LAPPEENRANNAN-LAHDEN TEKNILLINEN YLIOPISTO LUT
LUT School of Energy Systems
Sähkötekniikan koulutusohjelma

Diplomityö

Matti Björninen

METSÄTEOLLISUUDEN SÄHKÖVERKON KOMPENSOINNIN JA YLIAALTOSUODATUKSEN OPTIMOINTI

Työn tarkastajat:	Apul. prof. Jukka Lassila
	TkT Juha Haakana
Työn ohjaaja:	DI. Sami Tuomela

14.06.2024

TIIVISTELMÄ

Lappeenrannan-Lahden teknillinen yliopisto LUT

LUT School of Energy Systems

Sähkötekniikan koulutusohjelma

Matti Björninen

Metsäteollisuuden sähköverkon kompensoinnin ja yliaaltosuodatuksen optimointi

Diplomityö

2024

105 sivua, 53 kuvaa, 12 taulukkoa ja 12 liitettä

Työn tarkastajat: Apul. prof. Jukka Lassila

TkT Juha Haakana

Työn ohjaaja: DI. Sami Tuomela

Hakusanat: metsäteollisuus, sähkön laatu, loistehon kompensointi, yliaaltosuodatus, elinkaarikustannukset

Metsäteollisuuden laitoksilla sähkönjakelun toimintavarmuus on tärkeä osa tuotantoprosessia. Sähkönjakelun toimintavarmuuden osalta korostuu käytettävän tekniikan luotettavuus ja sähkön tekninen laatu. Heikko sähkön tekninen laatu näyttäytyy yleisimmin erilaisina jännitepoikkeamina, kuten yliaaltoina perustaajuiseen jännitteeseen nähden. Heikko sähkön laatu saattaa johtaa laiterikkoihin, jotka pahimmillaan aiheuttavat tuotannon keskeytyessä taloudellisia haittoja. Sähkön laatuun pystytään vaikuttamaan erilaisilla loistehon kompensointilaitteistoilla. Tarvittavan loistehon kompensoinnin määrä on riippuvainen sähkötehon suuruudesta, jonka vuoksi isoja sähkötehoja sisältävissä metsäteollisuuden laitoksissa esiintyy tarve kompensointilaitteistoihin liittyviin investointeihin.

Tässä työssä tarkasteltiin sähkön laatua parantavien kompensointilaitteistojen investointien kannattavuutta metsäteollisuuden laitoksen sähkönjakelun erityispiirteet huomioiden. Tarkastelu suoritettiin olemassa olevan metsäteollisuuden laitoksen sähkönjakeluverkkoon case-tarkastelun avulla. Case-tarkasteluun valituille laitteistoille määritettiin elinkaarikustannukset, jonka lisäksi niiden vaikutusta sähköverkkoon tarkasteltiin erilaisten sijoitteluperiaatteiden osalta. Tarkastelun perusteella kompensointilaitteistot ovat teknistaloudellisesti kannattavinta sijoittaa keskijännitteelle. Keskijännitekompensoinnilla pystytään tuottamaan loistehoa sekä tavanomaisten yliaaltotaajuuksien suodatusta pienjännitettä kannattavammin. Laitteistojen sijoittamista pienjännitteelle keskijännitteen ohella tulee harkita kohdennetun sähkön laatuun vaikuttamisen tarpeen, kuten yliaaltosuodatuksen tai häviöiden optimoinnin suhteen.

ABSTRACT

Lappeenranta-Lahti University of Technology LUT

LUT School of Energy Systems

Electrical Engineering

Matti Björninen

Optimization of forest industry power grid compensation and harmonic filtering

Master's Thesis

2024

105 pages, 53 figures, 12 tables and 12 appendixes

Examiners: Assoc. Prof. Jukka Lassila

D.Sc. (Tech.) Juha Haakana

Supervisor: M.Sc. (Tech) Sami Tuomela

Keywords: forest industry, power quality, reactive power compensation, harmonic filtering, life cycle costs

In forest industry plants, operational reliability of electricity distribution is an important part of the production process. Regarding to security of the electricity distribution supply, the technology reliability and the technical quality of the electricity are emphasized. The weak quality of electricity is commonly shown as various voltage deviations, such as harmonics compared to the fundamental frequency voltage. Weak electricity quality may lead to equipment breakdowns, which at worst cause financial harm when production is interrupted. The quality of electricity can be influenced with reactive power compensation equipment's. The required amount of reactive power compensation depends on the magnitude of the electric power. For that reason, in large power forest industry plants there is a need for implement investments to the reactive power compensation equipment's.

This master's thesis examines the profitability of investing in compensation devices that improve the quality of electricity, considering the forest industry´s special features. The study was performed on the electricity distribution network of an existing plant by using a case inspection method. Life cycle costs were determined for case review selected compensation equipment´s and their impact on the electricity network was examined in terms of different placement principles. Based on the review, compensation equipment´s are most profitable to place in medium voltage. Placing equipment´s to medium voltage, it is possible to produce reactive power and filter the most common harmonics the most profitably. The placement of equipment at low voltage along with medium voltage should be considered in relation to the need to influence targeted to the quality of electricity, such as harmonics filtering or optimization of losses.

ALKUSANAT

Diplomityö on tehty AFRY Finland Oy:lle marraskuun 2023 ja kesäkuun 2024 välisenä aikana. Työ toteutettiin yhteistyössä UPM Kaukaan sellutehtaan kanssa, ja se käsittelee loistehon kompensoinnin ja yliaaltosuodatuksen toteutusta.

