 0,0036$ vikaa/yksikköä/vuosi. Tässä yhteydessä yläindeksi “c” viittaa taulukon alaviitteeseen; arvo perustuu IEEE:n kyselyaineistoon, jota on täydennetty CIGRE:n maailmanlaajuisella katkaisijadata-aineistolla.

Edellä mainittua arvoa sovelletaan tässä työssä 10,5 kV ulosvedettävään keskijännitekatkaisijaan, koska rakenne ja keskeiset vikaantumismekanismit ovat vastaavat.

Circuit breakers ^c	Fixed (including molded case)	0.0052
	0 to 600 V—All sizes	0.0042
	0 to 600 A	0.0035
	Above 600 A	0.0096
	Above 600 V ^c	0.0176
	Metal-clad drawout type—All	0.0030
	0 to 600 V—All sizes	0.0027
	0 to 600 A	0.0023
	Above 600 A	0.0030
	Above 600 V ^c	0.0036

Kuva 2. Katkaisijoita koskeva osa standardissa IEEE sandardi 493 taulukosta 10-2, sivu 219

4.4 Hajautettu varavoima

Hajautettu varavoima perustuu rakennuskohtaisiin generaattoriyksiköihin, jotka syöttävät vain omaa lokaalia jakeluaan. Ratkaisumalli on tyypillinen vaiheittain kehittyneissä sairaalakokonaisuuksissa, joissa varavoimaa on toteutettu rakennus kerrallaan eri aikakausina ja osin toisistaan poikkeavin teknisin ratkaisuin.

4.4.1 Toteutusperiaate ja edut

Hajautetun varavoiman keskeinen etu on toteutusten joustavuus. Järjestelmä mahdollistaa vaiheittaisen rakentamisen ja saneerauksen ilman laajaa uudelleenjärjestelyä sairaala-alueen järjestelmissä. Yksittäisen generaattorin huolto tai vikaantuminen vaikuttaa tyypillisesti vain

yhteen rakennukseen tai rajattuun toiminnalliseen kokonaisuuteen, mikä helpottaa huoltokatkosten ajoittamista ja pienentää yksittäisen vikatilanteen välitöntä vaikutusaluetta.

Lisäksi järjestelmä voitu sovittaa paikallisiin tilaratkaisuihin ja toiminnallisiin tarpeisiin, minkä vuoksi hajautettu ratkaisu on ollut luonteva valinta yksittäisissä rakennushankkeissa tai vaiheittain laajentuneissa sairaalaympäristöissä.

4.4.2 Haasteet laajassa sairaalakokonaisuudessa

Laajassa sairaalakokonaisuudessa hajautetun varavoiman haitat korostuvat erityisesti järjestelmän monimutkaisuuden ja käytön hallinnan näkökulmasta. Useat erilliset generaattori-kohteet muodostavat kokonaisuuden, jossa jokaisen yksikön kunto, huoltohistoria ja käyttövarmuus ovat omia riskitekijöitään. Järjestelmän kokonaistoimintavarmuus määräytyy tällöin heikoimman yksittäisen osajärjestelmän mukaan, eikä koko sairaala-alueen varautumista ole helppo arvioida tai hallita yhtenä kokonaisuutena.

Rakennuskohtainen varavoima ei ole käytännössä täsmällisesti mitoitettu rakennuksen kriittisten kuormien mukaan, vaan mitoitus on perustunut hankittujen generaattorien teholuokkiin. Ratkaisut ovat usein toteutuneet portaittain. Ajan saatossa rakennuksen kulutuksen kasvaessa generaattorilta pyydettävä tehontarve on vähitellen lisääntynyt olemassa olevien järjestelmäratkaisujen puitteissa. Tämän seurauksena käytettävissä oleva generaattoriteho voi olla joko osittain alimitoitettu tai vaihtoehtoisesti kattaa jopa koko kuorman.

Keskeinen haaste liittyy myös polttoainehuoltoon. Hajautetussa ratkaisussa jokaisella generaattorikohteella on oma polttoainevarastonsa tai -järjestelynsä, mikä moninkertaistaa polttoaineen hallintaan liittyvät riskit ja kunnossapitotarpeet. Polttoaineen vanheneminen, veden ja epäpuhtauksien kertyminen sekä polttoaineen riittävyyden varmistaminen pitkäkestoisissa häiriötilanteissa edellyttävät säännöllistä seurantaa ja huoltotoimenpiteitä kaikissa kohteissa erikseen.

Useiden erillisten säiliöiden olemassaolo lisää vuotoriskien ja hajuhaittojen todennäköisyyttä, erityisesti silloin kun säiliöt sijaitsevat rakennusten sisätiloissa. Lisäksi polttoainesäiliöt ja niihin liittyvät tekniset tilat vievät merkittävästi arvokasta rakennuspinta-alaa, joka sairaalaympäristössä olisi usein tarkoituksenmukaisempaa hyödyntää hoito-, varasto- tai

muissa tukitoiminnoissa. Hajautetussa mallissa nämä haasteet toistuvat jokaisessa generaattorikohteessa, mikä kasvattaa kokonaisjärjestelmän kuormittavuutta ja hallinnan vaativuutta.

4.5 Keskitetty varavoima

Keskitetty varavoimaratkaisu perustuu tässä diplomityössä useampaan rinnakkaiseen generaattoriyksikköön, jotka muodostavat yhteisen varavoimajärjestelmän. Ratkaisu ei perustu yksittäiseen syöttävään generaattoriin, vaan usean yksikön muodostamaan kokonaisuuteen, jossa yksittäinen generaattori voidaan irrottaa huollon tai vikatilanteen vuoksi ilman, että järjestelmän kriittisimmät toiminnot menettävät sähkönsyöttöä.

Tarkasteltavassa ratkaisussa ei lähtökohtaisesti sovelleta varsinaista $N+1$ -mitoituspäätettä koko kuormitukselle, vaan järjestelmä on mitoitettu siten, että yhden generaattoriyksikön ollessa poissa käytöstä jäljelle jäävillä yksiköillä voidaan edelleen turvata kaikkein kriittisimpien, niin sanottujen varavoimaryhmien sähkönsyöttö. Vähemmän kriittisten kuormien syöttö voidaan tällöin tarvittaessa rajoittaa tai kytkeä irti, mikä mahdollistaa järjestelmän hallitun käytön myös poikkeus- ja huoltotilanteissa.

Tämä lähestymistapa korostaa järjestelmän käytännöllistä toimintavarmuutta ja hallittavuutta sairaalaympäristössä, jossa kaikkien kuormien samanaikainen varmistaminen ei ole välttämätöntä kaikissa tilanteissa, mutta kriittisten toimintojen sähkönsyötön jatkuvuus on turvattava kaikissa olosuhteissa.

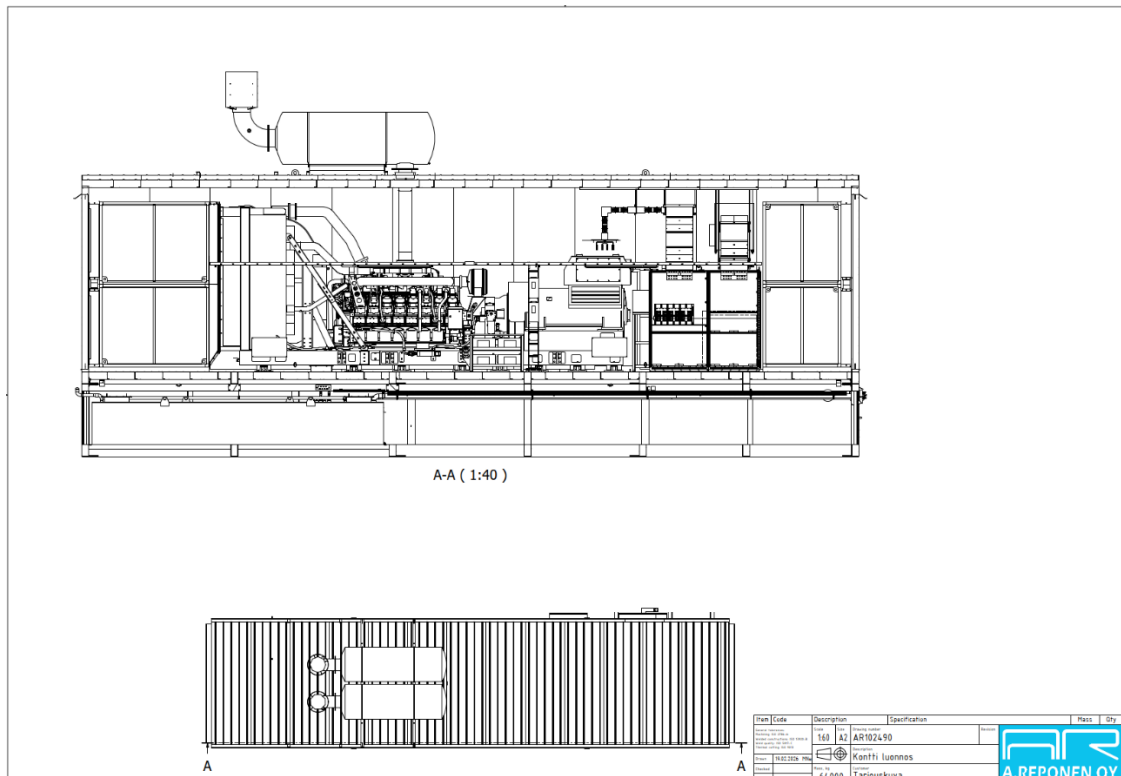
4.5.1 Järjestelmätason hallinta ja polttoainehuolto

Keskitetty varavoimaratkaisu kokoaa sähköntuotannon ja siihen liittyvän infrastruktuurin yhteen loogisesti hallittuun kokonaisuuteen. Rinnakkaisten generaattoriyksiköiden avulla voidaan toteuttaa hallittu kuormanjako, kuormien priorisointi ja vikatilanteiden hallinta siten, että järjestelmä säilyttää toimintakykynsä myös yksittäisen yksikön vikaantuessa. Riskit keskittyvät järjestelmätasolle, mutta ne ovat samalla teknisesti hallittavissa yhtenäisillä laiteratkaisuilla, automaatiolla ja testausmenettelyillä.

Polttoainehuollon näkökulmasta keskitetty ratkaisu yksinkertaistaa kokonaisuutta merkittävästi. Keskitetty polttoainejärjestelmä mahdollistaa polttoaineen laadun, määrän ja kierron

hallinnan yhdestä paikasta käsin, mikä vähentää vanhenemiseen, epäpuhtauksiin ja riittävyyteen liittyviä riskejä. Vuotoriskit ja hajuhaitat voidaan hallita keskitetysti asianmukaisin rakenteellisin ja teknisin ratkaisuin siten, että valvonta on huomattavasti tehokkaampaa kuin useissa erillisissä kohteissa. Lisäksi poikkeustilanteissa polttoainetäydennys voidaan toteuttaa hallitummin ja jatkuvana toimituksena keskitettyyn järjestelmään, jossa yksi säiliöauto kykenee tyypillisesti purkamaan noin 30 m³ polttoainetta yhdellä käynnillä suoraan kohteen varastosäiliöihin. Hajautetussa mallissa täydennykset kohdistuvat sen sijaan useisiin pieniin, usein alle 10 m³:n kokoiisiin generaattorikohtaisiin säiliöihin, jotka sijaitsevat eri puolilla sairaala-aluetta. Tämä lisää täydennysten määrää, pidentää huoltoketjuja ja vaikeuttaa polttoainehuollon hallintaa häiriötilanteissa.

Keskitetty ratkaisu mahdollistaa myös polttoaineen varastoinnin rakenteellisesti tarkoitukseenmukaisella tavalla. Esimerkiksi noin 30 m³:n suuruinen polttoainesäiliö voidaan sijoittaa generaattorikontin alle noin metrin korkuisena korotuksena niin sanottuna belly tank -ratkaisuna kuvassa 3. Tällöin useamman generaattoriyksikön polttoainemäärä voidaan keskittää samaan sijaintiin. Tämä vapauttaa rakennusten sisätiloissa aiemmin polttoainesäiliöille varattuja tiloja muuhun käyttöön, kuten sairaalatarvikevarastoiksi, laajemmiksi UPS-tiloiksi tai muiksi tulevaisuuden tarpeita palveleviksi teknisiksi tiloiksi.



Kuva 3. Esimerkki polttoainesäiliöstä ns. belly tank -ratkaisuna

4.5.2 Jännitetason valinnan teknistaloudelliset perusteet

Keskitetyn varavoimaratkaisun jännitetason valinta on keskeinen teknistaloudellinen kysymys. Kun varavoimajärjestelmän on kyettävä siirtämään noin 12 MVA:n tehotaso rinnakkaisten generaattoriyksiköiden avulla, on viisainta toteuttaa ratkaisu keskijännitetasoisena. Pienjännitetasolla vastaavat tehot edellyttäisivät erittäin suuria virtoja, mikä johtaisi laajoihin kaapelipoikkipinta-aloihin, useisiin rinnakkaisiin kaapelointeihin sekä mittaviin kiskosto- ja kojeistoratkaisuihin.

Pienjännitetasoinen keskitetty varavoima edellyttäisi lisäksi jännitettä nostavia ns. step-up-muuntajia generaattorien ja keskijänniteverkon välille. Tällaiset muuntajat lisäävät investointikustannuksia, vievät merkittävästi tilaa ja edellyttävät omia jäähdytys-, ilmanvaihto- ja paloteknisiä ratkaisuja. Muuntajat aiheuttavat myös jatkuvia energiahäviöitä: ne kuluttavat generaattorien tuottamaa hyötytehoa lämmöksi kuormitustilanteissa ja ottavat normaalitilanteessa jatkuvaa tyhjäkäyntitehoa. Tyypillisessä noin 1600 kVA:n nykyaikaisessa muuntajassa kuormitushäviöt ovat täydellä kuormalla suuruusluokkaa 13 kW, minkä lisäksi syntyy kuormituksesta riippumattomia rautahäviöitä noin 2 kW. Tällöin muuntajan kokonaislämpöhäviöt ovat noin 15 kW. Mikäli kaapeloinnin, suojausten ja tilankäytön osalta olisi mahdollista käyttää suurempaa step-up-muuntajaa, esimerkiksi 3150 kVA:n teholuokassa, ovat muuntajan yhteenlasketut lämpöhäviöt tyypillisesti noin 25 kW muuntajaa kohden. Näiden lämpöhäviöiden hallinta edellyttää erillisiä LVI-tekniisiä ratkaisuja, jotka lisäävät sekä investointi- että käyttökustannuksia ja monimutkaistavat kokonaisjärjestelmää. (IMEFY, n.d.)

On lisäksi huomattava, että varavoimakäytössä muuntajien lämpöhäviöiden poistamiseen tarvittava ilmanvaihto ja jäähdytys toteutetaan käytännössä varavoimageneraattorien tuottamalla sähköllä. Tällöin osa varavoimajärjestelmän tuottamasta energiasta kuluu suoraan lämpöhäviöiden siirtämiseen ympäristöön, mikä heikentää järjestelmän kokonaishyötysuhdetta ja lisää polttoaineen kulutusta. Tästä näkökulmasta ylimääräisten lämpöhäviöiden ja niitä seuraavien jäähdytysratkaisujen syntyminen on myös energiatehokkuuden ja kestävä kehityksen kannalta epäedullista.

Käytännössä generaattorit olisi sijoitettava suhteellisen lähelle step-up-muuntajia, jotta vältettäisiin pienjännitetasolla (0,4 kV) toteutettava raskas ja kustannuksiltaan merkittävä kaapelointi sekä useiden rinnakkaisten, poikkipinta-alaltaan suurien kuparikaapeleiden (esim. 300 mm²) tarve. Tämä rajoittaisi generaattoreiden sijoittelua, kasvattaisi kaapelointi- ja

asennuskustannuksia sekä vaatisi laajoja maa-alueita kaapelireiteille. Keskijännitetasoinen generaattoritoteutus mahdollistaa sen sijaan generaattorien suoran liittämisen sairaala-alueen keskijänniteverkkoon ilman ylimääräisiä jännitetason nostoja. Tämä vähentää komponenttimäärää, pienentää tilantarvetta ja yksinkertaistaa järjestelmän rakennetta. Keskijänniteratkaisussa varavoiman syöttö voidaan toteuttaa varavoimakonteilta sairaala-alueen keskijänniteverkkoon yhdellä ainoalla keskijännitekaapeloinnilla (kolmivaiheinen syöttö), esimerkiksi 160 mm suojaputkeen asennettuna, jolloin kaapelireititys voidaan joustavasti sovittaa maastoon ja tarvittaessa toteuttaa pidempääkin reittiä pitkin.

On tärkeää todeta, että polttoainevarastojen koko, jäähdytysjärjestelmät ja valvontaratkaisut eivät sinällään riipu jännitetasosta, vaan generaattorien teholuokasta ja käyttöprofiilista. Jännitetaso valinnan merkitys korostuu erityisesti sähkönsiirron, kaapeloinnin, muuntajatarpeen sekä koko varvoimajärjestelmän rakenteellisen ja taloudellisen hallittavuuden näkökulmasta.

4.6 Standardien näkökulma varvoimaratkaisun valintaan

Tässä työssä varvoimaratkaisun valintaa tarkastellaan sovellettavien sähköalan standardien näkökulmasta. Tarkastelun painopiste on erityisesti standardisarjoissa (”SFS 600-1:2022 – Pienjännitesähköasennukset,” 2022) ja (”SFS 601:2018 – Suurjännitesähköasennukset ja ilmajohdot,” 2018), sekä näiden sairaalaympäristöä koskevissa erityisosissa, kuten lääkintätiloja koskevassa standardissa SFS 6000-7-710. Tarkastelu perustuu standardien asettamiin periaatteellisiin vaatimuksiin varvoimajärjestelmän rakenteen, käytön ja riskienhallinnan kannalta, ei yksittäisten pykäliden yksityiskohtaiseen tulkintaan. Muita määräyksiä ja ohjeita käsitellään vain siltä osin kuin ne tukevat kokonaiskuvaa hajautettujen ja keskitettyjen varvoimaratkaisujen eroista.

Standardit eivät ainoastaan määrittele teknisiä vähimmäisvaatimuksia, vaan ne ohjaavat koko varvoimajärjestelmän rakennetta, käyttöperiaatteita ja vastuunjakoa. Hajautetun ja keskitetyn varvoimaratkaisun erot eivät näy standardien näkökulmasta pelkästään generaattorien lukumääränä tai tehotasoina, vaan ennen kaikkea siinä, millaisena sähköjärjestelmänä varvoimaa käsitellään ja millaisia vaatimuksia järjestelmän käyttö, kunnossapito ja riskienhallinta edellyttävät. Sairaalaympäristössä nämä erot korostuvat, koska varvoiman

toimintahäiriöillä voi olla välitön vaikutus potilasturvallisuuteen ja hoitotoiminnan jatkuvuuteen.

Standardit muodostavat varavoimaratkaisulle viitekehyksen, jossa pienjännitetasoinen rakennuskohtainen varavoima nähdään osana kiinteistön sisäistä sähkönjakelua, kun taas keskijännitetasoinen, usean rakennuksen varavoima rinnastuu toiminnallisesti sähkön tuotantolaitokseen. Tämä peruslähtökohta vaikuttaa ratkaisevasti siihen, millaisia teknisiä, organisatorisia ja toiminnallisia vaatimuksia varavoimajärjestelmälle asetetaan.