Haluan kiittää Sami Tuomelaa tärkeästä tuesta ja ohjauksesta työn aikana sekä Ilkka Pahkalaa mielenkiintoisen aiheen esittämisestä. Lisäksi haluan kiittää työn tarkastajia Jukka Lassilaa ja Juha Haakanaa asiantuntevista kommenteista ja ohjauksesta. Erityiskiitokset AFRY Finland Oy:lle opiskelujen mahdollistamisesta työn ohessa.

Lopuksi haluan kiittää perhettäni tärkeästä tuesta opiskelujeni aikana.

Mikkelissä 14.6.2024

Matti Björninen

SISÄLLYSLUETTELO

KÄYTETYT MERKINNÄT JA LYHENTEET 7
1 JOHDANTO 11
1.1 Työn taustat ja tavoitteet 12
1.2 Työn menetelmät ja rajaukset 13
2 METSÄTEOLLISUUDEN TOIMINTAYMPÄRISTÖ 14
2.1 Metsäteollisuuden tehdasympäristö 14
2.2 Metsäteollisuuden laitoksen sähkönjakelu 15
2.2.1 Laitteistot ja laitteet 18
2.2.2 Toimintavarmuus ja turvallisuus 19
2.3 Case-ympäristö: UPM Kaukas 19
3 SÄHKÖN LAATU 23
3.1 Sähköteho ja kuormitustaso 26
3.2 Loisteho 30
3.2.1 Loissähköikkuna 34
3.2.2 Loistehon kompensointi 36
3.3 Yliaallot ja säröytyminen 39
3.3.1 Yliaaltojen määritys 43
3.3.2 Resonanssitaajuus ja yliaaltojen suodatus 45
3.3.3 Yliaaltojen aiheuttajat 47
4 ELINKAARIKUSTANNUKSET JA INVESTOINNIN KANNATTAVUUS 50
4.1 Investointikustannukset 50
4.2 Käytönaikaiset kustannukset 51
4.3 Nykyarvomenetelmä 53
4.3.1 Nettotuoton määritys 53
5 TEKNISET RATKAISUT KOMPENSOINNIN JA YLIAALTOJEN SUODATUKSEN TOTEUTUKSEEN 55
5.1 Kompensointilaitteistot 55
5.2 Yliaaltosuodattimet 58
5.3 Kompensointilaitteistojen ohjaus ja muu tekniikka 60
5.4 FACTS-järjestelmät 62