Erityisesti huomioitavaa on, että lääkintätiloja koskevassa standardin kohdassa ”710.560.6.104 Lisävaatimukset varavoimajärjestelmän teholähteille ryhmän 1 ja ryhmän 2 tiloissa” määrätään seuraavasti: Syöttötehon laskelmissa on otettava huomioon vain ISO 8528-1 mukaiset Prime Power PRP-tehoa koskevat määrittelyt. Käytännössä tämä tarkoittaa, että syöttötehon laskelmat ja mitoitusarkitukset tehdään PRP-määrittelyn mukaisesti (aiheesta lisää kappaleessa 5.2).

4.6.1 Hajautettu varavoima standardien näkökulmasta (0,4 kV toteutus)

Hajautetussa varavoimaratkaisussa varavoima toteutetaan tyypillisesti rakennuskohtaisilla pienjännitetasoisilla generaattoreilla, jotka syöttävät rajattua osaa rakennuksen omasta jakeluverkosta. Standardien näkökulmasta tällainen järjestelmä käsitellään osana rakennuksen sähköasennusta, eikä sitä rinnasteta sähkön tuotantolaitokseen. Tämä näkyy erityisesti suojaus-, käyttö- ja dokumentointivaatimuksissa, jotka painottuvat paikalliseen sähköturvallisuuteen ja rajatun kuormaryhmän hallintaan.

Pienjännitetasoinen varavoima mitoitetaan useimmiten täyttämään standardien vähimmäisvaatimukset kriittisten kuormien osalta. Käyttö- ja kunnossapitovastuut ovat rajattuja, ja yksittäisen generaattorin vikaantuminen vaikuttaa tyypillisesti vain yhteen rakennukseen tai toiminnalliseen kokonaisuuteen. Laajassa sairaalainfrastruktuurissa hajautettu toteutustapa johtaa kuitenkin useisiin erillisiin varavoimajärjestelmiin, joiden tekninen taso, ikä, suojausratkaisut ja huoltokäytännöt voivat poiketa toisistaan. Järjestelmät ovat lisäksi eri aikakausilta ja usein eri valmistajien toimittamia.

Standardien näkökulmasta hajautettu varavoima pienentää yksittäisen vikatilanteen välitöntä vaikutusalueetta, mutta kasvattaa koko järjestelmän hallinnan vaativuutta.

Kokonaisuutettavuus muodostuu useiden toisistaan riippumattomien osajärjestelmien yhteisvaikutuksesta, eikä standardeissa ole mekanismeja, joilla laajan sairaala-alueen luotettavuus voitaisiin varmistaa yhtenä kokonaisuutena.

4.6.2 Keskitetty varavoima standardien näkökulmasta

Keskitetty varavoimaratkaisu poikkeaa olennaisesti hajautetusta pienjännitetasoisesta varavoimasta. Kun varavoimajärjestelmä liitetään sairaalakokonaisuuden olemassa olevaan keskijänniteverkkoon ja se kykenee syöttämään laajaa verkkoaluetta saarekekäytössä, järjestelmä rinnastuu toiminnallisesti sähkön tuotantolaitokseen. Tällöin sovellettavat vaatimukset eivät rajoitu yksittäisen rakennuksen sisäiseen sähköasennukseen, vaan koskevat koko keskijänniteverkon turvallista käyttöä, hallintaa ja käyttötilanteiden hallittua ohjausta.

Standardit edellyttävät keskijännitetasoiselta varavoimajärjestelmältä hallittua irtikytkemistä ulkopuolisesta jakeluverkosta, turvallista saarekekäyttöä sekä sellaisia suojaus- ja automaatiotoimintoja, joilla estetään tahdistamattomat kytkennät ja muut vaaralliset käyttötilanteet. Järjestelmän selektiivisyyden on oltava yhteensopiva olemassa olevan keskijänniteverkon kanssa siten, että viat rajautuvat mahdollisimman pienelle verkon osalle eivätkä vaaranna henkilöturvallisuutta tai laitteiston eheyttä.

Keskijännitetasoinen varavoima kuuluu suurjännitesähköasennuksia koskevien vaatimusten piiriin myös silloin, kun varavoiman syöttö toteutetaan olemassa olevaan keskijännitejakeluverkkoon. Tämä korostaa erityisesti normaaliverkon ja varavoiman välisten erotus-, lukitus- ja työmaadoitusjärjestelyjen sekä käyttöorganisaation vastuiden selkeää määrittelyä. Järjestelmä edellyttää dokumentoitua käyttö- ja kunnossapitomallia, nimettyä käytönjohtoa sekä määriteltyjä käyttö-, testaus- ja poikkeustilannemenettelyjä. Standardit eivät kuitenkaan määrittele varavoimajärjestelmän rakennetta tai generaattorien lukumäärää, ja ne jättävät mitoitusratkaisut pääosin suunnittelijan vastuulle edellyttäen, että sähköturvallisuuteen ja käyttövarmuuteen liittyvät perusvaatimukset täyttyvät.

4.7 Kuormien luokitus, syötönsiirtoajat ja järjestelmätason mitoitus

Lääkintätiloja koskevassa standardissa SFS 6000-7-710 varavoimakuormat luokitellaan niiden salliman sähkönsyötön keskeytysajan perusteella. Keskeinen periaate on, että jos sama

varavoimasyöttöpolku palvelee useita kuormia, joilla on eri luokitusvaatimukset, kyseisen syöttöpolun on täytettävä vaativimman eli korkeimman luokan ehdot. Tällä estetään tilanne, jossa vähemmän kriittisten kuormien vaatimukset ohjaisivat koko järjestelmän mitoitusta ja vaarantaisivat potilasturvallisuuden kannalta kriittisten kuormien sähkönsyötön.

On kuitenkin olennaista todeta, että tämä vaatimus koskee varavoimajärjestelmän syöttöpolkua ja kytkentärakennetta, ei yksittäistä generaattoria tai generaattoriryhmää. Sama generaattori tai generaattoriryhmä voi standardien puitteissa syöttää useita kuormaryhmiä, kunhan kuormat on erotettu toisistaan erillisillä lähdöillä, siirtokytkennöillä ja aikaviiveillä. Käytännössä tämä mahdollistaa sen, että kriittiset kuormat kytkeytyvät varavoimalle alle 15 sekunnissa, kun taas vähemmän kriittiset kuormat, kuten osa ilmanvaihdosta, jätteenkäsittelylaitteet jne., voidaan kytkeä generaattorin syötön piiriin esimerkiksi tunnin kuluttua. Tällöin ei ole kyse yhdestä yhtenäisestä varavoimajärjestelmästä useilla luokitusvaatimuksilla, vaan useista rinnakkaisista ja toisistaan erotetuista syöttöpoluista, joilla on omat siirtoaika- ja käyttövarmuusvaatimuksensa.

Standardin vaatimuksen mukaisesti varavoimajärjestelmän tehollähteen on automaattisesti käynnistytävä, jos jännite yhdessä tai useammassa pääsyötön sisältävän rakennuksen pääkeskuksen syöttöjohdossa laskee alle 85 prosenttia nimellisjännitteestä ja vähintään 0,5 sekunnin ajan. Tällä luultavimmin standardi tarkoittaa käynnistämisen aloittamista eikä niinkään vakiintunutta dieselgeneraattorin kierrosnopeutta.

4.7.1 Syötönsiirtoaika korkeintaan 0,5 sekuntia

Kun syöttöjännite laskee alle 85 prosenttiin nimellisjännitteestä vähintään 0,5 sekunnin ajaksi, standardi edellyttää, että tietyt nimetyt lääkintälaittekuormat siirretään automaattisesti varavoimasyötölle siten, että syötönsiirtoaika on enintään 0,5 sekuntia. Tähän ryhmään kuuluvat leikkausvalaisimet, käytön kannalta välttämättömät lääkintäsähkölaitteet ja lääkintälaittejärjestelmät sekä kriittiset elämää ylläpitävät lääkintälaitteet. Näiden kuormien osalta varavoimajärjestelmän tehollähteen on lisäksi kyettävä tuottamaan sähköä vähintään kolmen tunnin ajan. Arvioinnissa voidaan tunnistaa myös muita laitteita, jotka on liitettävä samaan vaatimustasoon kuuluvaan syöttöön. Tämä 0,5 sekunnin raja-arvo tarkoittaa käytännössä, että sähkönsyötön jatkuvuus on varmistettava keskeytymättömällä sähkönsyöttöratkaisulla, kuten UPS-järjestelmällä (Uninterruptible Power Supply, keskeytymätön tehonsyöttö) tai

DRUPS-järjestelmällä (Diesel Rotary UPS, dieselmoottorilla varmistettu pyörivä UPS), tai vaihtoehtoisesti superkondensaattori- tai vauhtipyöräpohjaisella järjestelmällä, koska generaattorin käynnistyksen ja kuormien kytkeytymisen aikaviive ei yksin riitä kattamaan näin lyhyitä jännitekatkoja.

4.7.2 Syötönsiirtoaika korkeintaan 15 sekuntia

Lääkintälaitteet ja lääkintälaittejärjestelmät, joita ei ole liitetty edellä mainittuun 0,5 sekunnin mukaiseen varavoimajärjestelmän teholähteeseen sekä tietyt varavalaistukset on kytkettävä automaattisesti ja korkeintaan 15 sekunnissa varavoimajärjestelmän teholähteeseen, jos yhden tai useamman äärijohtimen jännite laskee alle 85 prosenttia nimellisjännitteestä yli 3 sekunnin ajaksi. Syötön on säilyttävä vähintään 24 tunnin ajan. Huomiolle pantavaa on, että standardin vaatimuksen mukaisesti varavoimageneraattorin käynnistyminen on alkanut jo 2,5 sekuntia aiemmin.

Toiminta-aika 24 tuntia voidaan pienentää vähintään kolmen tunnin toiminta-ajaksi, jos tilan lääkinnälliset tarpeet sen sallivat ja rakennus voidaan evakuoida selvästi alle kolmen tunnin toiminta-ajan sisällä. Tämä ei kuitenkaan ole mahdollista laajassa sairaalakokonaisuudessa.

4.7.3 Syötönsiirtoaika yli 15 sekuntia

Muiden kuin yllä mainittujen laitteiden, jotka ovat välttämättömiä lääkintätoimenpiteiden tai vastaavien toimintojen kannalta, syöttö on kytkettävä automaattisesti (tai käsikäyttöisesti) varavoimajärjestelmän teholähteeseen, joka voi säilyttää syötön 24 tunnin ajan. Tällaisiin laitteisiin kuuluvat standardin ("SFS 600-1:2022 – Pienjännitesähköasennukset," 2022) mukaan esimerkiksi:

1. sterilointilaitteet
2. talotekniset asennukset erityisesti LVI-laitteet, talotekninen huolto ja jätteenkäsittelylaitteet
3. jäähdytyslaitteet
4. keittiölaitteet

5. akkujen latauslaitteet
6. palokunnan tai potilashissit.

Riskinarviointi voi johtaa tämän 24 tunnin ajan pidentämiseen.

4.8 Varavoimasyötettyjen liityntöjen tunnistettavuus

Käyttöturvallisuuden ja toiminnallisen selkeyden näkökulmasta standardit edellyttävät, että varavoimasyötetyt pistorasiat ja liityntäpisteet ovat selkeästi tunnistettavissa. Tämä toteutetaan tyypillisesti värikoodauksella tai muilla yksiselitteisillä merkinnöillä, joiden avulla hoitohenkilöstö voi erottaa varavoimasyötetyt liitännät normaalisyötetyistä. Vaatimus liittyy suoraan potilasturvallisuuteen, sillä kriittisten laitteiden on oltava kytkettyinä liitäntöihin, jotka säilyvät toiminnassa myös sähkökatkon aikana.

4.9 Standardien rooli suunnitteluratkaisujen reunaehtoina

Edellä esitetyn perusteella standardien rooli varavoimaratkaisun valinnassa ei ole määrätä järjestelmän rakennetta tai yhtä ainoaa mitoitusratkaisua, vaan asettaa sille turvallisuuteen, käyttöön ja hallintaan liittyvät reunaehdot. Standardit eivät ota kantaa siihen, toteutetaanko sairaalakokonaisuuden varavoima hajautettuna vai keskitettynä ratkaisuna, eivätkä ne määrää generaattorien lukumäärää tai valmiita teholuokkia. Mitoituksessa on kuitenkin noudatettava standardeissa annettuja määrittelyjä ja laskennan lähtökohtia, kuten ISO 8528-1:n PRP-määritelmää syöttötehon laskelmissa.

Keskitetyn, keskijännitetasoisen varavoimaratkaisun osalta standardit kuitenkin ohjaavat kohti järjestelmätason hallintaa, pitkäkestoista käyttövarmuutta ja ennakoivaa riskienhallintaa. Näiden vaatimusten täyttäminen edellyttää kokonaisvaltaista suunnittelua, jossa varvoimajärjestelmän tekninen toteutus, automaatio, käyttötoiminta ja huoltovarmuus muodostavat yhtenäisen ja toisiaan tukevan kokonaisuuden.

5 Keskitetyn varavoimaratkaisun tarkastelu

Hajautetun ja keskitetyn varavoimaratkaisun välinen vertailu ei ole yksiselitteinen, sillä vaikka keskittäminen tarjoaa etuja järjestelmän hallittavuuden ja yhtenäisyyden näkökulmasta, siihen liittyy myös rakenteellisia haasteita, jotka on tunnistettava osana kokonaisarviointia. Erityisesti keskijännitekojeistojen rooli korostuu keskitetyn ratkaisun yhteydessä, sillä yksittäisten katkaisijakennojen toimintahäiriöt voivat vaikuttaa laajasti koko varavoimajakeluun. Varavoimajärjestelmän suunnittelussa onkin perusteltua pyrkiä mahdollisimman yksinkertaiseen rakenteeseen ja minimoida katkaisijoiden lukumäärä. Käytännössä varavoimalaitteistoon sisältyy kuitenkin väistämättä useita varavoimajärjestelmän omia katkaisijoita, joita tarvitaan generaattorien rinnankäytön hallintaan, keskinäiseen tahdistukseen sekä sähkökatkon jälkeiseen takaisin tahdistumiseen kaupalliseen jakeluverkkoon.

Tässä diplomityössä tarkastellaan, voidaanko sairaala-alueen koko sähkönkäyttö turvata keskitetyn varavoimaratkaisun avulla. Lähtökohtana on, että myös alueen normaalia jakeluverkkoa voidaan syöttää varavoimageneraattoreilla sähkökatkon aikana, jolloin varavoimajärjestelmä toimii häiriötilanteessa sähköntuotannon lähteenä kaikille alueen sairaalarakennuksille.

Tarkastelun taustalla on havainto, että pelkästään yksittäisten kriittisten kuormien varmistaminen ei välttämättä riitä turvaamaan sairaalan toiminnan jatkuvuutta pitkäkestoisissa sähkökatkotilanteissa. Jos normaalia jakeluverkkoa ei syötetä varavoimalla, seurauksena on laaja-alaisia toiminnallisia vaikutuksia, kuten käytävä- ja yleisvalaistuksen merkittävä pimeäminen (vain joka kolmas valaisin on varavoimajakelussa), ilmanvaihdon pysähtyminen sekä jäähdytys- ja vedenjäähdytyskoneiden toiminnan keskeytyminen. Tällaisessa tilanteessa sairaalaympäristön sisäolosuhteet ja toiminnalliset edellytykset voivat heikentyä nopeasti siinä määrin, ettei toimintaa voida jatkaa turvallisesti vuorokausia eikä joissakin tapauksissa edes 24 tunnin ajan, vaikka varsinaiset kriittiset lääkintälaitteet olisivat varavoimasyötön piirissä.

Näin ollen keskitetyn varavoimaratkaisun tarkastelu ei perustu ainoastaan standardien yksittäisiin kuormavaatimuksiin, vaan kokonaisrviioon sairaala-alueen toiminnan edellyttämistä sähkönkäyttötarpeista pitkäkestoisissa häiriötilanteissa. Tällaisessa ratkaisussa varavoiman

ulottaminen myös normaalin jakeluverkon syöttöön muodostuu toiminnallisesta näkökulmasta keskeiseksi kysymykseksi. Standardin asettamat vaatimukset tällaiselle ratkaisulle esitettiin kappaleessa 4.7.3.

Sairaalakokonaisuuden käytönjohtajalta saatujen tehotietojen perusteella 110 kV:n päämuuntajan kautta kulkeva huipputeho on noin 12 MVA. Tehotiedot perustuvat kahden viime vuoden ajalta koottuihin päivittäisiin keskiarvoihin. Tarkastelu osoittaa lievää laskevaa trendiä, mikä viittaa siihen, että ilman merkittäviä uusia kuormia sähkön kokonaistehontarve ei ole kasvamassa. Saneerausten ja laiteusintojen yhteydessä käyttöön otetaan tyypillisesti energiatehokkaampia ratkaisuja, kun taas uusien sairaalarakennusten tai merkittävien uusien laitekokonaisuuksien käyttöönotto kasvattaa tehontarvetta pääasiassa porrasmaisesti.

Päämuuntajan pätö- ja loistehomittaukset osoittavat, että varavoiman mitoituksen kannalta kuormituksen suuruusluokka on vuoden mittakaavassa pääosin melko vakaa (Liite 1, kuva 1), vaikka siinä esiintyy selvä kesäkauden nousu. Vuorokauden sisällä kuormassa on selkeä päivä-yö-vaihtelu (Liite 1, kuvat 5–8) ja mittausprofiileissa näkyy lisäksi keskipäivään ajoittuva lyhytkestoinen kuorman pudotus, joka osuu lounasaikaan. Pätö- ja loistehon taso on korkeimmillaan keskikesällä (Liite 1, kuvat 1 ja 4) ja voisi johtua vedenjäähdytyskoneiden moottorikuormista. Tämä on mitoituksen kannalta oleellinen kuormitustilanne ja tulee pohdita miltä osin tämä sisällytetään turvattaviin kuormiin. Työssä todetaan, että jäähdytys- ja vedenjäähdytyskoneiden toiminnan keskeytyminen heikentää sisäolosuhteita ja suuret vedenjäähdytyskoneet on luokiteltu kuormaryhmään, jonka käyttöä voidaan varavoimatilanteessa rajoittaa tai jaksottaa. Loistehon huippuarvot painottuvat samoihin ajankohtiin kuin pätötehon nousu (Liite 1, kuvat 1–3), ja tehokerroin on suurimman osan ajasta korkea, vaikka siinä esiintyy kuormitustilanteiden mukaisia vaihteluita. Erot arkipäivien ja viikonlopun kuormituksissa on selkeästi havaittavissa kautta linjan (Liite 1, kuvat 1–2).

5.1 Varavoimakuormien toiminnalliset ryhmät

Tässä diplomityössä kuormat jaetaan toiminnallisiin ryhmiin käyttövarmuusvaatimusten perusteella:

1. Varavoimaryhmä (VV-ryhmä) käsittää kuormat, joiden sähkönsyöttö on turvattava kaikissa käyttötilanteissa, mukaan lukien yksittäisen generaattorin vikaantuminen. Näihin kuuluvat muun muassa potilasturvallisuuden kannalta välttämättömät järjestelmät, kuten leikkaussalit, tehohoito, kriittiset hoitoyksiköt sekä niihin liittyvät turva- ja ohjausjärjestelmät. Tämä vastaa standardissa esitettyä korkeintaan 15 sekunnin syötönsiirtoaikaa – kappaleen 4.7.2 mukaisesti.
2. Normaaliveimaryhmä (NV-ryhmä) käsittää kuormat, jotka pidetään toiminnassa tavanomaisissa tilanteissa, mutta jotka voidaan tarvittaessa irrottaa tai rajoittaa vikatilanteissa tai pitkäkestoisessa saarekekäytössä. Ryhmään kuuluvat esimerkiksi osa rakennusten yleisistä toiminnoista ja tukijärjestelmistä – kappaleen 4.7.3 mukaisesti.
3. Siirrettävä tai rajoitettava kuormaryhmä käsittää kuormat, joiden käyttöä voidaan jaksottaa, rajoittaa tai keskeyttää varavoimakäytön aikana ilman välitöntä vaikutusta potilasturvallisuuteen. Tähän ryhmään kuuluvat esimerkiksi suuret vedenjäähdytyskoneet sekä ennalta tarkasti määritetyt ilmanvaihtokoneet, joiden pysäyttäminen tai ajoittainen käyttö on toiminnallisesti hyväksyttävää varavoimatilanteissa.

Tällainen kuormaryhmittely mahdollistaa varavoimajärjestelmän hallitun käytön ja varmistaa, että kriittiset toiminnot säilyvät käytössä myös yksittäisen generaattorin vikaantuessa tai huoltotilanteissa.

5.2 Varavoimakoneiden käyttöluokitukset

ST-käsikirja 31 (myöhemmin ST-31) viittaa generaattorien teho- ja käyttöluokituksissa standardiin ISO 8528, jonka mukaisesti varavoimakoneet jaotellaan seuraaviin pääluokkiin (Sähköinfo Oy, 2019, p.12-13):

”Continuous Power (COP, ISO 8528-1 ja -2): jatkuva teho, jolla laitosta voidaan käyttää rajoittamattoman ajan määritellyissä (esim. ISO 8528-1) olosuhteissa noudattaen valmistajan määrittämää huolto-ohjelmaa.

Prime Power (PRP, ISO 8528-1): varavoimateho (maksimiteho), jolla laitosta voidaan käyttää määritellyissä olosuhteissa (esim. ISO 8528-1) ja noudattaen valmistajan määrittämää huolto-ohjelmaa. Standardin mukaisesti laskettu 24 tunnin jakson vaihtelevan tehon keskiarvo ei saa ylittää 70 %:a PRP-tehosta.

Huomautus: Suomessa on vakiintunut käytäntö, että ”jatkuvalla, vaihtelevalla varavoimateholla” tarkoitetaan PRP-tehoa, johon sisältyy 10 %:n ylikuormitettavuus 1 tunnin ajan 12 tunnin jakson aikana. Tämä noudattaa standardin ISO 3046-1 kohdassa 11.3 ”Types of power application” dieselmoottorin jatkuvalla teholla määriteltyä ylikuormitettavuutta.

Limited-time running Power (LTP, ISO 8528-1): maksimivaravoimateho, jolla laitosta voidaan käyttää enintään 500 tunnin ajan vuodessa määritellyissä (esim. ISO 8528-1) olosuhteissa noudattaen valmistajan määrittämää huolto-ohjelmaa.

Emergency Standby Power (ESP, ISO 8528-1): varavoimateho (maksimiteho), jolla laitosta voidaan käyttää määritellyissä olosuhteissa (esim. ISO 8528-1) ja noudattaen valmistajan määrittämää huolto-ohjelmaa. Standardin mukaisesti laskettu 24 tunnin jakson vaihtelevan tehon keskiarvo ei saa ylittää 70 %:a ESP-tehosta.

Data Centre Power (DCP, ISO 8528-1:2018(E)): maksimivaravoimateho, jonka varavoimakone voi tuottaa syöttäessään vaihtelevaa tai jatkuvaa kuormitusta ilman käyttötuntirajoitusta. Valmistajan on ilmoitettava huolto-ohjelman riippuvuus ajotavasta ja paikan olosuhteista. Pitkä ajo verkon rinnalla ei ole sallittua.”

Varavoimajärjestelmien mitoituksessa generaattorien käyttöluokitus määräytyy suunnitellun käyttöprofiilin perusteella.

Vaikka varavoimajärjestelmä ei ole jatkuvassa käytössä, sitä ei voida mitoittaa lyhytkestoiseksi standby-käyttöön, koska poikkeustilanteiden kestoa ei voida luotettavasti rajata. Tämän vuoksi generaattoreilta edellytetään kykyä useiden vuorokausien yhtäjaksoiseen käyttöön, mikä tarkoittaa vähintään Prime Power -käyttöluokituksen mukaista mitoitusta. Päämuuntajan kuormaprofiili (Liite 1, kuva 1) vastaa luonteeltaan pitkäkestoista ja

kuormitustasoltaan ennustettavaa käyttöä, mikä tukee Prime Power -käyttöluokan mukaista tarkastelua.

Sairaalakäytössä ja yleisesti lääkintätalaluokituksen 1 tai 2 tiloissa syöttötehon laskelmissa on otettava huomioon vain ISO 8528-1 mukaiset Prime Power (PRP) -tehoa koskevat määrittelyt (kappale 4.6).

Prime Power -luokitus mahdollistaa rajoittamattoman vuosikäytön sekä useiden vuorokausien yhtäjaksoisen toiminnan vaihtelevalla kuormituksella. Tämä vastaa sairaala-alueen varavoimalle asetettuja toimintavarmuus- ja huoltovarmuusvaatimuksia sekä mahdollistaa järjestelmän käytön myös harvinaisissa mutta kriittisissä pitkäkestoisissa häiriötilanteissa.

Tässä työssä esitetty generaattori on nimellisesti 4000 kVA -luokan kone, mutta kohteessa sitä operoidaan valmistajan PRP-käyttöluokan mukaisesti, jolloin sallittu nimellisteho on 3600 kVA. Lisäksi voidaan huomata, että tässä käyttöluokassa täydellä kuormalla polttoaineen menekiksi on ilmoitettu 0,6889 m³ tuntia kohden. Karkeasti laskettuna esimerkiksi 4 koneen kokonaisuus kuluttaisi 24 tunnissa n. 66 kuutiota polttoainetta. (Liite 2, taulukko 1).

Polttoaineena voidaan käyttää HVO-polttoainetta (Liite 2, kuva 1), joka on uusiutuva dieselpolttoaine ja soveltuu hyvin varavoimakäyttöön hyvän kylmäkäyttäytymisensä ja varastoitavuutensa ansiosta. HVO ei ole hygroskooppinen eikä muodosta sakkaa.

Hyötysuhteen kuvaajasta (Liite 3, kuva 2) voidaan todeta, että kuormituksen ylittäessä noin 60 % nimellistehosta vaihtovirtageneraattorin hyötysuhde asettuu noin 97,0–97,4 %:n tasolle. Kun vaihtovirtageneraattorin hyötysuhde on korkea ja kuormituksesta vain vähän riippuva jo tästä kuormitustasosta alkaen, sähkötehon ja akselitehon välinen suhde on ennustettava ja vaihtovirtageneraattorin häviöt pienet. Polttoaineen ominaiskulutus määräytyy kuitenkin pääosin moottorin mukaan, joten kuormaryhmien mitoituksessa ja kuorman porrastamisessa on edelleen syytä välttää pitkäaikaista alikuormitusta. Etu korostuu erityisesti kohteissa, joissa varavoimakuorma nousee nopeasti ja pysyy pitkään yli 50 %:n kuormituksella.

5.3 Keskijännitegeneraattorien liitântä- ja kytkentäperiaatteet

Keskijännitegeneraattorien liittäminen sairaala-alueen sähköverkkoon edellyttää selkeästi määriteltä kytkentäperiaatetta, joka mahdollistaa normaalin verkkokäytön, hallitun siirtymisen varavoimakäyttöön sekä turvallisen palautumisen takaisin normaaliverkkoon.

Liitántäratkaisun on täytettävä sähköturvallisuutta, käyttövarmuutta ja huollettavuutta koskevat vaatimukset ST-31:n ohjeistuksen ja sovellettavien standardien mukaisesti.

5.3.1 Liitántä keskijänniteverkkoon ja saarekekäyttö

Generaattorit liitetään sairaalakokonaisuuden keskijänniteverkkoon keskitetyn kytkinlaitoksen kautta. Liitántä toteutetaan siten, että generaattorit voivat syöttää koko keskijänniteverkon käyttötilanteen mukaan. Järjestelmän on kyettävä irtikytkeytymään jakeluverkosta nopeasti ja hallitusti sähköverkon häiriötilanteissa, jolloin siirrytään saarekekäyttöön generaattorien käynnistyttyä. Saarekekäytön aikana generaattorit vastaavat verkon jännitteen ja taajuuden säätämisestä. Koko sairaala-alue toimii tällöin yhtenä suursaarekkeena, jolloin nykyisistä pienistä erillissaarekkeista luovutaan generaattorien elinkaaren päätteeksi.

Nykyiset rakennetut erillisvaravoimat eri puolilla sairaala-aluetta saavat jäädä toimintaan sellaisenaan eikä niiden purkamista edellytetä. Elinkaaren lopussa ja keskitetyn varavoiman käyttökokemuksen myötä tilojen käyttöä muuhun tarkoitukseen tulee pohtia. Tällä hetkellä nykyiset varavoimaratkaisut tulevat suhtautumaan keskitettyyn varavoimaan kuten ne suhtautuvat tällä hetkellä jaettavaan normaalivoimaan.

Toteutussuunnittelua tehtäessä on käytävä jokainen sähköverkkoyhtiön liitántäpiste läpi ja otettava suunnitelmissa huomioon lukitukset niin, että keskitetyn varavoiman käytön aikana jakeluverkkosyötön mahdollisuutta ei pääse syntymään.

Jakeluverkonhaltijoiden liittämisoheissa esitetään yksityiskohtaisia vaatimuksia erityisesti pienitehoisten, alle 50 kW:n sähköntuotantolaitosten liittämiseksi jakeluverkkoon (Helen Sähköverkko Oy, 2024). Näihin vaatimuksiin sisältyvät muun muassa tuotantolaitoksen sallittu nimellisteho suhteessa liittymispisteen oikosulkutehoon sekä rajoitukset tuotannon kestolle ja käynnistymiskäyttäytymiselle. Vaikka tarkasteltavan varavoimalaitteiston teholuokka on moninkertainen näihin rajoihin nähden, voidaan periaatteellisesti todeta, että vastaavat – ja käytännössä vähintään yhtä tiukat – vaatimukset koskevat myös suuritehoisia tuotantolaitoksia.

Liittämisoheissa erotellaan lyhytaikainen, alle 60 sekunnin kestävä tuotanto, jota voidaan pitää verkon kannalta häiriötilanteisiin liittyvänä hetkellisenä ilmiönä, sekä pidempikestoinen, yli viiden minuutin mittainen tuotanto, joka katsotaan verkon normaaliin käyttöön

vaikuttavaksi tuotannoksi. Erityisesti yli viiden minuutin yhtäjaksoinen tuotanto rinnankäynnissä jakeluverkon kanssa edellyttää erillistä tarkastelua ja verkonhaltijan hyväksyntää.

Tarkasteltavassa kohteessa generaattorien nimellisteho on useita megavoltiampeereja, jolloin on selvää, ettei tuotantolaitos voi käydä rinnakkain jakeluverkon kanssa ilman erikseen suunniteltuja suojaus-, ohjaus- ja liityntäratkaisuja. Vaikka kohteen keskijänniteverkko liittyy suurjännitteiseen 110 kV:n verkkoon, pienitehoisille tuotantolaitoksille asetetut peruseriaatteet, kuten tuotannon keston rajoitukset, liittymispisteen oikosulkutehon huomiointi sekä hallittu irtikytketyminen verkosta, ovat edelleen sovellettavia ja siirtyvät tarkasteltavassa ratkaisussa laajempaan ja teknisesti vaativampaan mittakaavaan.

5.3.2 Rinnankäyttö, kuormanjako ja tahdistus

Useamman generaattorin järjestelmässä generaattorit toimivat rinnankäytössä yhteisellä keskijännitekiskolla. Pätö- ja loisteho jakautuvat generaattorien kesken nopeus- ja jännitesäätöjen ominaisuuksien mukaisesti. Rinnankäytön hallinta perustuu generaattorien säätöjärjestelmiin, joilla varmistetaan vakaa taajuus, jännitetaso ja hallittu kuormituksen jakautuminen. Normaali verkkoon takaisin kytkeytyminen edellyttää generaattorien jännitteen, taajuuden ja vaihekulman hallittua tahdistusta, joka toteutetaan kytkinlaitoksen automaation avulla.

Generaattorit kytkeytyvät kokoojakiskoon katkaisijoiden avulla generaattorin jännitteen saavutettua nimellisjännitetason (10,5 kV) yksi kerrallaan. Ensimmäinen käynnistytävä yksikkö muodostaa saarekkeen jännitteen ja taajuuden ilman tahdistusta. Tämän jälkeen muut generaattoriyksiköt tahdistuvat kokoojakiskoon ja kytkeytyvät siihen hallitusti lyhyillä aikaväleillä Gantt-kuvaajan mukaisesti (Kuva 1).

Kuormien kytkeytyessä vuorotellen jokainen kytkentä aiheuttaa lievän jännitteen aleneman. Yhden generaattorin tuotantotilanteessa jännitteen notkahdus 75 %:n kuormalisäyksessä on noin 10 % (Liite 3, kuva 3).

Sähköverkon palautuessa generaattorit tahdistuvat hallitusti sähköverkkoyhtiön jakeluverkon kanssa muutaman sekunnin kuluessa, minkä jälkeen järjestelmä ajetaan lyhytaikaiseen rinnankäyttöön jakeluverkon kanssa. Rinnankäytön aikana varavoimalla turvattujen kuormien siirtymä jakeluverkolle toteutetaan hallitusti ja mahdollisimman häiriöttömästi. Kuormien siirron jälkeen generaattorien annetaan käydä vielä hetken ajan jälkijäähdytystä varten

sekä mahdollisen uuden sähkökatkon varalta, jolloin koneet ovat valmiustilassa ilman uutta käynnistystä.

Jakeluverkkoyhtiöiden liittämisohjeiden mukaan alle viiden minuutin rinnankäyttö sallitaan ainoastaan siirtymä- ja kytkentätilanteissa. Yli viiden minuutin yhtäjaksoinen rinnankäyttö katsotaan sähköntuotannoksi verkkoon ja edellyttää erillistä sopimusta sekä verkonhaltijan hyväksyntää.

5.3.3 Suojaus, automaatio ja käytettävyys

Keskijännitegeneraattorijärjestelmä varustetaan selektiivisillä suojaus- ja automaatiotoiminnoilla, joilla varmistetaan henkilöturvallisuus, sähkönjakelun hallittu toiminta sekä laitteiston vaurioitumisen estäminen. Suojauksissa huomioidaan oikosulku-, ylikuorma-, jännite- ja taajuuspoikkeamat sekä maasulkutilanteet, ja niiden asettelut sovitetaan yhteen muun keskijänniteverkon suojausjärjestelmän kanssa siten, että viat rajautuvat mahdollisimman pienelle verkon osalle.

Automaation keskeisenä tehtävänä on hallita varavoimajärjestelmän eri käyttötilanteita, kuten siirtymistä verkkokäytöstä saarekekäyttöön, generaattorien käynnistystä, rinnankäyttöä, kuormanjakoa sekä hallittua takaisin kytkeytymistä jakeluverkkoon. Automaation avulla varmistetaan, että generaattorit kytkeytyvät verkkoon oikeassa järjestyksessä ja että kuormat otetaan käyttöön priorisoinnin mukaisesti. Samalla estetään virheelliset kytkennät ja tahdistamattomat tilat, jotka voisivat vaarantaa järjestelmän turvallisuuden.

Käytettävyyden ja huollettavuuden kannalta järjestelmä suunnitellaan siten, että yksittäinen generaattori tai sen liityntä voidaan irrottaa huollon, testauksen tai vikatilanteen ajaksi ilman, että koko varavoimajärjestelmän toimintakyky menetetään. Tämä tukee $N-1$ -mitoitukseen perustuvaa toimintamallia ja mahdollistaa järjestelmän osittaisen käytön myös poikkeustilanteissa. Lisäksi automaation ja valvontajärjestelmien avulla generaattorien ja kytkinlaitteiden toimintaa voidaan seurata jatkuvasti, mikä parantaa vikojen ennakoitavuutta ja lyhentää mahdollisten häiriöiden selvitysaikaa.

5.4 Laitekokoonpano

Tässä työssä tarkasteltava noin 4 MVA:n keskijännitegeneraattori edustaa kiinteistö- ja laitosvaravoimaa, jota käytetään suurissa laitosympäristöissä, kuten sairaala-alueella. Tämä kokoluokka sijoittuu laitosvaravoiman yläpäähän. Varsinaisen voimalaitosluokan varavoiman voidaan katsoa alkavan häilyvästi noin 10 MVA:n kokoluokasta ylöspäin.

Tarkasteltavan laitekokoonpanon ensisijaisena tarkoituksena on turvata kriittiset kuormat poikkeustilanteissa. Ratkaisussa käytetään 4 MVA:n kokoluokan generaattoreita rinnankytkettyinä usean yksikön kokonaisuutena siten, että järjestelmän kokonaiskapasiteetti täyttää sairaala-alueen varavoimasyötölle asetetut teho- ja käyttövarmuusvaatimukset. Generaattorien määrän mitoituksessa huomioidaan sekä tehontarve että generaattorisylöille tyypillinen rajallinen oikosulkuvirrantuottokyky, minkä vuoksi kokoonpano perustuu useaan rinnankytkettyyn yksikköön. Valittu mitoitus mahdollistaa hyvän huollettavuuden sekä varavoimasyötön osalta tarkoituksenmukaisen redundanssin (esimerkiksi *N-1*-tilanteen huomiointi kriittisten kuormien osalta), tarvittaessa ei-kriittistä kuormaa irrottamalla.

Käytännössä tämä tarkoittaa, että *N-1*-tilanteessa, jossa yksi generaattori on poissa käytöstä, voidaan ei-kriittistä kuormaa irrottaa ja varmistaa kriittisten varavoimakuormien täysimääräinen syöttö kytkemällä normaalivoima pois jakelusta.

Laitteisto voidaan sijoittaa joko olemassa olevien rakennusten sisälle tai ulos tätä tarkoitusta varten rakennettuihin konttiratkaisuihin. On kuitenkin huomioitava, että noin 4 MVA:n kokoluokan generaattori ei mahdu tavanomaiseen ISO-merikonttiin.

5.4.1 Konttiratkaisu

Sairaalainfrastruktuurissa tila on usein rajallinen ja sen käytöllä on merkittävä kustannusvaikutus. Usean generaattorin järjestelmää polttoainesäiliöineen ei ole tarkoituksenmukaista sijoittaa olemassa olevien sairaalarakennusten sisälle, vaan kokonaistaloudellisestiärkevin ratkaisu on toimittaa laitteisto valmiiksi konttirakenteisiin integroituna. Tällaisen kokonaisuuden toimittaa tyypillisesti varavoimarakaisuihin erikoistunut toimija, jolla on vakiintuneet toimintamallit ja käytännön kokemus konttivarvoimajärjestelmien toteutuksesta.