6 KOMPENSOINNIN JA YLIAALTOSUODATUKSEN OPTIMOINNIN TARKASTELUMETODIIKKA ... 65

6.1 Tyyppilaitteistot ja yksiköiden sijoittelu ... 66

6.1.1 Kuormitustasojen määritys ... 68

6.1.2 Päämuuntajapiirikohtaisen kompensointitarpeen määritys ... 70

6.2 Verkkomallinnus ... 70

7 CASE-TARKASTELU ... 72

7.1 Tekninen tarkastelu ... 72

7.2 Tyyppilaitteistojen yksikkökustannukset ... 78

7.3 Case-tapausten investoinnin kannattavuus ... 83

7.3.1 Investoinnin kannattavuus 63 MVA päämuuntajapiirillä ... 87

7.3.2 Investoinnin kannattavuus 31,5 MVA päämuuntajapiirillä ... 90

8 JOHTOPÄÄTÖKSET ... 93

8.1 Tyyppiratkaisuiden soveltuvuus metsäteollisuuden ympäristössä ... 93

8.2 Kompensointilaitteisto investoinnit päämuuntajatasolla tarkasteltuna ... 94

8.3 Tulosten luotettavuus ja yleinen hyödynnettävyys ... 98

9 YHTEENVETO ... 100

10 LÄHDELUETTELO ... 102

LIITTEET

LIITE I: Kompensointitarpeen tehokulman kertoimen määritys

LIITE II: Case-tarkastelun ympäristön kuormitustiedot

LIITE III: Case-tarkastelun kuormitusten jakautuminen

LIITE IV: Verkkomallinnuksen tulokset

LIITE V: Kompensointiyksiköiden määrät ja loistehon tuotto eri case-tapauksissa

LIITE VI: Häviöiden jakautuminen case-tapauksissa

LIITE VII: Vuotuiset häviökustannukset sekä vähähäviöisen kelan käytön vaikutus

LIITE VIII: Tyyppilaitteistojen elinkaarikustannukset

LIITE IX: Case-tapausten kokonaisinvestointi kustannukset

LIITE X: Vuotuisen nettotuoton määritys

LIITE XI: Case-tapausten investoinnin kannattavuus

LIITE XII: Korkokannan muutoksen vaikutukset investoinnin kannattavuuteen

KÄYTETYT MERKINNÄT JA LYHENTEET

Lyhenteet

AC	vaihtovirta (Alternating Current)
ATEX	räjähdysvaaralliset ilmaseokset (Atmostphere Explosive)
CAPEX	kertaluonteinen pääomameno (Capital Expenditure)
DC	tasavirta (Direct Current)
DCS	hajautettu ohjausjärjestelmä (Distributed Control System)
DOL	moottorin suorakäynnistys (Direct On Line)
DPF	perustaajuinen tehokerroin (Displacement Power Factor)
FACTS	joustava vaihtovirran siirtojärjestelmä (Flexible AC Transmission System)
GIS	kaasueristeinen kytkinlaitteisto (Gas Insulated Switch)
HVDC	suurjännite tasasähköliityntä (High Voltage Direct Current)
IEC	kansainvälinen sähköalan standardointiorganisaatio (International Electrotechnical Comission)
IMC	älykäs moottorinohjain (Intelligent Motor Controller)
KJ	keskijännite
KJV	kulutus- ja jakeluverkkojen järjestelmätekniset vaatimukset
KPL	kappalemäärä
NPV	nettonykyarvo (Net Present Value)
OPEX	toistuvaluonteinen kustannus (Operational Expences)
PF	kokonaistehokerroin (Power Factor)
PJ	pienjännite
PWM	pulssinleveysmodulaatio (Pulse Width Modulation)
SCADA	valvomo-ohjelmisto (Supervisory Control And Data Acquisition)
SCS	synkronikompensaattori (Synchronous Compensator)
SFS	Suomen standardisoimisliitto ry
SJ	suurjännite
SJV	sähkövarastojen järjestelmätekniset vaatimukset
STATCOM	staattinen synkronikompensaattori (Static Synchronous Compensator)
SVC	staattinen kompensaattori (Static VAR Compensator)
TCR	tyristoriohjattu reaktori (Thyristor Controlled Reactor)
TCSC	tyristoriohjattu sarjakompensaattori (Thyristor Contolled Series Capacitors)
THD	kokonaissärö (Total Harmonic Distortion)

THD-F	harmoninen kokonaissärö perustaajuuteen verraten
THD-R	harmoninen kokonaissärö tehollisarvoon verraten
TN-C	sähkön jakelujärjestelmä, yhteinen nolla- ja suojamaajohdin (Terra Neutral Combined)
TN-S	sähkön jakelujärjestelmä, erilliset nolla- ja suojamaajohtimet (Terra Neutral Seperated)
TSC	tyristorikytketty kondensaattori (Thyristor-Switched Capacitor)
TSSC	tyristorikytketty sarjakondensaattori (Thyristor-Switched Series Capacitor)
UPS	keskeytymätön virransyöttö (Uninterruptible Power Supply)
VJV	voimalaitosten järjestelmätekniset vaatimukset
VSD	taajuusmuuttajaohjattu moottorikäyttö (Variable Speed Drive)

Muuttujat

C	kapasitanssi
D	säröteho
D_H	Harmoninen säröteho
f	taajuus
f_h	yliaaltotaajuus
f_n	perustaajuus
f_r	resonanssitaajuus
H_h	häviöenergian hinta
I	virta
I_{hn}	yliaaltotaajuuskohtainen virta
I_p	pätövirta
I_q	loisvirta
I_{qC}	kapasitiivinen loisvirta
I_{qL}	induktiivinen loisvirta
K_{hn}	kokonaishuoltokustannukset ajanhetkellä n
K_{hx}	tyyppilaitteiston x huoltokustannus
$K_{HÄVn}$	häviökustannuksista muodostunut kassavirta ajanhetkellä n
K_i	kokonaisinvestointi kustannus
K_{ix}	tyyppilaitteiston x investointikustannus
K_{i0}	investoinnin kustannus ajanhetkellä 0

K_n	kassavirta ajanhetkellä *n*
K_v	vaihtoehtoisen tuotantotavan kassavirta
L	induktanssi
n	järjestysluku
P	pätöteho
P_{as}	pätöteho, asennettu
P_H	pätöteho, harmoninen
P_h	pätötehohäviö
P_{hj}	johtohäviöt
P_{hk}	muuntajan kuormitushäviöt
P_{hl}	laitehäviöt
P_{h0}	muuntajan tyhjäkäyntihäviöt
P_{kn}	muuntajan nimelliskuormitushäviö
P_{mit}	pätöteho, mitattu
P_{netto}	pätöteho, liityntäpisteen tehojen summa
P_{0n}	nimellistyhjäkäyntihäviö
P_1	pätöteho, kuormatyyppi 1
P_2	pätöteho, kuormatyyppi 2
$P_{\%}$	pätötehon kuormitustaso
Q	loisteho
Q_C	loisteho, kapasitiivinen
Q_D	loisteho, ottoraja pätötehon kulutustilanteessa
Q_{D1}	loisteho, antoraja pätötehon kulutustilanteessa
Q_{fn}	loisteho, perustaajuinen
Q_G	loisteho, ottoraja pätötehon tuotantotilanteessa
Q_{G1}	loisteho, antoraja pätötehon tuotantotilanteessa
Q_{h}	loistehohäviö
Q_L	loisteho, induktiivinen
Q_1	loisteho, kuormatyyppi 1
Q_2	loisteho, kuormatyyppi 2
R	resistanssi
r	korkokanta
S	näennäisteho

S_{fn}	näennäisteho, perustaajuinen
S_k	oikosulkuteho
S_n	muuntajan nimellisteho
S_t	investoinnin nettotuotto
t	aika
t_k	huipunkäyttöaika
U	jännite
U_a	jännitealenema
U_{fn}	perustaajuinen jännite
U_{hn}	yliaaltokohtainen jännite
U_n	nimellisjännite
U_0	jännitteen tasakomponentti
W_{otto}	liityntäpisteen ottoenergia vuodessa
X	reaktanssi
X_C	kapasitiivinen reaktanssi
X_{hn}	yliaaltokohtainen reaktanssi
X_L	induktiivinen reaktanssi
a_h	jännitteen vaihekulma taajuudella fh
φ	tehokulma
φ_{kok}	tehokulma, kokonaistehokerroin
φ_1	tehokulma, kuormatyyppi 1
η	hyötysuhde

1 JOHDANTO

Metsäteollisuuden laitoksilla tuotannon kannalta yksi keskeisimmistä periaatteista on tehtaan tuotantoon liittyvän tekniikan toimintavarmuus. Nykyaikaisessa metsäteollisuuden laitoksessa tuotantoprosesseja säädetään sähkö- ja automaatiolaitteiden avulla, joita ohjataan kootusti prosessinohjausjärjestelmällä. Laitokset pitävät sisällään suuren määrän erilaisia sähkö- ja automaatiolaitteita, joissa käytettävän sähkön laatu on tärkeässä osassa koko tehtaan toimintavarmuuden osalta. Heikko sähkön tekninen laatu voi pahimmillaan aiheuttaa laiterikkoja, jotka keskeyttävät tuotannon. Tuotannon keskeytymisestä koituu taloudellisia haittoja tuotannon menetyksen ja rikkoutuneiden laitteiden korjaamisen takia. Heikko sähkön tekninen laatu näyttäytyy yleisimmin jännitepoikkeamina perustaajuiseen jännitteeseen nähden. Sähkön laatuun pystytään vaikuttamaan erilaisilla loistehon kompensointilaitteistoilla.

Sähköverkossa tarvitaan työtä tekevän pätötehon lisäksi loistehoa. Loisteho on välttämätön osa sähköverkkoa, sillä se mahdollistaa erilaisten sähkölaitteiden toimivuuteen tarvittavan magneettikentän syntymisen. Loistehon määrää verkossa pyritään kuitenkin optimoimaan, sillä se aiheuttaa ylimääräistä loisvirrasta johtuvaa kuormitusta sähköverkossa. Kantaverkkoyhtiön toimesta ohjataan kompensoimaan loistehoa paikallisesti laitoksessa loissähköikkunan ja sen ylityksiin liittyvien maksujen avulla. Ylimääräinen loisvirta kasvattaa sähköverkon häviöitä, jotka ilmenevät lämpenemistä laitteissa ja kaapeleissa. Lisäksi loisvirrasta johtuva kuorma on huomioitava sähköverkon mitoituksessa. Ylimääräinen loisteho edesauttaa myös heikon sähkön laadun ilmiöiden, kuten yliaaltojen voimistumista.

Yliaallot aiheutuvat virran ja jännitteen säröytymisestä ja ne luokitellaan harmonisiin ja epäharmonisiin yliaaltoihin. Säröytyminen tarkoittaa jännitteen ja virran poikkeavuutta normaalista 50 Hz sinimuotoisesta aallosta. Tyypillisimpiä säröytymisen merkkejä ovat pulssimaiset yli- ja alijännitteet. Säröytymistä aiheuttaa tyypillisesti puolijohteita sisältävät elektroniikan komponentit, niiden nopean johtavuustilan muutoskyvykkyyden takia. Muita oleellisia säröytymistä aiheuttavia tekijöitä ovat moottorit sekä muuntajat magneettipiiriensä toimintaperiaatteen takia. Nykyaikaisen puolijohteita hyödyntävän tekniikan lisääntyessä sähköverkossa, on yliaaltojen hallinta korostunut osana loistehon kompensoinnin toteutusta.

1.1 Työn taustat ja tavoitteet

Metsäteollisuuden laitoksilla loistehon kompensointia on toteutettu erilaisilla periaatteilla vuosien saatossa. Yliaaltoja muodostavan kuorman lisääntyessä verkossa, jotkin näistä periaatteista eivät enää sovellu hyvin käytettäväksi nykyaikaisessa metsäteollisuuden sähköverkossa. Aikaisempien periaatteiden osalta voidaan muodostaa päähypoteesiksi tälle työlle ”loistehon kompensointi on kannattavaa toteuttaa keskusten yhteydessä pienjännitteellä, mahdollisimman lähellä kulutusta”. Loistehon kompensoinnin ja yliaaltosuodatukseen liittyvien investointien suhteen onkin oleellista tarkastella, kuinka ne olisivat teknistaloudelliset seikat huomioiden kannattavinta toteuttaa. Teknistaloudellisuuden osalta huomioon otettavia asioita ovat vaikutukset sähkön laatuun sekä laitteiston elinkaarikustannukset.

Tässä diplomityössä selvitetään kompensoinnin ja yliaaltosuodatuksen optimaaliset toteutustavat metsäteollisuuden laitoksessa. Työssä esitellään aluksi metsäteollisuuden laitoksen sähkönjakelun erityispiirteitä, jonka jälkeen tarkastellaan sähkön laatuun liittyviä seikkoja sille asetettujen vaatimusten ja teknisen määrittelyn osalta. Tämän jälkeen työssä määritetään metsäteollisuuden ympäristöön soveltuvat kompensoinnin ja yliaaltosuodatuksen tyyppilaitteistot. Tyyppilaitteistoille määritetään investointi ja käytönaikaisista kustannuksista koostuvat elinkaarikustannukset. Selvitys tehdään metsäteollisuuden olemassa olevan laitoksen päämuuntajapiirin avulla, jonka alainen loistehon tarve kompensoidaan määritetyillä tyyppilaitteistoilla. Päämuuntajapiirin kompensoinnin toteutusta tarkastellaan kolmella kuormitustasolla erilaisilla pien- ja keskijännitteen välillä jakautuvilla sijoitteluperiaatteilla. Eri sijoitteluperiaatteiden mukaisten investointien kannattavuutta tarkastellaan toisiinsa verraten nettonykyarvomenetelmän avulla. Vastaava tarkastelu suoritetaan myös eri kokoiselle päämuuntajalle kuormitusvaikutusten tarkastelun näkökulmasta.