Käytännössä ratkaisu muodostuu useamman kontin kokonaisuudesta, jossa varsinaiset generaattorit (Kuva 4) sijoitetaan omiin kontteihinsa ja kontit liitetään työmaalla toiminnalliseksi kokonaisuudeksi. Lisäksi järjestelmään kuuluu erillinen valvomo- ja ohjauskontti, jossa sijaitsevat generaattorien keskijännitekokoojakiskot sekä laitteiston ohjaukseen ja valvontaan tarvittava automaatio.



Kuva 4. Cat C175-20 diesel-generaattori, 4000 kVA (3200 kW). Myyntiesite, Avesco Cat Suomi.

Kuten kuvasta 4 käy ilmi, tämän kokoluokan generaattoreissa ei ole enää kampiakseliin kiinteästi kytkettyä aksiaalipuhallinta, vaan jäähdytys toteutetaan kontin katolle sijoitetulla taajuusmuuttajaohjatulla vedenjäähdyttimellä. Tällä ratkaisulla vältetään aksiaalipuhaltimen kokonaishyötysuhdetta heikentävä vaikutus sekä käynnistyksen yhteydessä haitallinen pyörivä inertia ja ilmanvastus.

Lisäksi kampiakseliin kytketty aksiaalipuhallin aiheuttaa kylmissä olosuhteissa merkittäviä haittoja, sillä se imee suuria määriä ulkoilmaa kontin sisätiloihin. Talviaikaan tämä voi tarkoittaa jopa $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ pakkasilman virtaamista generaattoritilaan pitkiä aikoja, jolloin laitteiston sisäosat, putkistot ja apulaitteet altistuvat jäähtymiselle, kondensaatiolle ja jäätymisriskille.

Aksiaalipuhallinratkaisussa ilman mukana kulkeutuu myös epäpuhtauksia, kuten lehtiä, pölyä ja muuta orgaanista materiaalia, erityisesti syksyisin. Tämä lisää huoltotarvetta ja heikentää laitteiston puhtautta sekä pitkäaikaista luotettavuutta. Katolle sijoitettu, erillinen vedenjäähdytin mahdollistaa jäähdytysilman hallitun ohjauksen, vähentää ulkoilman epäpuhtauksien pääsyä generaattoritilaan ja parantaa varavoimakokonaisuuden

toimintavarmuutta ympärivuotisissa käyttöolosuhteissa. Toisaalta erillinen vedenjäähdytyslaitteisto on monimutkaisempi ja sisältää suuremman vikaantumisriskin.

Konttiratkaisussa generaattoritila on tyypillisesti varustettu vähintään noin 50 mm paksuisella mineraalivillaeristyksellä sekä jatkuvalla tilalämmityksellä, jonka avulla sisälämpötila pidetään noin +10 °C tasolla myös erittäin kylmissä ulkolämpötiloissa, jopa -35 °C:ssa (ST-31, s. 72). Kyseinen lämmitys- ja eristystaso on ST-31-ohjeen mukaan varavoimakäytössä tavanomainen ratkaisu konttirakenteissa. Samassa käsikirjassa kuitenkin todetaan, että varsinaisen varavoimakonehuoneen lämpötilan tulisi olla kovallakin pakkasella yli +15 °C, jotta moottorin ja apulaitteiden toimintaedellytykset säilyvät optimaalisina (ST-31, s. 78).

Lisäksi dieselmoottorin vesitilassa käytetään esilämmitintä, jonka tehtävänä on pitää moottori jatkuvasti valmistajan määrittämässä lämpötila-alueessa, tyypillisesti noin +30...+40 °C (ST-31, s. 79). Tämä on erityisen tärkeää varavoimakäytössä, jossa moottori käynnistyy usein pitkäaikaisen seisonnan jälkeen ja kuormittuu nopeasti käynnistyksen jälkeen.

Moottorin käynnistyksen yhteydessä kampiakseliin kytketty aksiaalipuhallin voi alkaa välittömästi siirtää suuria määriä kylmää ulkoilmaa generaattoritilaan, jolloin esilämmityksen vaikutus heikkenee nopeasti. Tämän seurauksena moottorin lohko, sylinterikannet ja jäähdytysjärjestelmä altistuvat välittömälle jäähtymiselle käynnistyksen jälkeen, mikä voi haitata moottorin asettumista sille suunnitellulle optimaaliselle käyttölämpötila-alueelle. Ilmiö on erityisen merkityksellinen ensimmäisten sekuntien aikana, jolloin tahdistus ja kuorman kytkentä toteutetaan.

Erilliseen, katolle sijoitettuun ja ohjattuun vedenjäähdyttimeen perustuva jäähdytysratkaisu tukee paremmin ST-31-ohjeiden mukaista lämpötilanhallintaa, säilyttää moottorin esilämmityksen hyödyt myös käynnistyksen jälkeen ja parantaa dieselmoottorin palamisolosuhteita, käyttövarmuutta ja pitkäaikaista luotettavuutta erityisesti Suomen kylmissä ilmasto-olosuhteissa.

5.5 Toteutuksen vaikutukset tilankäyttöön ja asennusaikaan

Konttiratkaisulla on merkittävä vaikutus sekä tilankäyttöön, asennusaikatauluun että koko rakentamisprosessiin. Varavoimalaitteisto voidaan sijoittaa joko olemassa olevien

rakennusten yhteyteen tai kokonaan erilliselle ulkoalueelle tätä tarkoitusta varten toteutettuihin konttirakenteisiin.

Konttiratkaisu mahdollistaa rakentamisen suurelta osin sairaalatoiminnasta erillään. Työ voidaan toteuttaa ilman kulunvalvontaa ja tarvittaessa mihin vuorokaudenaikaan tahansa. Kaapeloinnit voidaan asentaa maahan ilman häiriöitä sairaalan sisätiloissa, eikä rakentamishankkeessa tarvitse varata käytäviä tai muita sairaalan normaalia toimintaa haittaavia alueita. Sairaalarakennusten sisäisiä purkutöitä ei tarvita, eikä esimerkiksi alipaineistusta tai pölynhallintajärjestelyjä jouduta toteuttamaan.

Lupa- ja viranomaisprosessit ovat konttiratkaisussa usein yksinkertaisempia. Palo-osastointi, rakenteellinen palosuojaus sekä monet turvallisuusratkaisut toteutuvat valmiiksi konttivalmistajan toimesta. Myös pakokaasujen ja melun hallinta on helpompi järjestää ulkotiloissa kuin rakennusten sisällä. Logistiset yhteydet voidaan suunnitella suoraan varavoimailaitteiston tarpeita silmällä pitäen, erityisesti polttoainehuollon ja huoltoajoneuvojen kulkureittien osalta.

Konttiratkaisu mahdollistaa myös belly tank -ratkaisun hyödyntämisen, jossa generaattorin alle sijoitetaan integroitu polttoainesäiliö. Tämä vähentää erillisten säiliöiden tarvetta, pienentää putkistojen ja vuotoriskien määrää sekä parantaa kokonaisuuden tilatehokkuutta. Belly tank -ratkaisu helpottaa lisäksi polttoaineen hallintaa ja mahdollistaa varavoimakäytön kannalta riittävän käyttöajan ilman välitöntä ulkoista tankkausta. Mahdolliset polttoainevuodot on helpompi hallita ulkotiloissa erillisissä suoja-altaissa ja konttirakenteissa.

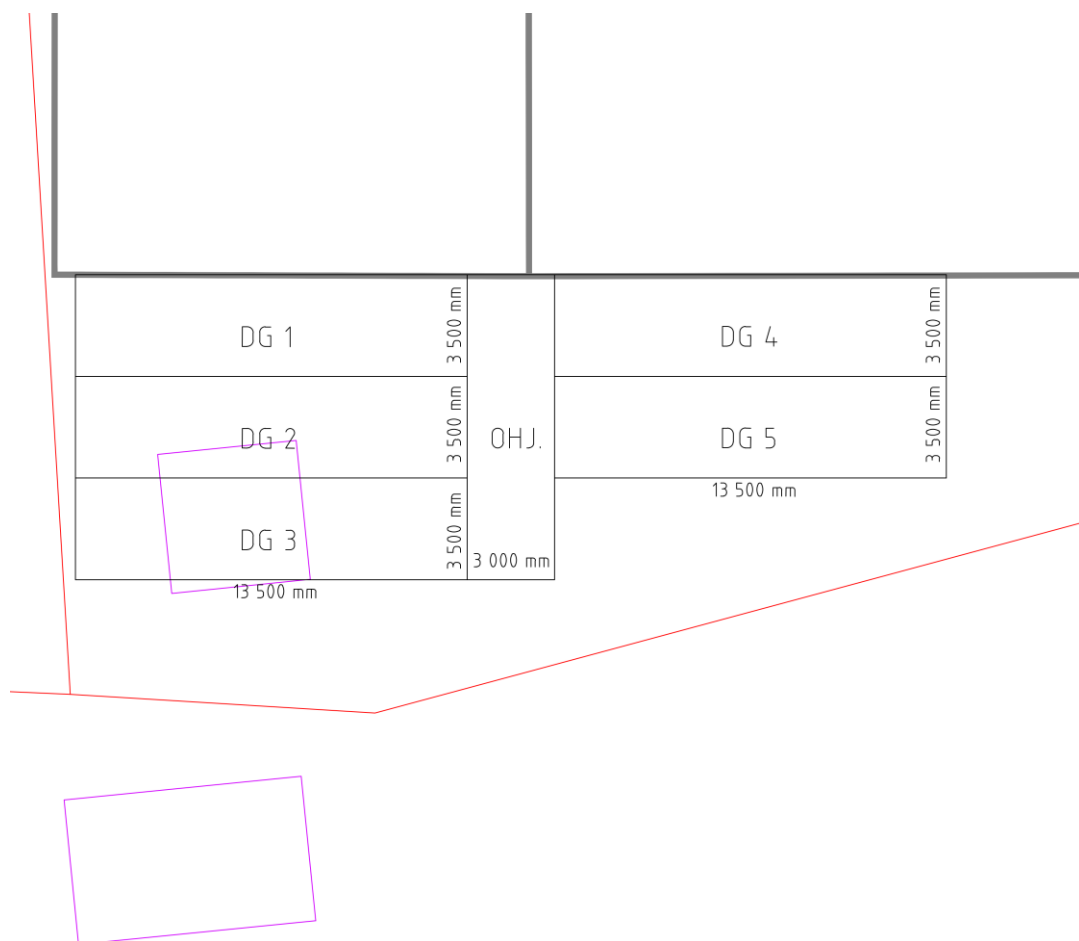
Teknisestä näkökulmasta konttiratkaisu tarjoaa merkittäviä etuja. Rakenteelliset kantavuuslaskelmat ovat yksinkertaisempia kuin rakennusten sisällä, ja värinänhallinta on helpompi toteuttaa tai se ei ole lainkaan kriittinen. Laitteiston lämpökuormaa ei johdeta sairaalarakennusten rakenteisiin, mikä vähentää sisätilojen jäähdytystarvetta. Suuret virrat, korkea jännite sekä pyörivät magneettikentät eivät ulkotiloissa aiheuta vastaavia häiriöriskejä kuin sairaalarakennusten sisällä, missä ne voisivat vaikuttaa esimerkiksi välittömässä läheisyydessä sijaitseviin kuvantamislaitteisiin.

Rakenteen modulaarisuus mahdollistaa varavoimajärjestelmän vaiheittaisen laajentamisen, muuttamisen tai modernisoinnin myöhemmässä vaiheessa ilman merkittäviä muutoksia sairaalarakennuksiin. Huolto- ja testauskäytännöt, mukaan lukien kuormituskokeet ja täysimitatset testiajot, voidaan suorittaa sairaalatoimintaa häiritsemättä. Selkeä fyysinen erottelu

helpottaa myös käyttöönottotarkastuksia, viranomaistarkastuksia ja laitoksen operatiivista hallintaa.

Kokonaisuutena konttiratkaisu mahdollistaa varavoimalaitteiston sijoittamisen teknisesti, taloudellisesti ja toiminnallisesti optimaaliseen paikkaan suhteessa sairaala-alueen tilankäyttöön, logistiikkaan ja kriittisten toimintojen turvaamiseen.

Diplomityön kohteessa todennäköisin sijainti varavoimakonteille katselmoitiin ja laadittiin kuvan 5 mukainen esimerkkisijoitus. Tarkempaa kartta- tai asemapiirrosta ei tietoturva- ja turvallisuussyistä ole sisällytetty tähän diplomityöhön. Kuvassa violetilla merkitty neliö konttien kohdalla osoittaa nykyisen LVI-laitteiston sijainnin, joka olisi tarkoituksenmukaista purkaa konttiratkaisun toteuttamisen tieltä. Sijainnin katselmoinnissa on lisäksi huomioitu, että nykyinen keskijännitekojeisto, jossa liityttäisiin kennoon 7, sijaitsee välittömästi viereisessä tilassa seinän takana.



Kuva 5. Esimerkkisijoitus varavoimakonteille

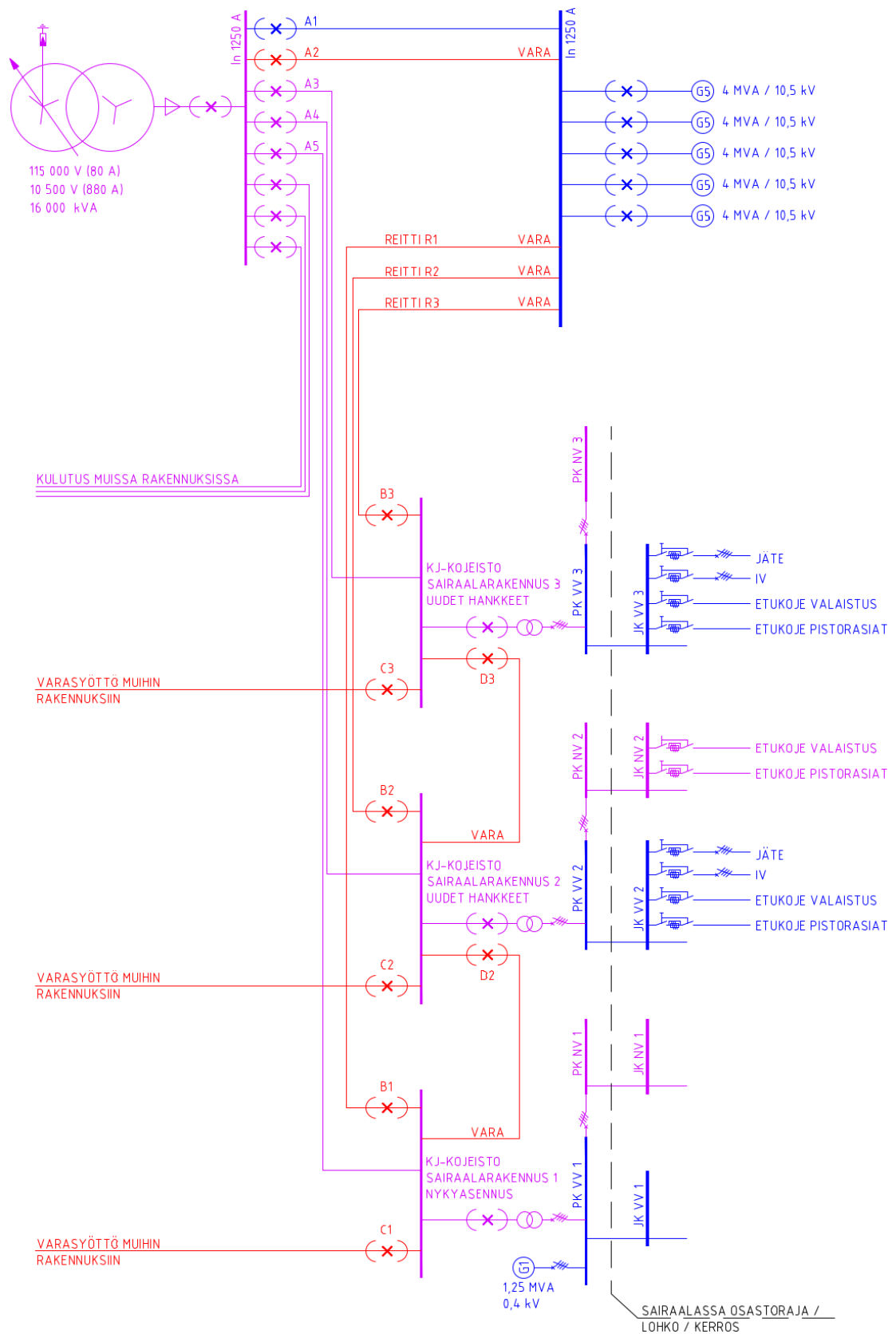
5.6 Generaattorien kytkentäkaavio

Varavoiman liittäminen nykyiseen 10,5 kV jakeluverkkoon esitetään periaatetasolla jakeluverkon yksiviivakaaviossa kuvassa 6. Kaaviolla havainnollistetaan järjestelmien periaatteellinen rakenne ja kytkentälogiikka. Kaavio ei kuvaa kaikkia vaiheita erikseen eikä sisällä toteutussuunnittelun yksityiskohtia, kuten suojausasetuksia tai tarkkoja laitetietoja. Varavoima on piirretty sinisellä, normaalivoima violetilla ja punaisella on piirretty varavoiman varayhteydet, jos sinisellä piirretyt ovat jostain syystä estyneet.

Periaatekaaviossa on yksinkertaistuksen vuoksi jätetty UPS-, IT UPS- ja IT-varavoimaratkaisut pois tarkastelusta. Nämä muodostaisivat kaaviossa esitetyn varavoimajärjestelmän jatkumon.

Ratkaisussa varavoimageneraattorit on sijoitettu erilliseen konttikokonaisuuteen, joka on kytketty sairaala-alueen keskijännitekokoojakiskoon. Varaus viidelle generaattorikontille mahdollistaa varavoiman käytön sekä nykyisessä kuormitustilanteessa että tulevaisuudessa laajennuksissa ilman merkittäviä muutoksia olemassa olevaan verkkoon. Kaaviossa esitetty usean rinnankytketyn generaattorin kokonaisuus parantaa järjestelmän käyttövarmuutta ja huollettavuutta sekä mahdollistaa kuormanhallinnan poikkeustilanteissa. Esitetty generaattorimäärä kuvaa järjestelmän laajennuspotentiaalia eikä tarkoita, että kaikki kuvatut generaattorit toteutettaisiin samanaikaisesti, vaan ratkaisu tukee varavoimasyötön vaiheittaista toteuttamista tarpeen mukaan.

Varavoimaratkaisu on erotettavissa jakeluverkkoyhtiön syötöstä siten, että järjestelmä voi toimia saarekkeena poikkeustilanteissa. Varavoimakokonaisuus on mitoitettu siten, että kriittisten kuormien syöttö voidaan turvata myös yksittäisen generaattorin vikaantuessa kuormanhallinnan avulla.