Työssä vastataan tarkastelun avulla kysymykseen, kuinka loistehon hallintaa tulisi kehittää olemassa olevassa metsäteollisuuden laitoksessa. Työssä vastataan myös kysymykseen, minkälaista tekniikkaa on kannattavaa käyttää sähkön laadun parantamiseen metsäteollisuuden laitoksissa. Lisäksi työssä vastataan kysymykseen, kuinka loistehon hallinta kannattaa toteuttaa uudessa metsäteollisuuden laitoksessa.

1.2 Työn menetelmät ja rajaukset

Tämän työn ympäristönä toimii olemassa oleva metsäteollisuuden laitos, jonka kahta jakeluverkon päämuuntajaa todellisine kuormituksineen hyödynnetään tarkastelussa. Työ toteutetaan case-tarkasteluna, jossa otetaan huomioon päämuuntajan tasolta katsoen sen alainen sähköverkko. Tarkastelussa ei oteta huomioon muiden päämuuntajalähtöjen vaikutuksia toteutukseen, vaan tarkastelu tehdään yhtä jakeluverkon päämuuntajaa kerrallaan koskien. Lisäksi case-tarkastelun päämuuntajan alaisia olemassa olevia kompensointilaitteistoja ei oteta huomioon tarkastelussa.

Tarkastelussa luodaan laajempi katsaus olemassa olevaan tekniikkaan loistehon hallintaan liittyen, mutta itse case-tarkastelussa keskitytään metsäteollisuuden laitosten tarpeisiin soveltuviin keski- ja pienjännitelaitteistoihin. Tarkasteluun valitut tyyppilaitteistot määritetään kirjallisuuskatsauksen, sekä haastatteluilla kerättyjen käyttökokemusten ja teknisten ominaisuuksien perusteella. Case-tapauskohtaista sähköverkon kokonaisuutta tarkastellaan verkkomallinnusohjelmalla saatavien tietojen avulla. Eri case-tapausten kannattavuutta vertaillaan kymmenen ja 30 vuoden tarkastelujaksoilla, joiden perusteella muodostetaan työn johtopäätökset.

2 METSÄTEOLLISUUDEN TOIMINTAYMPÄRISTÖ

Metsäteollisuudella tarkoitetaan metsävarojen teollista jalostamista erilaisiksi hyödykkeiksi. Alkujaan jalostaminen keskittyi sahatavaran ja paperin tuottamiseen, mutta ajan kuluessa teollissuusala on kehittynyt maailman trendien mukana. Erilaisten sellupohjaisten tuotteiden, kuten esimerkiksi kartonki ja hygieniatuotteiden valmistus ovat olleet vahvasti pinnalla viime vuosina. Metsäteollisuudelle ominaista on puunjalostuksen sivuvirtojen tehokas hyödyntäminen esimerkiksi raaka-aineeksi energiantuotantoon ja kemikaalien valmistukseen. Tällä hetkellä metsäteollisuus on keskeisessä roolissa osana vihreää siirtymää. Markkinoille kehitetään ja tuotetaan erilaisia tuotteita, kuten biopolttoaineita ja biokemikaaleja, joilla korvataan fossiilisia raaka-aineita erilaisissa käyttökohteissa.

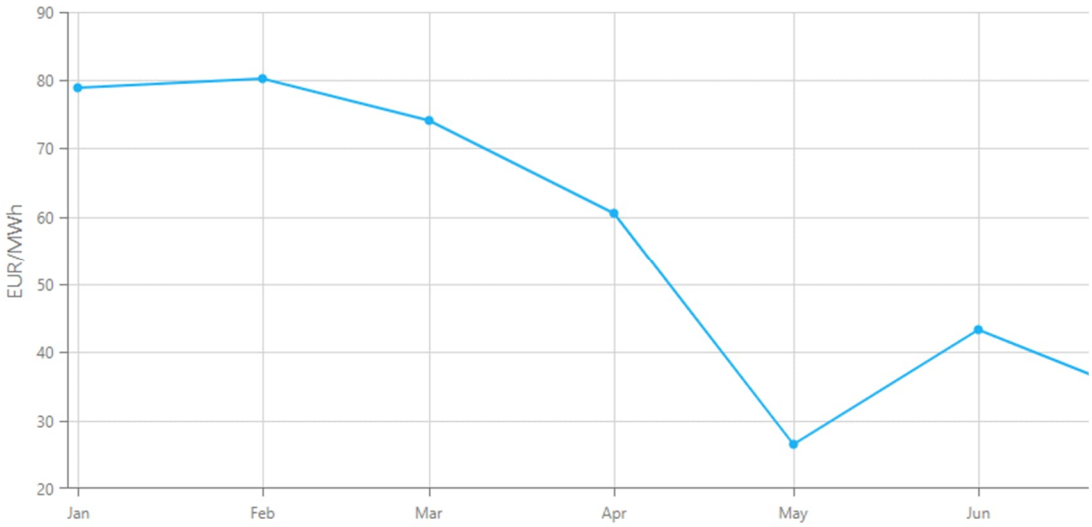
2.1 Metsäteollisuuden tehdasympäristö

Raaka-aineen sivuvirtojen hyödyntämisen takia suuret metsäteollisuuden laitokset ovat suuntautuneet keskittämään toimintojaan integraatteihin. Integraatit rakentuvat yleisimmin sellutehtaan ympärille, ja tyypillisimmin muita tuotettavia jatkojalosteita integraatissa ovat olleet sahatavara, paperi ja kartonki. Integraatti voi pitää sisällään myös energiantuotantoon suunnattuja yksiköitä, kuten lämpövoimalaitos- tai biojalostustoimintaa. Isoimpina hyötyinä integraattien osalta on puu raaka-aineen sekä erilaisten prosessijakeiden, kuten lämmön, höyryn ja kaasujen energiatehokas hyödyntäminen. Metsäteollisuuden tehdasintegraatin sisältöön vaikuttaa vahvasti paikalliset olosuhteet, kuten esimerkiksi Suomessa lämpöenergian tarve talvella.

Metsäteollisuuden tehdasympäristössä on käynnissä murros, jossa entisaikojen vahva paperimarkkina on pienentynyt, ja alan yhtiöt ovat alkaneet panostamaan enenemissä määrin erilaisiin biotuotteisiin. Täysin uudet laitokset suunnitellaan vastaamaan tulevaisuuden tarpeita, jossa pyritään korvaamaan fossiilisista raaka-aineista tehtyjä tuotteita uusiutuvista puupohjaisista materiaaleista tehdyillä tuotteilla. Myös olemassa olevien laitosten toimintoja kehitetään vastaamaan markkinoita, joka on käytännössä näkynyt paperintuotannon supistumisena sekä erilaisten uusien biotuotantoon liittyvien laajennusten rakentamisena.

Biotuotteiden tuottamisen ohella energiatehokkuus ja sen tuotanto on isossa asemassa nykyaikaisissa metsäteollisuuden laitoksissa. Tyypillisesti prosessien yhteydessä käytettävällä höyryllä pyöritetään turbiinia, joka on yhteydessä generaattoriin.

Generaattorien tuottamaa sähköä hyödynnetään laitoksen sisäisesti, ja sen ylituotanto myydään sähkömarkkinoille. Kuvan 2.1 mukainen viimeaikaisten hintojen vaihtelu sähkömarkkinoilla on kannustanut panostamaan energiatehokkuuden parantamiseen.



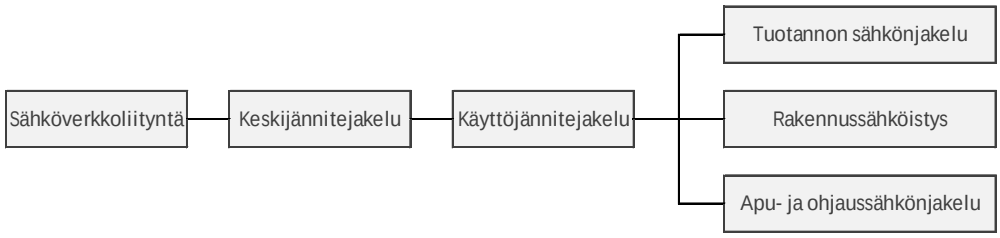
Kuva 2.1. Nord Pool -sähköpörssin sähkön tuntikohtaisen järjestelmähinnan keskiarvo [€/MWh] Suomessa ajalta 01–06/2023.

Metsäteollisuuden laitoksilla hyödynnetään mahdollisimman tehokkaasti omaa tuotantoa, jolloin ylijäämäsähköä jää myytäväksi sähkömarkkinoille. Esimerkiksi Suomen mittakaavassa pelkästään UPM:n sellutehtaiden ylijäämäsähkö riittää kattamaan noin 20 000 sähkölämmitteisen omakotitalon vuosittaisen sähkönkulutuksen (UPM 2022).

2.2 Metsäteollisuuden laitoksen sähkönjakelu

Sähkönjakeluverkon topologian muotoutumiseen metsäteollisuuden laitoksissa vaikuttaa sen käyttötarkoitus, sekä ympäröivän yleisen sähkönverkon infrastruktuuri. Laitosten sähkönjakeluverkko voidaan määritellä suljetuksi jakeluverkoksi. Nykyaikaisissa sähköenergiaa verkkoon tuottavissa laitoksissa tärkeässä asemassa on sähkönjakelun luotettavuus. Sähkönjakelun turvaamisen mahdollisuus vikatilanteissa on onnistuttava sähköverkon varayhteydellä tai omalla tuotannolla. Tyypillisesti laitosten verkkotopologiassa suositaankin rengaskäyttöä erilaisten sähkönjakelutilanteiden hallitsemiseksi (Lakervi & Partanen 2008). Normaalissa käyvän tehtaan tilanteessa laitoksen sähkönjakelun kuormitukset ovat pääsääntöisesti vakaalla tasolla. Kuormitustilanteiden ääripäänä voidaan pitää tilanteita, jossa tuotanto on pysäytetty esimerkiksi huoltopysäytyksen takia. Tällöin kuormitus tippuu matalalle tasolle prosessiin liittyvien laitteiden ollessa pysähdyksissä.

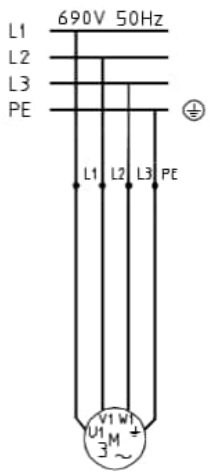
Metsäteollisuuden laitoksen koon mukaan sähkönjakelussa voi esiintyä jännitetasoja eri jänniteportailta. Pienjännitteen (PJ) osalta tyypillisimmin jännitteenä käytetään 400 tai 690 V. Myös harvinaisempaa 500 V jännitettä saatetaan käyttää vanhemmissa laitoksissa. Keskijännitteen (KJ) jännitetasoina yleisesti käytetään 10 ja 20 kV. Muita mahdollisesti käytettäviä KJ-tasoja ovat 1, 3, 6 ja 33 kV. Suurjännitteen (SJ) osalta laitoksen sähkönjakelussa yleisimmin käytetään 110 kV jännitettä. Metsäteollisuuden laitoksen sähkönjakelu voidaan jaotella sähköverkkoliityntään, keskijännitejakeluun ja kulutuskohteiden käyttöjännitejakeluun. Kulutuskohteiden käyttöjännitejakelu jaotellaan tyypillisesti tuotannon sähkönjakeluun, rakennussähköistykseen, sekä apu- ja ohjaussähkönjakeluun. Metsäteollisuuden laitoksen sähkönjakelun jakautuminen on esitetty kuvassa 2.2.