Kuva 6. Jakeluverkon periaatekaavio

Kaaviossa on esitetty nykyinen tavanomainen ratkaisu paikallisella generaattorilla viitteellisessä rakennuksessa (Rakennus 1) sekä kaksi viitteellistä uudishanketta, jotka toteutettaisiin eri tavoin rakennuksittain. Rakennuksessa 2 toteutettaisiin myös ilmanvaihdon ja jätteenkäsittelyn sähkönsyöttö varavoimasta aiemmin esitettyjen kuormitus- ja käyttövarmuusperiaatteiden mukaisesti. Sen sijaan rakennuksessa 3 toteutettaisiin pienimuotoinen osastokohmainen saneeraus, jossa koko sähköjakelu varmennettaisiin.

Rakennuksessa 3 normaalivoiman pääkeskukselta ei lähtisi lainkaan syöttökaapeleita normaalivoiman jakokeskukselle, eikä kyseistä jakokeskusta tässä ratkaisussa hankittaisi. Kun tästä menettelytavasta olisi saatu usean vuoden ajalta kokemuspohjaista tietoa, voitaisiin vastaavaa toteutustapaa laajemmin soveltaa myös muissa hankkeissa.

Ratkaisu toisi säästöjä tilankäytössä sekä keskusten ja syöttökaapeloinnin investoinneissa, urakoinnissa, käyttöönnotossa ja käytön aikaisessa huollossa. Myös normaalivoiman ryhmäjohdot jäisivät pois kokonaan. Vastaavasti varavoiman puolella kuorma kasvaisi ja ryhmäjohtojen määrää jouduttaisiin jonkin verran lisäämään, mutta ei kuitenkaan suhteessa yksi yhteen siihen nähden, mitä perinteisessä ratkaisussa olisi tullut normaalivoiman puolelle.

Tämä vähentäisi myös kaapelihyllyjen ja reittien tarvetta. Kokonaisuutena kuparin määrä pienenesi ja hyllyjen kuormitus vähenisi. Valkoiset normaalivoiman pistorasiat jäisivät urakasta kokonaan pois. Pistorasioiden kokonaismäärä ei puolittuisi, mutta ei myöskään säilyisi ennallaan, vaan määrä muodostuisi hankekohtaisesti näiden väliin.

Suunnittelussa korostuisivat selkeä jako normaaliverkon ja varavoiman välillä, kuormaryhmien erottelu sekä mahdollisuus irrottaa yksittäisiä osia huollon, testauksen tai saneerausten ajaksi ilman, että koko varavoimajärjestelmän toiminta vaarantuisi. Jakelukaavio toimisi siten teknisenä perustana järjestelmän elinkaaren aikaiselle hallittavuudelle ja riskien pienentämiselle, ei ainoastaan sähkökatkotilanteiden toiminnalle.

5.6.1 Katkaisijoiden vikaantumistodennäköisyyden arviointi

Kappaleen 4.3.1 mukaisesti vikaantumisnopeutena käytetään $\lambda=0,0036$ vikaa/yksikköä/vuosi. Tämä voidaan tulkita niin, että 10 000 yksiköstä vikaantuu odotusarvoisesti likimäärin 36 yksikköä vuodessa, tai että 1 000 yksiköstä vikaantuu odotusarvoisesti likimäärin 36 yksikköä 10 vuodessa. Kun vikaantumisnopeuden oletetaan olevan vakio, ehjien

yksiköiden määrä pienenee ajan myötä suhteessa jäljellä olevaan ehjien määrään, mikä voidaan esittää differentiaaliyhtälönä

$$\frac{dN}{dt} = -\lambda N, \quad (1)$$

jossa $N(t)$ on ehjien yksiköiden odotettu lukumäärä hetkellä t (jatkuva approksimaatio). Todellinen yksikkömäärä muuttuu diskreetein vikatapahtumin. Muutetaan yhtälö muotoon

$$\frac{dN}{N} = -\lambda dt. \quad (2)$$

Integroidaan molemmin puolin

$$\int \frac{1}{N} dN = \int -\lambda dt, \quad (3)$$

josta saadaan

$$\ln|N| = -\lambda t + C. \quad (4)$$

Tässä yksikkömäärä $N(t) > 0$, joten voidaan kirjoittaa

$$\ln N = -\lambda t + C \quad (5)$$

jossa C on integrointivakio. Kirjoitetaan eksponenttimuotoon

$$N(t) = e^C e^{-\lambda t}. \quad (6)$$

Huomataan, että alkuhetken tilanne on

$$N(0) = e^C, \quad (7)$$

joten yhtälö (6) voidaan kirjoittaa

$$N(t) = N_0 e^{-\lambda t}, \quad (8)$$

joka on ehjien katkaisijoiden määrä hetkellä t . Sen sijaan vikaantuneiden määrä hetkellä t on

$$N_v(t) = N_0(1 - e^{-\lambda t}), \quad (9)$$

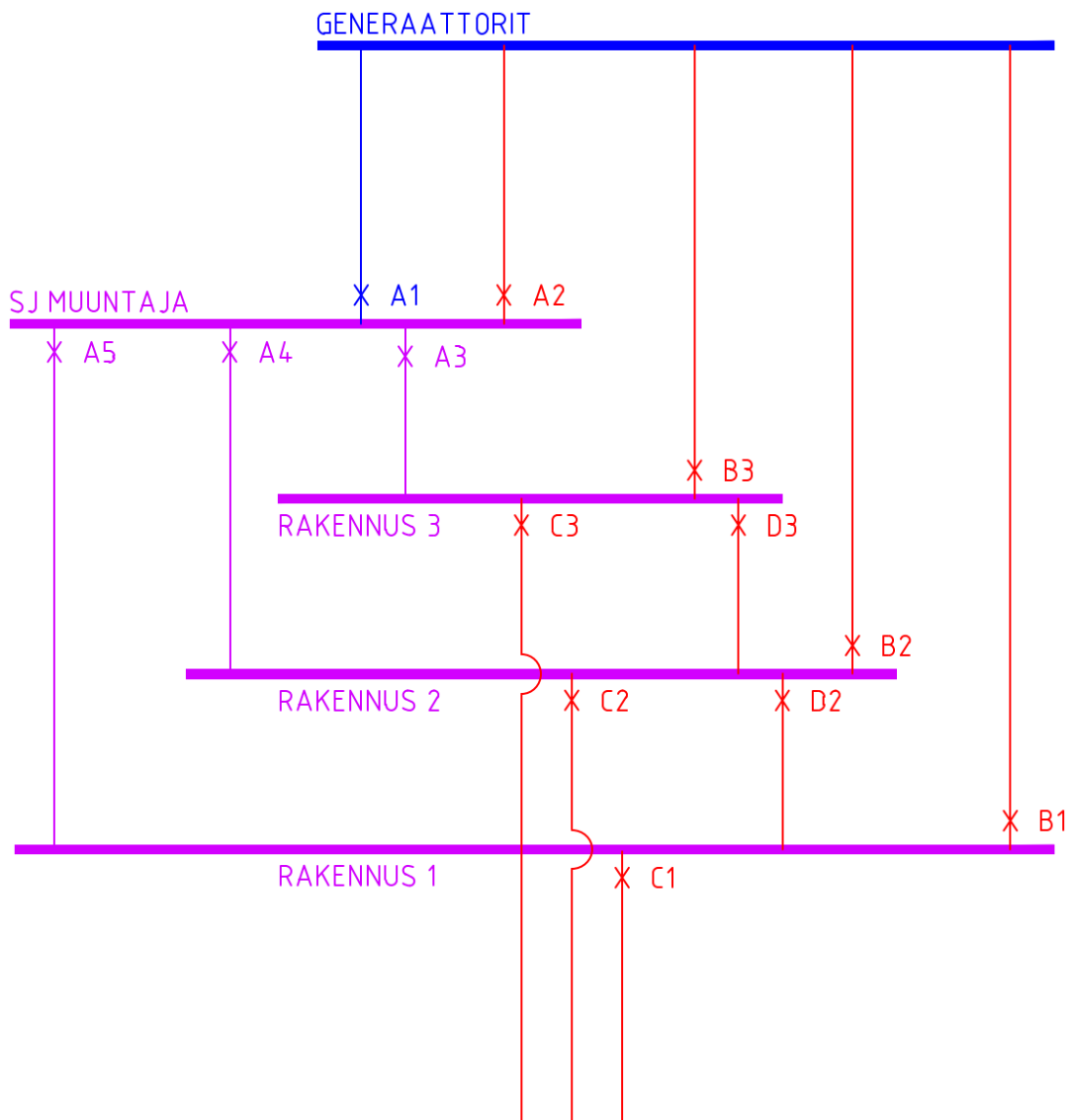
josta saadaan yksittäisen katkaisijan vikaantumistodennäköisyydeksi

$$F(t) = 1 - e^{-\lambda t}. \quad (10)$$

Toimintatodennäköisyydeksi tulee vikaantumistodennäköisyyden komplementti

$$R(t) = e^{-\lambda t}. \quad (11)$$

Kuvan 6 jakelukaavio esitetään selkeytetystä todennäköisyyslaskentaa palvelevassa muodossa kuvassa 7, jossa X-symboli kuvaa katkaisijaa. Laskennan helpottamiseksi kaikille katkaisijoille oletetaan sama vikaantumisnopeus $\lambda=0,0036$ 1/v. Katkaisijoiden vikaantumiset oletetaan toisistaan riippumattomiksi ja λ vakioksi tarkasteluajalla.



Kuva 7. Kaavio todennäköisyyksien laskentaan

Rakennusten syötön varmistus olisi symmetrinen, jos myös rakennusten 1 ja 3 välillä olisi suora varmistusyhteys. Käytännössä täydellinen kaapelointi ei usein ole mahdollista esimerkiksi maantieteen tai muiden järjestelyjen vuoksi. Seuraavaksi lasketaan esimerkinomaisesti edellä esitetyn verkoston syötön onnistumistodennäköisyys (luotettavuus) tarkasteluajalla t . Sama laskentatapa sovitetaan tapauskohtaisesti todelliseen kohteeseen.

Tässä työssä A_i, B_i, C_i, D_i ($i = 1, 2, 3, \dots$) esittävät kuvan 7 katkaisijoiden onnistumistapahtumia ja S_1, S_2 ja S_3 esittävät vastaavan rakennuksen jakelun onnistumistapahtumia. Onnistumisella tarkoitetaan katkaisijan toimintaa suunnitellulla tavalla. Tässä työssä oletetaan katkaisijoiden vikaantumiset toisistaan riippumattomiksi ja kaikkien katkaisijoiden onnistumistodennäköisyys samaksi.

Muodostetaan tapahtumat

$$S_1 = B1 \cup ((A1 \cup A2) \cap A5) \cup (B2 \cap D2), \quad (12)$$

$$S_2 = B2 \cup ((A1 \cup A2) \cap A4) \cup (B1 \cap D2) \cup (B3 \cap D3), \quad (13)$$

$$S_3 = B3 \cup ((A1 \cup A2) \cap A3) \cup (B2 \cap D3). \quad (14)$$

Näistä johdetaan rakennuskohtaisten onnistumistapahtumien todennäköisyydet

$$P(S_1) = 1 - (1 - P(B1)) \left(1 - P((A1 \cup A2) \cap A5)\right) (1 - P(B2 \cap D2)), \quad (15)$$

$$P(S_2) = 1 - (1 - P(B2)) \left(1 - P((A1 \cup A2) \cap A4)\right) (1 - P(B1 \cap D2)) (1 - P(B3 \cap D3)), \quad (16)$$

$$P(S_3) = 1 - (1 - P(B3)) \left(1 - P((A1 \cup A2) \cap A3)\right) (1 - P(B2 \cap D3)). \quad (17)$$

Tässä työssä kaikkien katkaisijoiden onnistumistodennäköisyys on sama, joten sijoitetaan yllä oleviin yhtälöihin (15)-(17)

$$P(A1 \cup A2) = 1 - (1 - r)^2, \quad (18)$$

$$P((A1 \cup A2) \cap A_k) = r(1 - (1 - r)^2), \quad (19)$$

$$P(B_i \cap D_j) = r^2, \quad (20)$$

$$P(B_i) = r. \quad (21)$$

Jossa r on yhtälön (11) mukaisesti

$$r = R(t) = e^{-\lambda t}. \quad (22)$$

Yllä esitettyjen yhtälöiden perusteella toteutettiin Matlab-pohjainen koodi todennäköisyyksien laskentaan. Osa koodista on esitetty kuvassa 8.

```
clear; clc;

lambda = 0.0036;
t      = 15;
r = exp(-lambda * t);

%Px tarkoittaa yhtälön numeroa diplomityössä

P18 = 1 - (1 - r)^2;           % P(A1 U A2): vähintään A1 tai A2 toimii
P19 = r * (1 - (1 - r)^2);     % P((A1 U A2) n Ak): (A1 tai A2) toimii ja lisäksi Ak toimii
P20 = r^2;                     % P(Bi n Dj): sekä Bi että Dj toimivat (sarjassa)
P21 = r;                       % P(Bi): yksi katkaisija (esim. B1) toimii

% Rakennuskohtaiset onnistumistodennäköisyydet
P15 = 1 - (1 - P21) * (1 - P19) * (1 - P20);           % P(S1)
P16 = 1 - (1 - P21) * (1 - P19) * (1 - P20) * (1 - P20); % P(S2)
P17 = 1 - (1 - P21) * (1 - P19) * (1 - P20);           % P(S3)

% Epäonnistumistodennäköisyydet (syöttö EI onnistu)
F15 = 1 - P15;           % F(S1)
F16 = 1 - P16;           % F(S2)
F17 = 1 - P17;           % F(S3)

fprintf('lambda = %.4f 1/v\n', lambda);
fprintf('t = %g v\n', t);
fprintf('r = R(t) = %.10f\n\n', r);

fprintf('P(S1) = %.10f\n', P15);
fprintf('P(S2) = %.10f\n', P16);
fprintf('P(S3) = %.10f\n\n', P17);

fprintf('F(S1) = %.10f\n', F15);
fprintf('F(S2) = %.10f\n', F16);
fprintf('F(S3) = %.10f\n\n', F17);

fprintf('F(S1) = %.10f ‰\n', F15*1000);
fprintf('F(S2) = %.10f ‰\n', F16*1000);
fprintf('F(S3) = %.10f ‰\n', F17*1000);
```

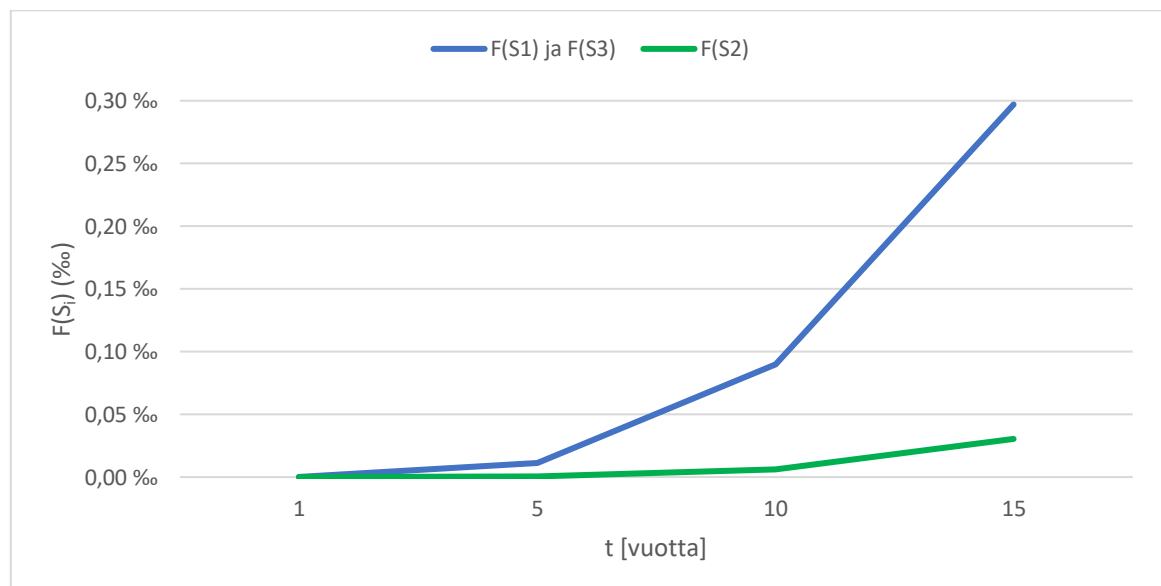
Kuva 8. Toteutettiin Matlab-pohjainen koodi todennäköisyyksien laskentaan

Ajetaan laskelmat tarkasteluajoille $t=1, 5, 10$ ja 15 vuotta, jolloin saadaan taulukon arvot (Taulukko 1). Koska vikaantumisnopeus on annettu kahden merkitsevän numeron tarkkuudella, tuloksia ei tulkita tätä tarkempina. Käytännössä syötön onnistumistodennäköisyydet $P(S_i)$ ovat kuitenkin hyvin lähellä arvoa yksi, jolloin erojen havaitseminen näistä on hankalaa. Tämän vuoksi $P(S_i)$ esitetään kuuden desimaalin tarkkuudella luettavuuden parantamiseksi ja epäonnistumistodennäköisyydet $F(S_i)=1-P(S_i)$ esitetään promilleina (‰) kuuden desimaalin tarkkuudella.

Taulukko 1. Syötön onnistumis- ja epäonnistumistodennäköisyydet

t [vuotta]	1	5	10	15
$r = R(t)$	0,996406	0,982161	0,964640	0,947432
$P(S_1)$	1,000000	0,999989	0,999910	0,999703
$P(S_2)$	1,000000	1,000000	0,999994	0,999970
$P(S_3)$	1,000000	0,999989	0,999910	0,999703
$F(S_1)$ (‰)	0,000093	0,011450	0,089821	0,296984
$F(S_2)$ (‰)	0,000001	0,000405	0,006240	0,030403
$F(S_3)$ (‰)	0,000093	0,011450	0,089821	0,296984

Piirretään syötön epäonnistumistodennäköisyyksistä kuvaaja, joka on esitetty kuvassa 9. Kuvaajasta nähdään, että rakennuksen 2 poikkeava syöttörakenne pienentää epäonnistumistodennäköisyyttä verrattuna rakennuksiin 1 ja 3.



Kuva 9. Syötön epäonnistumistodennäköisyys eri tarkasteluajoilla t esimerkiverkostossa ($\lambda = 0,0036$ 1/v)

6 Tulokset ja johtopäätökset

Tutkimusongelmaan vastataan tämän työn rajauksin ja järjestelmätason tarkastelun perusteella siten, että keskitetty keskijännitteellä toimiva varavoima voidaan arvioida toteutettavaksi laajassa sairaalainfrastruktuurissa saarekkeena, edellyttäen että toteutussuunnittelussa varmistetaan suojaus-, selektiivisyys- ja automaatiotarkaisut sekä käyttötilanteiden hallinta. Hyödyt painottuvat tilankäyttöön, kunnossapidon ja testauksen keskittämiseen sekä polttoainehuollon hallinnan yksinkertaistamiseen. Lisäksi järjestelmän häviöitä ja laitemäärää voidaan vähentää, kun laaja pienjännitekaapelointi ja step-up-muuntajat voidaan välttää.

Keskittämisen haittana on riski jakeluketjun toimivuudessa. Jos yksittäinen komponentti, kuten katkaisija, kojeisto tai kaapelointi rikkoutuu, varavoiman jakelu voi keskeytyä ja vaikutus voi ulottua laajalle sairaala-alueelle. Tämän työn tarkastelun perusteella riskiä voidaan pienentää vaihtoehtoisilla jakelureiteillä, redundanssilla, kuormanhallinnalla ja rakenteen yksinkertaistamisella siten, että vikojen vaikutusalue ja yhteisten vikapisteen määrä pyritään minimoimaan.

Tässä työssä kustannusvertailu on esitetty suuruusluokka-arvioina, eikä tarkastelu sisällä oikosulkuvirta- ja selektiivisyysmitoitusta tai suojausasetusten määrittelyä. Lisäksi lupa- ja viranomaisprosessien yksityiskohtia (esim. ympäristö-, melu- ja paloturvallisuuteen liittyvät menettelyt) ei ole käsitelty kattavasti, vaan ne on rajattu tarkastelun ulkopuolelle.

6.1 Keskeiset päätulokset

Katkaisijaluotettavuustarkastelussa syötön epäonnistumistodennäköisyydet ovat tarkastelussa esimerkkiverkostossa promilleluokkaa: 15 vuoden tarkasteluajalla $F(S_1)=F(S_3)=0,296984 \text{ ‰}$ ja $F(S_2)=0,030403 \text{ ‰}$ (10 vuoden tarkasteluajalla vastaavasti $F(S_1)=F(S_3)=0,089821 \text{ ‰}$ ja $F(S_2)=0,006240 \text{ ‰}$). Käyttämällä keskijännitettä voidaan välttää step-up-muuntajien lämpöhäviöt. 1600 kVA muuntajassa häviöt ovat suuruusluokkaa 13 kW + 2 kW = 15 kW ja 3150 kVA muuntajassa tyypillisesti noin 25 kW muuntajaa kohden. Nämä lämpöhäviöt tuotettaisiin käytännössä varavoimageneraattorien sähköllä, mikä heikentäisi kokonaishyötysuhdetta ja lisäisi polttoaineen kulutusta.

Sairaalakäytössä ja yleisesti lääkintätilaluokituksen 1 tai 2 tiloissa syöttötehon laskelmissa on otettava huomioon vain ISO 8528-1 mukaiset Prime Power (PRP) -tehoa koskevat määrittelyt. Esimerkkigeneraattorin (Cat C175-20) PRP-käyttöluokassa täydellä kuormalla polttoaineen menekki on 0,6889 m³/h ja karkeasti arvioiden neljän koneen kokonaisuus kuluttaa 24 tunnissa täydellä kuormalla noin 66 m³ polttoainetta. Tarkasteltavan kohteen käytönjohtajalta saatujen tehotietojen perusteella 110 kV:n päämuuntajan kautta kulkeva huipputeho on noin 12 MVA, mikä korostaa jännitetason valinnan vaikutusta kaapelointiin. Keskijännitetasoinen toteutus vähentää raskaan pienjännitekaapeloinnin tarvetta. Pienjännitetasolla voi syntyä useiden rinnakkaisten suuripoikkipintaisten kuparikaapeleiden (esim. 300 mm²) tarve, kun taas keskijännitetasolla syöttö voidaan toteuttaa yhdellä keskijännitekaapeloinnilla, esimerkiksi 160 mm suojaputkeen asennettuna. Ratkaisussa kriittisten kuormien syöttö voidaan varmistaa tarvittaessa ei-kriittistä kuormaa irrottamalla.

6.2 Kustannus- ja tilasäästöjen arviointi

Tarkastelussa verrataan hajautettua rakennuskohtaista varavoimaa ja keskitettyä keskijännitetasoista varavoimaa. Jännitetason valinnan näkökulmasta keskitettyä pienjännitetasoista toteutusta tarkastellaan vaihtoehtona, joka edellyttäisi step-up-muuntajia ja raskasta pienjännitekaapelointia. Tarkastelu on suuruusluokkainen eikä sisällä toteutussuunnittelun lopullisia mitoituksia tai viranomaismenettelyjä.

Tärkeimmät säästömekanismit ja niiden synty perustuvat järjestelmien vähentymiseen, koska hajautetussa mallissa generaattori-, kojeisto-, polttoaine- ja tilaratkaisut toistuvat useissa kohteissa, samoin niiden elinkaariset huolto- ja testauskäytännöt, kun taas keskitetty ratkaisu kokoaa nämä yhteen hallittuun kokonaisuuteen.

Keskittämisessä voidaan myös välttää step-up-muuntajat sekä niiden lämpöhäviöt ja jäädytyksen sekä ilmanvaihdon tarve. Varavoimakäytössä tämä kuormittaa suoraan generaattoria ja lisää osaltaan polttoaineen kulutusta. Lisäksi kaapelointi kevenee jännitetason valinnalla. Tilankäytön ja taloteknisten järjestelyjen osalta hajautetussa toteutuksessa rakennuskohtaiset tilavaraukset sekä niihin liittyvät paloturvallisuus- ja talotekniset järjestelyt korostuvat, kun taas keskitetty ratkaisu mahdollistaa tilatarpeiden keskittämisen yhteen kokonaisuuteen rakennusten ulkopuolelle konttirakenteeseen.

Polttoainehuollon logistiikan ja ylläpidon osalta keskitetty polttoainejärjestelmä mahdollistaa laadun, määrän ja kierron hallinnan yhdestä paikasta. Poikkeustilanteissa täydennys voidaan toteuttaa hallitummin keskitettyyn järjestelmään (yksi säiliöauto kykenee tyypillisesti purkamaan noin 30 m³ yhdellä käynnillä), kun hajautetussa mallissa täydennykset kohdistuvat useisiin pieniin, usein alle 10 m³:n säiliöihin eri puolilla sairaala-aluetta.

6.3 Luotettavuus ja huoltovarmuus

Luotettavuustarkastelu osoittaa, että keskitetyn ratkaisun kriittisyys painottuu yhteisiin kytkentä- ja hallintokomponentteihin yksittäisten rakennuskohtaisten generaattorien sijaan. Katkaisijoiden vikaantumistodennäköisyyden mittakaava korostaa rakenteen merkitystä, sillä varayhteyksillä ja syöttörakenteella epäonnistumistodennäköisyydet voidaan pienentää promilleluokkaan tarkasteluajalla. Esimerkkiverkostossa poikkeava syöttörakenne tuottaa selvästi pienemmän epäonnistumistodennäköisyyden kuin symmetrisemmät rakennukset.

Suursaareketyyppisessä keskijännitejaossa yksittäisten rakennusten kuormapiikit ja vino-kuormat eivät tyypillisesti korostu samalla tavalla kuin pienemmissä erillisissä saarekkeissa, koska kuormat ja häiriöt jakautuvat laajemman kokonaisuuden kesken. Tällä voi olla käytännön merkitystä saarekekäytön kuormanhallinnan ja käyttötilanteiden hallinnan kannalta, vaikka tarkka dynaaminen tarkastelu rajautuu tämän työn ulkopuolelle.

Suunnittelun kannalta tämä tarkoittaa, että tämän työn rajauksin keskitetty toteutus edellyttää huolellisesti suunniteltua verkon rakennetta, jossa vikatilanteet rajautuvat mahdollisimman pienelle osalle verkkoa ja jossa käyttötilanteet (normaalikäyttö, saareke ja palautus) ovat hallittuja. Käytännössä tämä edellyttää vaihtoehtoisten jakelureittien, redundanssin ja kuormanhallinnan periaatteiden suunnittelua sekä rakenteen yksinkertaistamista siten, että yhteisten vikapisteiden määrä ja vikojen vaikutusalue minimoidaan. Huoltovarmuuden näkökulmasta keskitetty ratkaisu voi parantaa ylläpidon ja testauksen hallittavuutta, kun kriittiset laitteet ja polttoainejärjestelmä ovat yhdessä paikassa ja menettelyt voidaan yhdenmu-kaistaa.

6.4 Kestävän kehityksen näkökulmat

Kuparin määrää voitaisiin vähentää jakokeskustason ryhmityskaapeloinnissa esimerkiksi rakennus 3 -skenaariossa, jossa kriittisten sairaanhoitotilojen sähkönjakelu varmennettaisiin kokonaan. Tällöin normaalivoiman pääkeskukselta ei lähtisi syöttökaapeleita normaalivoiman jakokeskukselle eikä kyseistä jakokeskusta hankittaisi, ja normaalivoiman ryhmäjohdot jäisivät pois kokonaan. Vastaavasti varavoiman puolella kuorma kasvaisi ja ryhmäjohtojen määrää jouduttaisiin lisäämään, mutta ei kuitenkaan suhteessa yksi yhteen siihen nähden, mitä perinteisessä ratkaisussa tulisi normaalivoiman puolelle. Tämä vähentäisi kaapelihyllyjen ja reittien tarvetta, jolloin kokonaisuutena kuparin määrä pienenesi ja hyllyjen kuormitus vähenisi. Valkoiset normaalivoiman pistorasiat jäisivät urakasta kokonaan pois, ja pistorasioiden kokonaismäärä määräytyisi hankekohtaisesti siten, ettei se puolittuisi mutta ei myöskään säilyisi ennallaan. Lisäksi nykyaikaisissa dieselgeneraattoreissa voidaan käyttää HVO-polttoainetta, jolloin varavoimakäyttö voidaan toteuttaa uusiutuvalla polttoaineella. Polttoaine voidaan varastoida integroidussa säiliöratkaisussa (belly tank), jolloin rakennusten sisätiloja ei tarvita polttoaineen säilytykseen ja tilat voidaan kohdentaa varsinaiseen sairaalatoimintaan.

6.5 Keskitetyn varavoimaratkaisun soveltuvuus sairaalakokonaisuuksiin

Parhaiten keskitetty ratkaisu soveltuu kohteisiin, joissa on laaja keskijänniteverkko valmiina ja kuormaprofiili on vakaa sekä keskitetyille generaattoreille löytyy sopiva sijoituspaikka. Keskitetty toteutus on perusteltu erityisesti laajoissa sairaalakokonaisuuksissa, joissa usean rakennuksen kriittiset kuormat voidaan syöttää hallitusti yhteisestä varavoimalähteestä ja joissa kunnossapito- ja testauskäytännöt voidaan yhtenäistää.

Ratkaisu edellyttää lisäksi, että syöttörakenne ja käyttöperiaatteet voidaan suunnitella siten, että saarekekäytön hallinta, kuormien priorisointi ja tarvittava redundanssi ovat toteutettavissa. Käytännössä tämä tarkoittaa, että kuormien luokittelu ja kuormanhallinnan periaatteet on määriteltävä siten, että kapasiteettivajetilanteissa turvataan olennaisimmat toiminnot ja toissijaisia kuormia voidaan tarvittaessa rajoittaa. Lisäksi käyttö- ja automaatiojärjestelmän toiminnallinen luotettavuus sekä turvalliset erotus- ja lukitusmenettelyt korostuvat, koska varavoiman vaikutusalue on laaja.

Kohteissa, joissa keskijänniteverkon rakenne on suppea tai vaihtoehtoisia syöttöreittejä ei saada järjestettyä, keskittämisen hyödyt voivat jäädä vähäisiksi suhteessa yhteisten vikapisteiden aiheuttamaan riskiin. Vastaavasti pienissä kohteissa, joissa varavoiman kokonaisuus on rajallinen ja rakennusten välinen jakelu vähäistä, hajautettu toteutus voi olla kokonaisuuden kannalta tarkoituksenmukaisempi.

6.6 Jatkokehityksen ja tutkimuksen tarpeet

Tämä diplomityö on luonteeltaan varavoimajärjestelmän rakenteellinen ja järjestelmätason tarkastelu, jossa keskitetyn varavoiman soveltuvuutta arvioidaan teknistaloudellisesta ja toiminnallisesta näkökulmasta. Toteutuskelpoisen ratkaisun edellyttämät yksityiskohtaiset mitoitukset, suojausasetusten yhteensovitukset sekä lupiin ja käyttöorganisaatioon liittyvät menettelyt rajautuvat tämän työn ulkopuolelle ja muodostavat siten luontevat jatkokehityskohdet.

Keskeisin jatkotoimenpide on oikosulku- ja selektiivisyystarkastelu koko tarkasteltavan keskijänniteverkon laajuudessa varavoimakäytön eri käyttötilanteissa. Tämä sisältää vikavirtojen jakautumisen eri verkonhaaroihin, katkaisijoiden katkaisukyvyyn ja kiskostojen termisen ja dynaamisen keston sekä rele- ja automaatioasetusten yhteensovituksen siten, että viat rajautuvat mahdollisimman pienelle verkon osalle sekä normaali- että saarekekäytössä. Lisäksi tarkastelu tulee ulottaa tilanteisiin, joissa varavoimajärjestelmä toimii $N-1$ -tilanteessa ja kuormia rajataan kuormanhallinnan avulla.

Toinen merkittävä jatkokehitysalue liittyy järjestelmän dynaamiseen toimintaan ja kuormien kytkentäjärjestykseen. Toteutussuunnittelussa on tarpeen varmistaa jännite- ja taajuuskäyttäytyminen kuormien portaittaisessa kytkennässä, suurten moottorikuormien käynnistyksissä, muuntajien magnetointitilanteissa sekä epälineaaristen kuormien aiheuttamissa transientti-ilmiöissä. Tällaiset tarkastelut edellyttävät mallinnusta, jossa huomioidaan generaattorien säätöjärjestelmät, rinnankäytön kuormanjako sekä saarekekäytön ohjauslogiikka.

Kolmantena jatkotarkasteluna korostuu käyttö- ja automaatioarkkitehtuurin määrittely keskitetyille ratkaisulle. Kun varavoima liitetään olemassa olevaan keskijänniteverkkoon ja järjestelmä kykenee syöttämään laajaa verkkoaluetta saarekekäytössä, korostuvat turvalliset erotus-, lukitus- ja työmaadoitusjärjestelyt sekä tahdistamattomien kytkentöjen estäminen.

Tämän vuoksi jatkokehityksessä on perusteltua määritellä käyttötilojen hallinta, ohjaus- ja valvontajärjestelmän redundanssi, toimintatavat poikkeustilanteissa sekä kuormanhallinnan yksityiskohtaiset periaatteet.

Neljäs jatkokehityskokonaisuus liittyy pitkän häiriötilanteen hallintaan ja käytön aikaisiin menettelyihin. Toiminnallisesti hyväksyttävien olosuhteiden ylläpito vuorokausien sähkökatkoissa edellyttää selkeää käyttö- ja kunnossapitomallia, testaus- ja harjoitusohjelmaa sekä vastuunjakoa, mukaan lukien nimetty käytönjohto ja menettelyt saarekkeeseen siirtymisessä, saarekkeessa toimimisessa ja normaaliverkkoon palautumisessa.

Lisäksi jatkotyönä tulee tarkentaa ympäristö- ja lupakysymyksiä sekä toteutuksen reunaeh-toja. Keskitetty kontti- ja polttoaineratkaisu edellyttää kohdekohtaiset selvitykset esimerkiksi melusta, päästöistä, paloturvallisuudesta ja polttoainevarastoinnin vaatimuksista sekä näihin liittyvistä viranomaismenettelyistä. Samanaikaisesti kustannus- ja riskianalyysejä voidaan syventää herkkyystarkasteluilla, joissa tarkastellaan esimerkiksi kuormituksen kasvun, generaattoriyksiköiden lukumäärän, laajennettavuuden sekä kunnossapidon ja testauksen vaikutusta kokonaistaloudellisuuteen.

Lähteet

- Andersson, G. *et al.* (2005) “Causes of the 2003 Major Grid Blackouts in North America and Europe, and Recommended Means to Improve System Dynamic Performance,” *IEEE Transactions on Power Systems*, 20(4), pp. 1922–1928. Available at: <https://doi.org/10.1109/TPWRS.2005.857942>.
- Beatty, M.E. *et al.* (2006) “Blackout of 2003: Public Health Effects and Emergency Response,” *Public Health Reports*, 121. Available at: <https://doi.org/10.1177/003335490612100109>.
- Cummins Generator Technologies (2014) *DIG 156 m/10 -generaattorin tekninen tuoteseloste*. ING-FCD-0112. AvK (Stamford). Available at: https://www.stamford-avk.com/sites/stamfordavk/files/dig156m_10_50_10500.pdf (Accessed: January 8, 2026).
- Helen Sähköverkko Oy (2024) *Ohjeet sähköä tuottavan laitoksen liittämiseksi Helen Sähköverkko Oy:n sähköjakeluverkkoon*. 4.03/24. Helsinki: Helen Sähköverkko Oy.
- IMEFY (n.d.) *Imefy - Valuhartsieristeiset jakelumuuntajat*. IMEFY. Available at: <https://www.klinkmann.com/hubfs/e-Catalogue/Imefy/Valuhartsieristeiset%20jakelumuuntajat%20esite.pdf> (Accessed: December 18, 2025).
- Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE) (2007) “IEEE Recommended Practice for the Design of Reliable Industrial and Commercial Power Systems.” New York, NY, USA: Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE). Available at: <https://doi.org/10.1109/IEEESTD.2007.380668>.
- Li, Z., Yuan, Y. and Li, F. (2010) “Evaluating the reliability of islanded microgrid in an emergency mode,” *45th International Universities Power Engineering Conference UPEC2010. 45th International Universities Power Engineering Conference UPEC2010*, pp. 1–5. Available at: <https://ieeexplore.ieee.org/document/5654404> (Accessed: November 10, 2025).
- Liu, X. *et al.* (2023) “A decision-making model for efficient fair electricity rationing under major power outage emergencies,” *International Journal of Computers Communications & Control*, 18(5). Available at: <https://doi.org/10.15837/ijccc.2023.5.5554>.
- Marqusee, M. and Jenket, D. (2020) “Reliability of emergency and standby diesel generators: Impact on energy resiliency solutions,” *Applied Energy*, 268. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2020.114918>.
- NYSERDA, U.S. Department of Energy (DOE), and the City of Troy / Rensselaer Polytechnic Institute / Samaritan Hospital (2016) *City of Troy / RPI / Samaritan Hospital – NY Prize Stage 1 Feasibility Study*. Feasibility Study Report #51. New York, NY: New York State Energy Research and Development Authority (NYSERDA), p. Appendix I, 3. Available at: <https://www.nyserda.ny.gov/-/media/Project/Nyserda/Files/Programs/NY-Prize/studies/51-City-of-Troy-RPI-Samaritan.pdf> (Accessed: November 10, 2025).

Sähköinfo Oy (2019) *ST-KÄSIKIRJA 31. 4.*, uudistettu painos. Espoo: Sähköinfo Oy.

“SFS 600-1:2022 – Pienjännitesähköasennukset” (2022). Helsinki: Suomen Standardisoimisliitto SFS.

“SFS 601:2018 – Suurjännitesähköasennukset ja ilmajohdot” (2018). Helsinki: Suomen Standardisoimisliitto SFS.

Skjong, E. *et al.* (2015) “The Marine Vessel’s Electrical Power System: From its Birth to Present Day,” *Proceedings of the IEEE*, 103(12), pp. 2410–2424. Available at: <https://doi.org/10.1109/JPROC.2015.2496722>.

Soler, S. (2025) *Los hospitales afectados por el apagón mantienen la actividad imprescindible con generadores, RTVE.es*. Available at: <https://www.rtve.es/noticias/20250428/apagon-hospitales-afectados-generadores/16557734.shtml> (Accessed: November 10, 2025).