Kuva 2.2. Metsäteollisuuden laitoksen sähkönjakelun jakautuminen (Korpinen 1998).

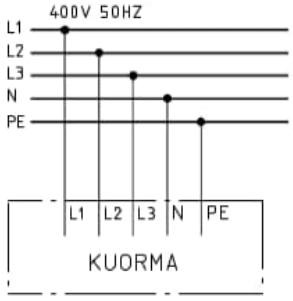
Sähköverkkoliitynnän jännitetaso määräytyy sähkötehon mukaan. Yli 10 MW sähkötehon ylittävissä laitoksissa käytetään yleisimmin 110 kV verkkoliityntää. Pienemmät laitokset liittyvät yleiseen sähköverkkoon KJ puolella, yleisimmin 20 kV jännitetasolla. Suuremman jännitetason käytön etuna on isojenkin sähkötehojen siirto pienemmillä kuormitusvirroilla. Keskijännitejakelulla tyypillisesti toteutetaan sähkönjakelu laitoksen eri osastojen välillä, ja sen osalta voi olla käytössä yksi tai useampi eri jännitetaso. Lisäksi sitä voidaan käyttää suurten moottoreiden käyttöjännitteenä, kuten esimerkiksi 10 kV jännitettä tarvitaan yli 1 MW moottorien käyttöön. (Korpinen 1998)

Pääsääntöinen kulutuskohteiden käyttöjännitejakelu metsäteollisuuden laitoksissa tapahtuu PJ-tasolla, jossa suurin kulutus tapahtuu tuotantoprosessin sähkönjakeluun liittyen. Tuotantoprosessin sähkönjakelu koostuu suurimmaksi osaksi erilaisista moottoreista. Tyypillisesti PJ-moottoreilla käytetään 690 V jännitettä, ja niiden jännitejakelu on toteutettu kuvassa 2.3 esitetyn yhteistä nolla- ja suojamaajohdinta käyttävällä (TN-C) periaatteella.



Kuva 2.3. Periaatekuva kolmivaiheisen moottorikäytön jännitejakelusta TN-C-periaatteella toteutettuna.

Rakennussähköistys pitää sisällään mm. laitoksen valaistus, ilmanvaihto ja huoltosähköistykseen liittyviä kohteita. Rakennussähköistyksen jännitteenä käytetään yleisesti 400 V, ja sen jännitejakelu on toteutettu kuvassa 2.4 esitetyllä erilliset nolla- ja suojamaajohtimet sisältävällä (TN-S) periaatteella.



Kuva 2.4. Periaatekuva kolmivaiheisen rakennussähköistys kuorman jännitejakelusta TN-S-periaatteella.

Apu- ja ohjaussähkönjakelu pitää sisällään erilaiset automaatio- ja ohjausjärjestelmiin liittyvät sähkönsyötöt, joiden syöttö tyypillisesti otetaan rakennussähkökeskuksista. Syötöt voivat olla varmennettuja (UPS) kriittisyytensä mukaan. (Korpinen 1998)

2.2.1 Laitteistot ja laitteet

Metsäteollisuuden laitos liittyy yleiseen sähköverkkoon kytkinlaitteistojen kautta. Kytkinlaitteisto voi olla tyypiltään ilmaeristeinen ulkokytkinlaitos tai kuvassa 2.5 esitetty kompaktimpi kaasueristeinen (GIS) katkaisija.

Kuva 2.5. Suurjännite GIS-katkaisija.

GIS-kojeiston katkaisijan kytkentätilanteen eristys voi olla toteutettu esimerkiksi laajalti käytössä olevalla SF6-kaasulla (Lakervi & Partanen 2008). Kytkinlaitteistoissa kytkennöissä käytetään katkaisijoita ja erottimia. Lisäksi kytkinlaitteistot pitävät tyypillisesti sisällään erilaisia mittaukseen ja ohjaukseen liittyviä mittamuuntajia, releitä ja varokkeita. Kytkinlaitteiston kokoojakiskostolta sähkönjakelu etenee päämuuntajalle. Päämuuntajan toisiosta eteenpäin sähkönjakelu etenee jakelumuuntajien kautta lopulta PJ-keskuksille.

Suositeltuna kulutuskohteiden käyttöjännitteenjakelun perusperiaatteena teollisuudessa on eritellä tuotannon sähkönjakelu- ja rakennussähköistyskeskukset eri jakelumuuntajien taakse. Tällä jaottelulla pyritään rajaamaan varsinkin moottorien taajuusmuuttajakäytöistä johtuvia sähkön laatua heikentäviä ilmiöitä kulkeutumasta muuntopiirien ylitse (Korpinen 1998). Keskussuunnittelussa otetaan huomioon prosessissa tarvittavien laitteiden tarpeet, ja keskuslähdöt kalustetaan halutun ohjaustavan mukaisesti. Prosessisähkökeskusten lähdöt voidaankin jakaa karkeasti ohjaustavan mukaisesti suorakäyttöisiin lähtöihin (DOL),

älykkäisiin väyläohjattuihin lähtöihin (IMC) sekä moottorin nopeuden säätöön käytettäviin taajuusmuuttajalähtöihin (VSD). Lisäksi moottoriohjauksia on mahdollista toteuttaa erilaisten käynnistimien, kuten pehmokäynnistimen avulla. Prosessisähkökeskuksen ohjaukset voidaan liittää tehdasautomaatiojärjestelmään mm. perinteisen I/O-johdotusten tai erilaisten kenttäväylien, kuten Profinetin kautta. Moottorien lisäksi metsäteollisuuden laitoksissa esiintyy paljon erilaisia automaatiokenttälaitteita, kuten venttiilejä ja erilaisia mittausinstrumentteja. Lisäksi putkistoihin ja prosessilaitteisiin saattaa liittyä erilaisia saattolämmityksiä.