Stawowy, M. *et al.* (2021) “Method of estimating uncertainty as a way to evaluate continuity quality of power supply in hospital devices,” *Energies*, 14(2). Available at: <https://doi.org/10.3390/en14020486>.

Zhang, L. *et al.* (2022) “Reliability and cost analysis of the integrated emergency power system in building complex,” *Energy Exploration & Exploitation*, 40(2), pp. 501–527. Available at: <https://doi.org/10.1177/01445987211036824>.

Liite 1. Päämuuntajan tehonsiirron kuvaajat ajan funktiona

Mittausaineisto on kerätty diskreetteinä aikapisteinä. Tarkasteltava ilmiö, eli päämuuntajan tehonsiirto, on kuitenkin luonteeltaan jatkuva prosessi, jossa sähköteho kehittyy ajassa kuormituksen, sähköverkon dynamiikan sekä ohjaus- ja säätöjärjestelmien vaikutuksesta. Yksittäiset mittauspisteet edustavat siten jatkuvan signaalin näytteitä, eivät toisistaan riippumattomia havaintoja.

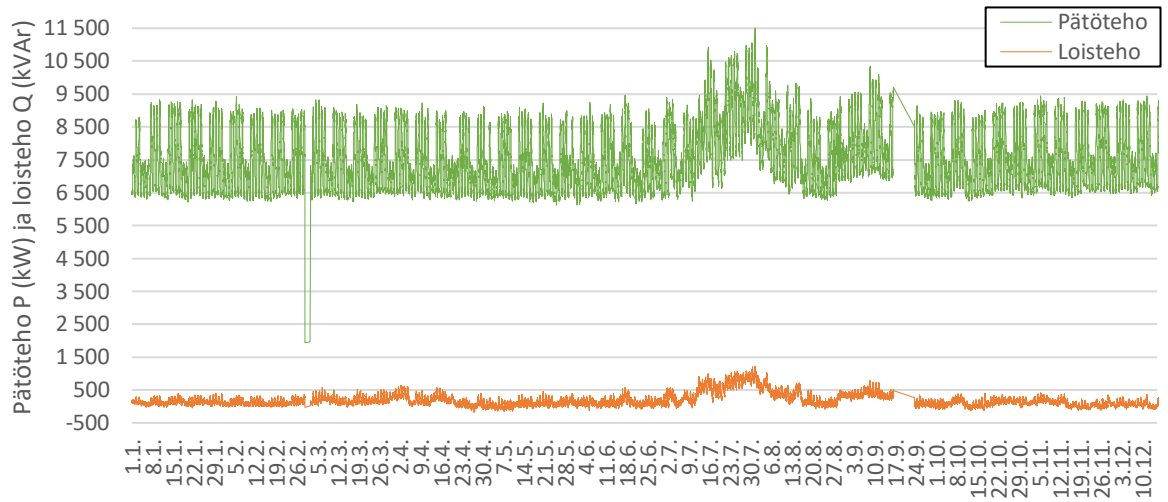
Aggregoimattomat, kronologisesti peräkkäiset mittausaineistot on esitetty aikasarjakuvaajina, joissa mittauspisteet on yhdistetty viivalla. Tällainen esitystapa vastaa paremmin tehonsiirron todellista ajallista käyttäytymistä ja tarjoaa fysikaalisesti perustellun ja havainnollisen kuvauksen tehon muutoksista ajan funktiona, erityisesti silloin kun näytteenotaväli on riittävän pieni suhteessa ilmiön dynamiikkaan. Näissä kuvaajissa viiva toimii approksimaationa jatkuvasta ilmiöstä diskreettien mittausten välillä.

Mittausaineistossa esiintyy yksittäisiä aikajaksoja, joilla mittaus on keskeytynyt. Näissä kohdissa kuvaajaan muodostuu viivayhdistys kahden erillisen mittausjakson välille. Tällaiset äkilliset viivahyppäykset eivät edusta todellista tehonsiirron kehitystä kyseisen ajanjakson aikana, vaan ainoastaan graafista yhdistämistä peräkkäisten mittausjaksojen välillä. Nämä kohdat ovat tunnistettavissa kuvaajista, eikä niitä tule tulkita fysikaalisina ilmiöinä tai todellisina tehon muutoksina. Mittauskatkot eivät kuitenkaan vaikuta tarkastelujaksojen kokonaiskuvaan tai tehtyihin johtopäätöksiin.

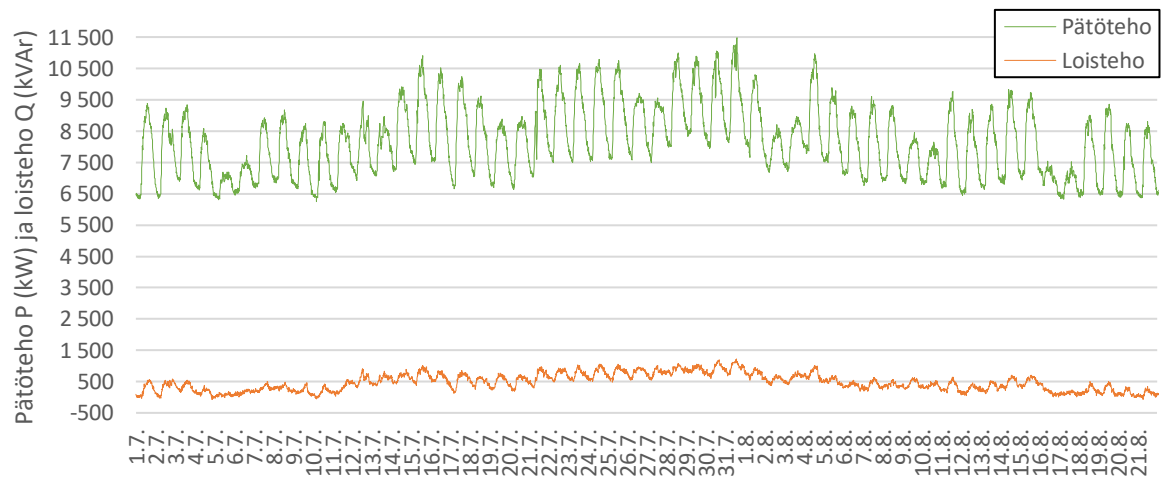
Viikonpäiväkohtaiset tarkastelut on sen sijaan esitetty erillisinä hajontakuvinä (scatter), joissa aineisto on aggregoitu vuorokauden sisäisen ajan mukaan aikavälille 0:00–23:45. Näissä kuvaajissa yksittäiset pisteet edustavat tietyn kellonajan tilastollisesti aggregoituja arvoja useista päivistä, eivätkä ne muodosta kronologisesti jatkuvaa aikajanaa yksittäisen päivän sisällä. Tämän vuoksi viikonpäiväkohtaisissa kuvaajissa ei ole käytetty viivayhdistystä.

Hajontakuvinä viivayhdistyksen käyttäminen edellyttäisi oletusta siitä, että peräkkäisten aggregoitujen havaintopisteiden välillä vallitsee yksikäsitteinen ja jatkuva funktionaalinen yhteys, mikä ei ole tässä tarkastelussa perusteltua. Aggregointivaiheeseen liittyy lisäksi puuttuvia havaintoja ja suodatettuja aikajaksoja, jolloin viivayhdistys voisi antaa harhaanjohtavan kuvan aineiston todellisesta rakenteesta. Piste-esitys säilyttää näin ollen havaintojen ajallisen ja tilastollisen hajonnan ilman ylimääräisiä jatkuvuus- tai interpolointioletuksia.

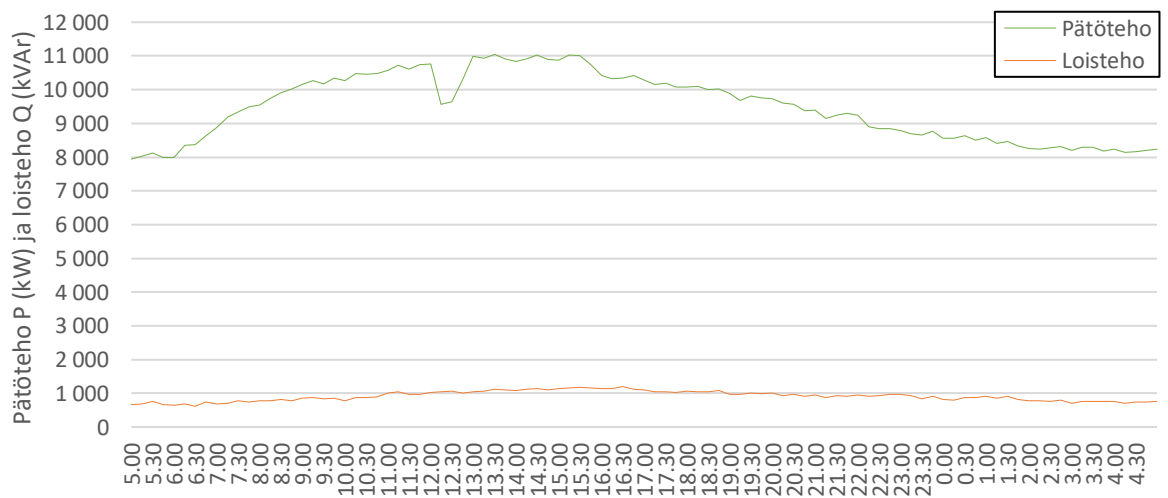
Eri esitystapoja on siten käytetty tarkoituksenmukaisesti kuvaajan analyysitavoitteen mukaan: aggregoimattomien, ajallisesti jatkuvien mittausarjojen kohdalla viivakuvaajaa, ja viikonpäiväkohtaisissa, vuorokauden sisäisen ajan mukaan aggregoiduissa tarkasteluissa hajontakuvaajaa.



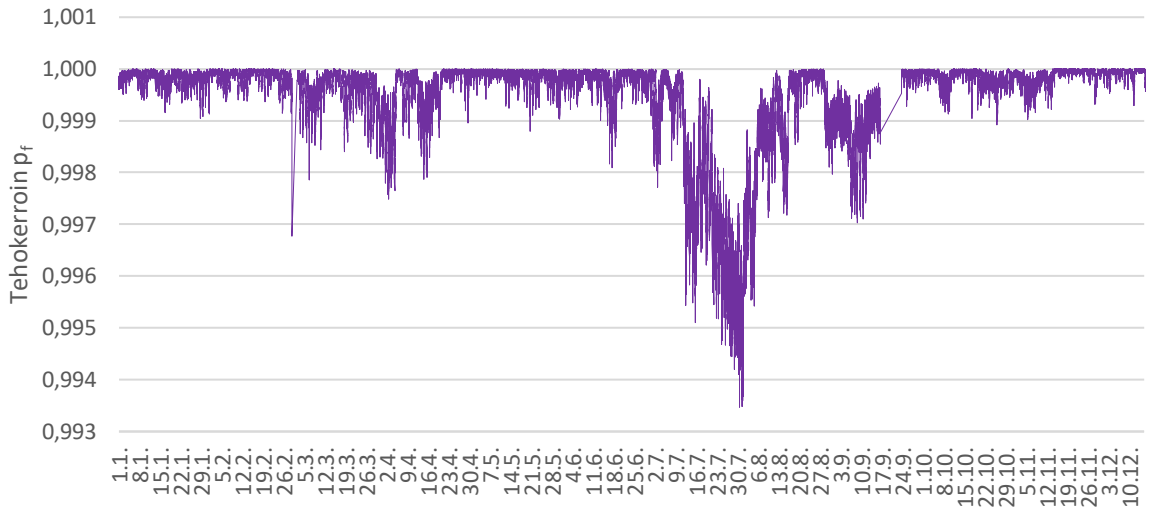
Liite 1, kuva 1. Vuoden 2025 tehotiedot ajalta 1.1.–15.12.



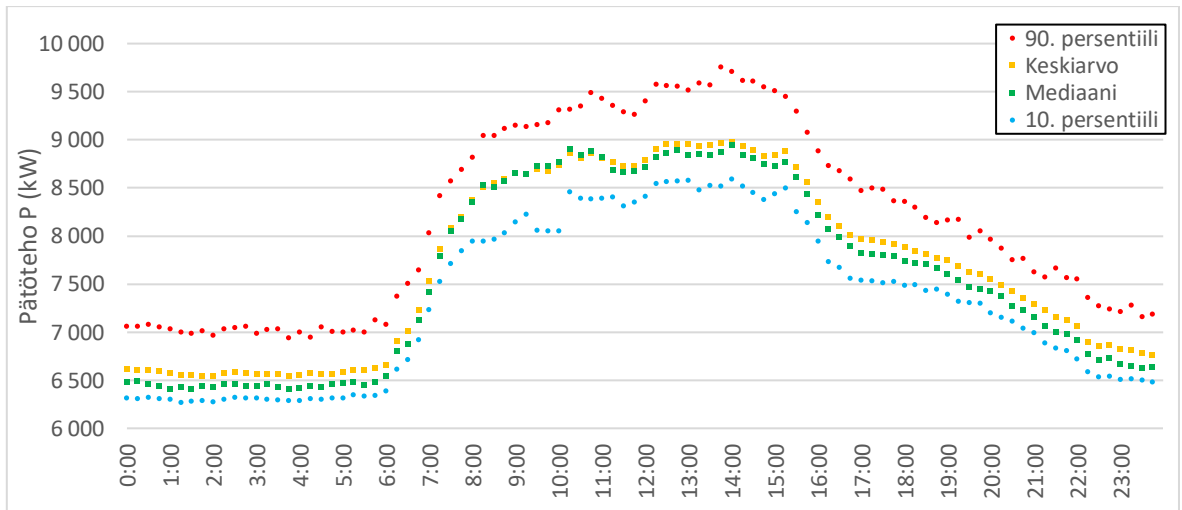
Liite 1, kuva 2. Vuoden 2025 tehotiedot ajalta 1.7.–22.8.



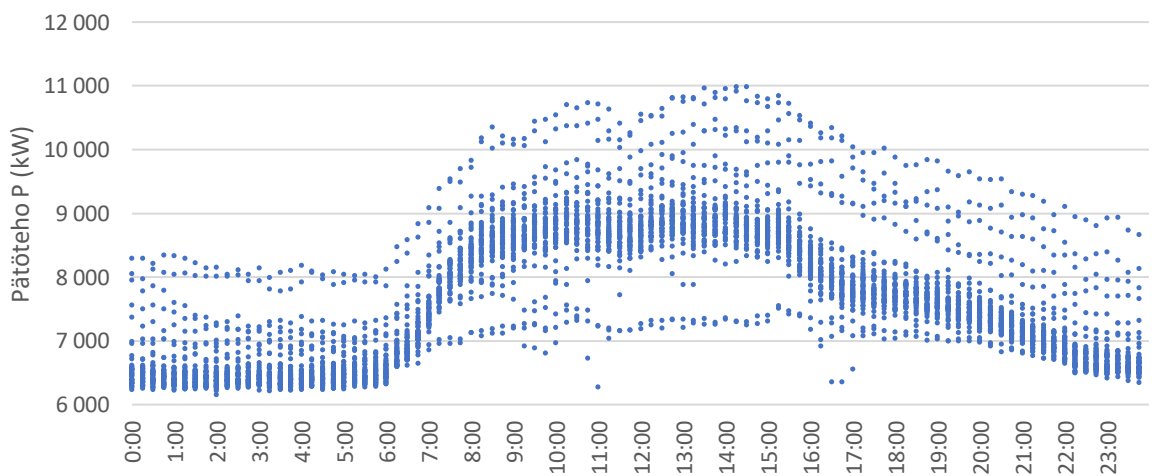
Liite 1, kuva 3. Pätö- ja loisteho ajanjaksolla 30.7. klo 5:00–31.7. klo 5:00



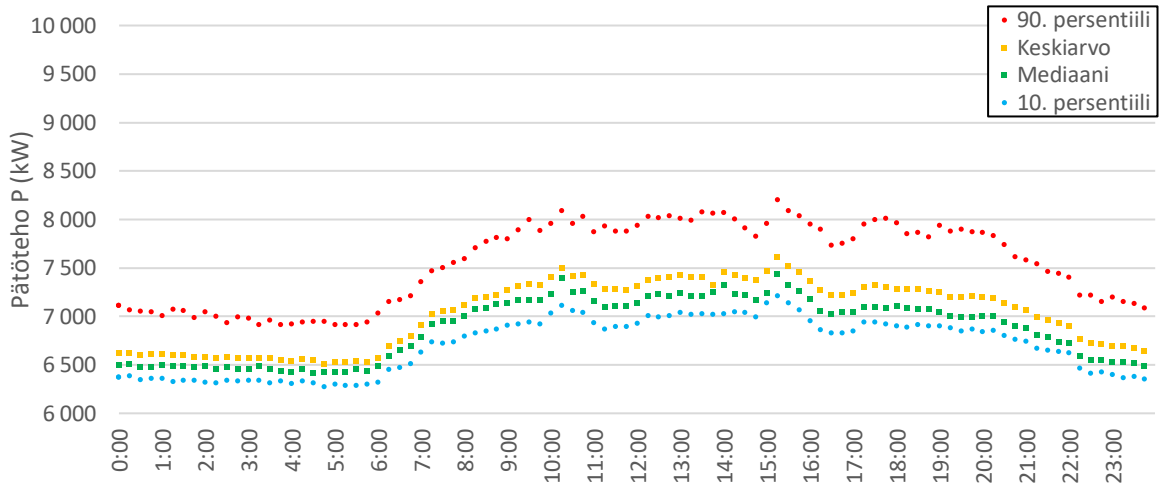
Liite 1, kuva 4. Päämuuntajan tehokerroin (p_f)



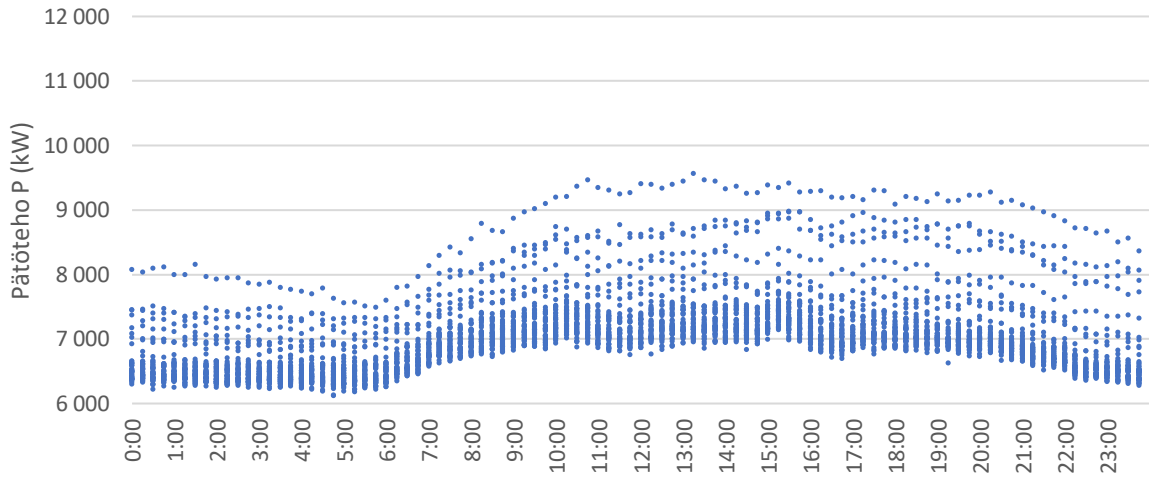
Liite 1, kuva 5. Maanantain pätötehon aggregoitu vuorokausiprofiili



Liite 1, kuva 6. Maanantain pätötehon mittausaineisto kellonajan mukaan ryhmiteltyinä



Liite 1, kuva 7. Sunnuntain pätötehon aggregoitu vuorokausiprofiili



Liite 1, kuva 8. Sunnuntain pätötehon mittausaineisto kellonajan mukaan ryhmiteltyinä

Liite 2. Caterpillarin generaattorin tekninen dokumentaatio

Tässä opinnäytetyössä on käytetty esimerkkitapauksena alla esitetyn teknisen tuotedokumentaation mukaista generaattoria. Tuoteselosteesta on poimittu tähän liitteeseen työn kannalta olennaisimmat tiedot ruudunkaappauksina.

Cat® C175-20 Diesel Generator Sets



Image shown may not reflect actual configuration

Bore – mm (in)	175 (6.89)
Stroke – mm (in)	220 (8.66)
Displacement – L (in ³)	105.8 (6456)
Compression Ratio	15.3:1
Aspiration	TA
Fuel System	Common Rail
Governor Type	ADEM™ A4

Standby 50 Hz kVA (ekW)	Mission Critical 50 Hz kVA (ekW)	Prime 50 Hz kVA (ekW)	Continuous 50 Hz kVA (ekW)	Emissions Performance
4000 (3200)	4000 (3200)	3600 (2880)	3250 (2600)	Optimized for Low Fuel Consumption
4000 (3200)	4000 (3200)	—	—	Optimized for Low Emissions

Features

Cat® Diesel Engine

- Designed and optimized for low emissions or low fuel consumption
- Reliable performance proven in thousands of applications worldwide
- Certified alternative fuels including Hydrotreated Vegetable Oil (HVO), Renewable Diesel (RD) and Hydrotreated Renewable Diesel (HRD) which meet EN 15940 or ASTM D975 can be used or blended with EN 590 diesel

Generator Set Package

- Accepts 100% block load in one step
- Meets NFPA 110 loading requirements
- Conforms to ISO 8528-5 G3 load acceptance requirements
- Reliability verified through torsional vibration, fuel consumption, oil consumption, transient performance, and endurance testing

Alternators

- Superior motor starting capability minimizes need for oversizing generator
- Designed to match performance and output characteristics of Cat diesel engines

Cat Energy Control System (ECS)

- User-friendly interface and navigation
- Scalable system to meet a wide range of installation requirements
- Expansion modules and site specific programming for specific customer requirements
- Graphical touchscreen display
- Easily upgradeable

Warranty

- 24 months/1000-hour warranty for standby and mission critical ratings
- 12 months/unlimited hour warranty for prime and continuous ratings
- Extended service protection is available to provide extended coverage options

Worldwide Product Support

- Cat dealers have over 1,800 dealer branch stores operating in 200 countries
- Your local Cat dealer provides extensive post-sale support, including maintenance and repair agreements

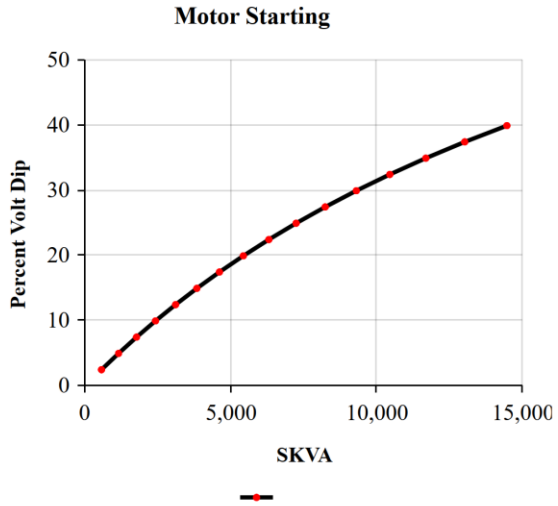
Financing

- Caterpillar offers an array of financial products to help you succeed through financial service excellence
- Options include loans, finance lease, operating lease, working capital, and revolving line of credit
- Contact your local Cat dealer for availability in your region

Selected Model
Engine: C175-20 **Generator Frame:** 3055 **Genset Rating (kW):** 3200.0 **Line Voltage:** 10500
Fuel: Diesel **Generator Arrangement:** 4624892 **Genset Rating (kVA):** 4000.0 **Phase Voltage:** 6062
Frequency: 50 **Excitation Type:** Permanent Magnet **Pwr. Factor:** 0.8 **Rated Current:** 219.9
Duty: STANDBY **Connection:** SERIES STAR **Application:** EPG **Status:** Current
Version: 20231 /20231 /20231 /637822

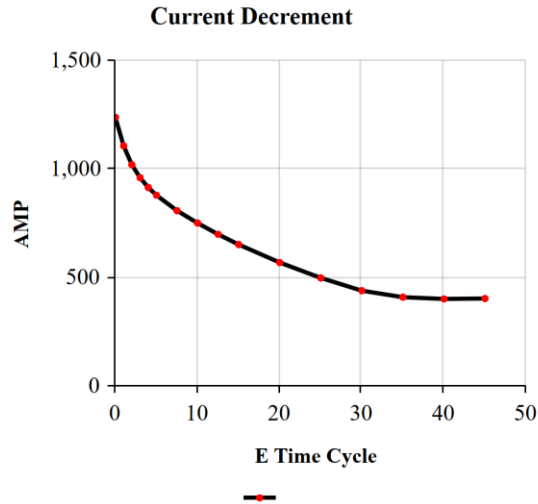
Starting Capability & Current Decrement
 Motor Starting Capability (0.4 pf)

SKVA Percent Volt Dip	
556	2.5
1,141	5.0
1,757	7.5
2,408	10.0
3,096	12.5
3,825	15.0
4,597	17.5
5,418	20.0
6,292	22.5
7,224	25.0
8,221	27.5
9,288	30.0
10,435	32.5
11,670	35.0
13,004	37.5
14,449	40.0



Current Decrement Data

E Time Cycle AMP	
0.0	1,240
1.0	1,109
2.0	1,022
3.0	962
4.0	917
5.0	881
7.5	810
10.0	753
12.5	701
15.0	654
20.0	571
25.0	500
30.0	441
35.0	411
40.0	403
45.0	405



Instantaneous 3 Phase Fault Current: 1240 Amps **Instantaneous Line - Line Fault Current:** 944 Amps
Instantaneous Line - Neutral Fault Current: 1528 Amps

Liite 2, taulukko 1. Caterpillarin suorituskykytaulukko

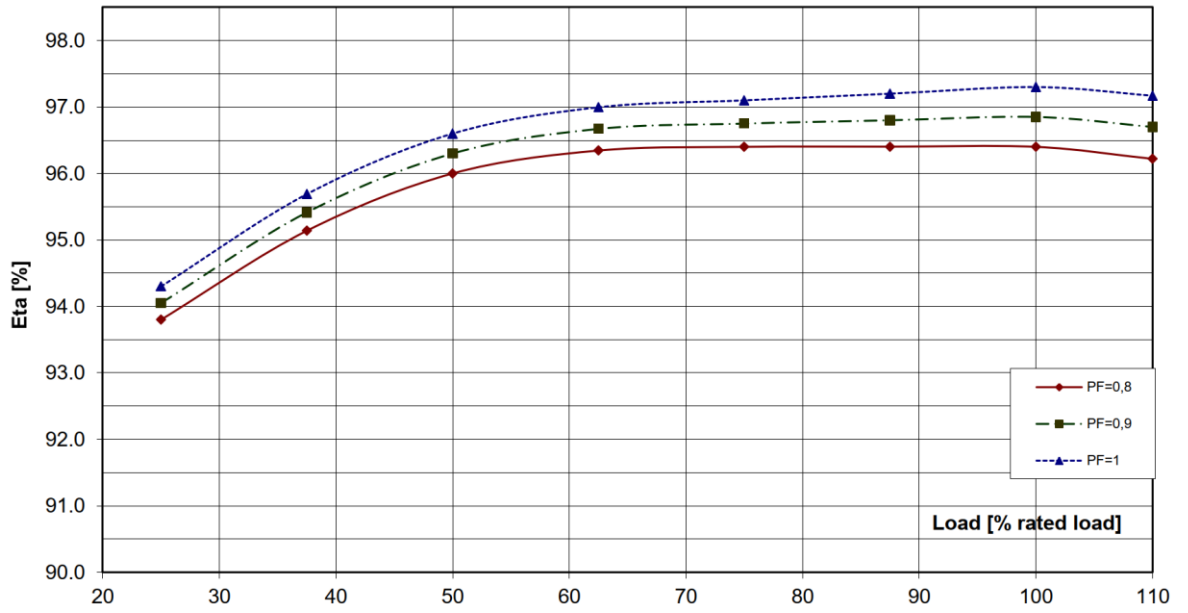
Performance	Standby	Mission Critical	Prime	Continuous
Frequency	50 Hz	50 Hz	50 Hz	50 Hz
Gen set power rating without fan	3200 ekW	3200 ekW	2880 ekW	2600 ekW
Gen set power rating without fan @ 0.8 power factor	4000 kVA	4000 kVA	3600 kVA	3250 kVA
Emissions	Low Fuel	Low Fuel	Low Fuel	Low Fuel
Performance number	DM8940-05	EM0375-03	DM8941-10	DM8942-06
Fuel Consumption				
100% load without fan – L/hr (gal/hr)	762.4 (201.4)	762.4 (201.4)	688.9 (182.0)	619.4 (163.6)
75% load without fan – L/hr (gal/hr)	567.7 (150.0)	567.7 (150.0)	520.1 (137.4)	471.1 (124.4)
50% load without fan – L/hr (gal/hr)	396.6 (104.8)	396.6 (104.8)	364.4 (96.3)	331.9 (87.7)
25% load without fan – L/hr (gal/hr)	221.6 (58.5)	221.6 (58.5)	206.8 (54.6)	194.9 (51.5)
Cooling System				
Engine coolant capacity – L (gal)	440.0 (116.2)	440.0 (116.2)	440.0 (116.2)	440.0 (116.2)
Inlet Air				
Combustion air inlet flow rate – m ³ /min (cfm)	267.0 (9429.1)	267.0 (9429.1)	248.2 (8763.9)	232.5 (8210.5)
Exhaust System				
Exhaust stack gas temperature – °C (°F)	421.8 (791.2)	421.8 (791.2)	416.5 (781.2)	410.7 (771.3)
Exhaust gas flow rate – m ³ /min (cfm)	652.2 (23028.2)	652.2 (23028.2)	596.1 (21048.2)	541.3 (19113.4)
Exhaust system backpressure (maximum allowable) – kPa (in. water)	6.7 (27.0)	6.7 (27.0)	6.7 (27.0)	6.7 (27.0)
Heat Rejection				
Heat rejection to jacket water – kW (Btu/min)	1613 (91754)	1613 (91754)	1431 (81384)	1250 (71074)
Heat rejection to exhaust (total) – kW (Btu/min)	2762 (157080)	2762 (157080)	2516 (143057)	2293 (130394)
Heat rejection to aftercooler – kW (Btu/min)	373 (21186)	373 (21186)	312 (17736)	258 (14669)
Heat rejection to atmosphere from engine – kW (Btu/min)	184 (10446)	184 (10446)	177 (10089)	172 (9795)
Heat rejection from alternator – kW (Btu/min)	140 (7969)	140 (7969)	123 (7007)	111 (6329)
Emissions* (Nominal)				
NOx mg/Nm ³ (g/hp-h)	4168.6 (7.87)	4168.6 (7.87)	4278.9 (8.03)	4296.6 (7.97)
CO mg/Nm ³ (g/hp-h)	61.8 (0.13)	61.8 (0.13)	64.5 (0.13)	66.7 (0.14)
HC mg/Nm ³ (g/hp-h)	21.0 (0.05)	21.0 (0.05)	23.5 (0.06)	26.6 (0.06)
PM mg/Nm ³ (g/hp-h)	6.2 (0.01)	6.2 (0.01)	7.2 (0.02)	14.6 (0.03)
Emissions* (Potential Site Variation)				
NOx mg/Nm ³ (g/hp-h)	5002.3 (9.45)	5002.3 (9.45)	5134.7 (9.64)	5156.0 (9.56)
CO mg/Nm ³ (g/hp-h)	111.2 (0.23)	111.2 (0.23)	116.1 (0.24)	120.1 (0.24)
HC mg/Nm ³ (g/hp-h)	27.9 (0.07)	27.9 (0.07)	31.2 (0.07)	35.4 (0.08)
PM mg/Nm ³ (g/hp-h)	8.7 (0.02)	8.7 (0.02)	10.1 (0.02)	20.4 (0.05)

*mg/Nm³ levels are corrected to 5% O₂. Contact your local Cat dealer for further information.

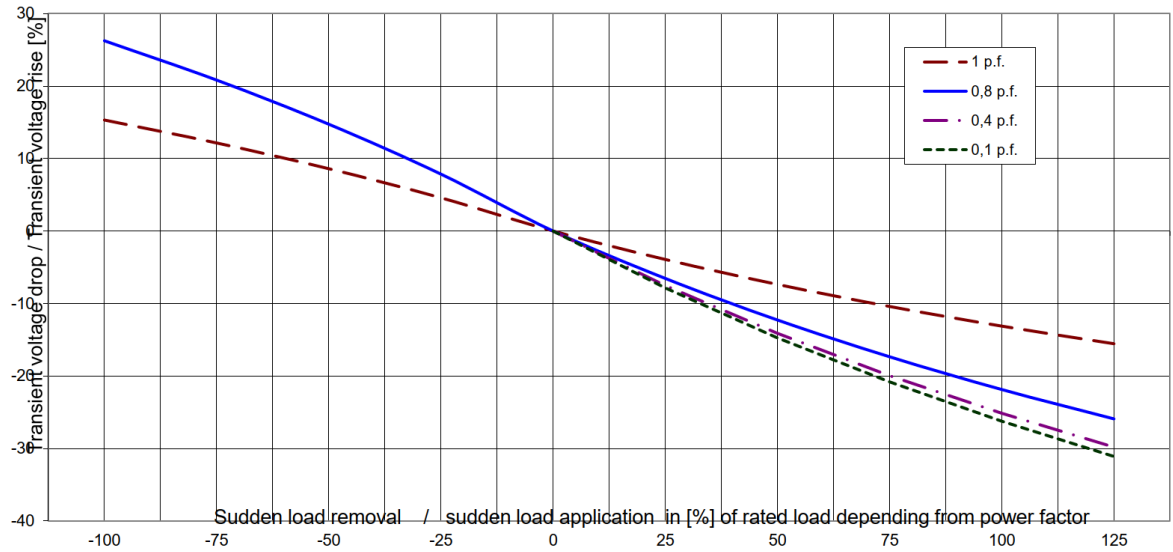
Liite 3. Stamfordin generaattorin tekninen dokumentaatio

Tässä opinnäytetyössä on käytetty esimerkkitapauksena alla esitetyn teknisen dokumentaation mukaista generaattoria (Cummins Generator Technologies, 2014). Tuoteselosteesta on poimittu tähän liitteeseen työn kannalta olennaisimmat tiedot ruudunkaappauksina.

AvK		Technical Data Sheet for AvK-Alternators				FM 7.3-5			
Date:	09/01/14	Customer:	GENERIC DATASHEET only						
Project No.:		AvK Reference:	dig156m_10_50_10500_A048N150						
Object data:									
Site:		Prime Mover:							
Application:	Stationary Power Plant	Manufacturer:							
Generator data:									
Generator:	DIG 156 m/10	Poles:	10	Standards: IEC 60034					
Rated power:	4000 kVA	3200 kWe	3320 kWm						
Power factor:	0.80								
Power at pf 1,0	3230 kVA	3230 kWe	3320 kWm						
Rated voltage:	10.5 kV								
Speed:	600 1/min								
Frequency:	50 Hz	Voltage range / frequency range:							
Rated current:	219.9 A	Zone A according IEC 60034-1 (dU = +/-5%, df = +/-2%)							
Winding pitch:	ca. 5/6								
Insulation class:	Stator: Class F	Rotor: Class F	Temperature rise:	F					
Ambient temperature:	40 ° C	Environment:	Standard environment						
Site altitude:	1000 m	Filter:							
Enclosure:	IP23								
Cooling:	IC 01 - Open-circuit ventilation								
Coolant:	Ambient Air	Temperature	40 ° C	Temperature Air inlet	40 ° C				
		Coolant:		generator:					
		Cooling air vol.:	4.0 m³/s	Cooling water quantity:	n/a				
Moment of inertia (I):	1000 kgm²	Weight:	18000 Kg	Losses (environment):	120 KW				
				Losses (cooling):	n/a				
Wires:	4 terminals, starpoint connected in terminal box								
Operation mode:	Single mode								
Regulators:									
Voltage regulator:	DECS 100								
Electrical data: (acc. IEC)									
Efficiencies:	110%	100%	75%	50%	25%				
Power factor 0.8	96,22	96,4	96,4	96	93,8				
Power factor 0.9	96,7	96,85	96,75	96,3	94,05				
Power factor 1.0	97,17	97,3	97,1	96,6	94,3				
Reactances and time constants									
	unsaturated	saturated		unsaturated	saturated				
X _d	1.50	1.35 p.u.	X _q	0.75	0.74 p.u.	T _{d0'}	2.3 s	T _{d0''}	0.03784 s
X _{d'}	0.280	0.280 p.u.	X _{q'}	0.75	0.74 p.u.	T _{d'}	0.43 s	T _{q0'}	0.5 s
X _{d''}	0.204	0.185 p.u.	X _{q''}	0.204	0.204 p.u.	T _{d''}	0.025 s	T _{q0''}	0.18382 s
X ₂	0.213	0.194 p.u.	x ₀	0.062	0.056 p.u.	T _a	0.08 s	T _{q'}	0.5 s
X _{1s}	n.a.	0.111 p.u.						T _{q''}	0.05 s
Short circuit ratio saturated:	0.74		Z _n	27.563 Ohm					
Short circuit data:									
Initial short circuit current (3-phase):	I _{k''}	1189 A							
Max. peak current (3-phase):	I _s	3027 A							
Sustained short circuit current:	I _k	660 A							
		Minimum 3 x rated current for max.10 s							
Initial short circuit torque:	M _{k2}	447.3 kNm							
	M _{k3}	268.4 kNm							
Max. faulty synchron moment:	M _f	961.7 kNm							
Rated kVA torque:	M _{SN}	63.67 kNm							
Rated torque	M _N	50.94 kNm							
Shaft torque	M _{Sh}	52.84 kNm							
Load application:									
max. load application: 2143 kVA (corresponds to 53,57 % from 4000 kVA) for Power factor 0.4						Power: 4000 kVA			
15% transient voltage drop						Power factor: 0.8			
						transient voltage drop: -21.9 %			
Remarks:									



Liite 3, kuva 2. Stamfordin hyötysuhdekäyrä



Liite 3, kuva 3. Stamfordin kuorman äkillisen kytkennän ja irtikytkennän aiheuttama jännitteen muutos