2.2.2 Toimintavarmuus ja turvallisuus

Metsäteollisuuden laitoksien sähkönjakelun toteutuksessa tärkeimpinä tekijöinä korostuu toimintavarmuus ja turvallisuus. Mahdollisista tuotannon vikakeskeytyksistä aiheutuu suoraan taloudellisia menetyksiä, joita ovat itse myytävän tuotannon menetys sekä mahdolliset laitteiden uusimisesta ja korjaustöistä johtuvat kustannukset. Turvallisuuden suhteen oleellisena asiana metsäteollisuuden sähkönjakelussa on huomioitava vikakeskeytysten laajempi vaikutus mm. kemikaaliturvallisuuteen liittyen. Pahimmillaan prosessit saattavat pysähtyä kohtaan, jossa putkistoihin jää paineistettua, ihmiselle vaarallista ainetta. Eräs tyypillisimmistä vikakeskeytysten aiheuttajista on sähkölaitteen, kuten taajuusmuuttajan rikkoutuminen (ABB 2000).

Sähkölaitteiston turvallisuuteen liittyen korostuu paloturvallisuus. Sähkölaitteet ja kaapelit on mitoitettava asianmukaisesti vallitsevaan ympäristöön, jotta mikään sähköjärjestelmän osa ei ylikuormittuisi ja toimisi syttymislähteenä tulipaloille. Metsäteollisuudessa käytetään tyypillisesti erilaisia kunnonvalvonta- ja ohjausjärjestelmiä, kuten SCADA tai DCS, joilla seurataan sähkölaitteiston tilaa. Tyypillisesti sähkölaitteistoille on myös laadittu kunnossapito-ohjelma, jonka mukaisesti tehdään tarkastuksia sekä ennakkohuoltoja. Metsäteollisuuden tehtailla saattaa esiintyä korkeita lämpötiloja sekä räjähdysvaaralliseksi luokiteltuja ATEX-tiloja. Nämä erityispiirteet on otettava myös huomioon sähkölaitteiden ja kaapelien kuormituksen, ulkoisen kestävyyden sekä suojausluokitusten suhteen.

2.3 Case-ympäristö: UPM Kaukas

Tämän työn case-tarkastelun ympäristönä toimii UPM Kaukaan tehdasintegraatti Lappeenrannassa. UPM Kaukas on monipuolinen biometsätalouden tehdasintegraatti, joka

nykyisellään pitää sisällään sellutehtaan, biojalostamon, paperitehtaan, sahan, metsäpalvelutoimiston sekä Pohjois-Euroopan tutkimuskeskuksen. Lisäksi tehtaan yhteydessä toimii Kaukaan Voiman lämmön ja sähkön yhteistuotantolaitos. Toiminta tehdasalueella on alkanut lankarullien tuotannolla 1892, josta toiminta on kehittynyt ja kasvanut kohti tämänhetkistä laajuutta. Ensimmäinen sellutehdas aloitti tuotannon 1897, saha 1958 ja paperitehdas 1975. Viimeisimmät isot laajennukset tehdasalueella ovat olleet vuonna 2008 aloittanut Kaukaan Voima sekä vuonna 2015 aloittanut biopolttoaineita valmistava biojalostamo. Näiden lisäksi tehdasalueella on toiminut vaneritehdas vuosina 1926–2010. UPM Kaukaan tehdasintegraatissa hyödynnetään eri tehdasalueen osien raaka-aineen sivuvirrat kuvan 2.6 mukaisesti.

Kuva 2.6. Periaatekuva UPM Kaukaalla käytettävän puu raaka-aineen sivuvirtojen hyödyntämisestä sekä valmistettavasta tuotannosta tehdasintegraatin eri osissa (UPM 2017).

Tehdasintegraatti valmistaa nykyisellään havu- ja koivusellua, uusiutuvaa dieseliä ja naftaa, aikakausilehtipaperia, sertifioitua mäntysahatavaraa sekä energiaa. Puu raaka-aine hyödynnetään kokonaisvaltaisesti esimerkiksi hakettamalla sahalla syntyvät myyntiin kelpaamattomat pintalaudat, jolloin ne voidaan hyödyntää raaka-aineeksi sellun valmistukseen (UPM 2017).

Sähkönjakelun osalta UPM Kaukaan tehdasintegraatti muodostaa oman suljetun sähkönjakeluverkkonsa, jonka sähköverkkoliityntä on toteutettu 110 kV jännitetasolla. Luukkalan sähköasemalla sijaitsevasta sähköverkkoliityntäpisteestä 110 kV jännitettä tehdasintegraattiin jaetaan kahta ilmalinjaa pitkin, jotka kytkeytyvät kahteen eri SJ-kytkinlaitokseen. Kahden eri syötön perässä olevat kytkinlaitokset mahdollistavat erilaiset sähkönjakelun kytkentätilanteet esimerkiksi katkaisijoiden huoltojen ajaksi.

Kytkinlaitteistoista toinen on SF6-kaasueristeinen GIS-laitteisto ja toinen avokytkinlaitteisto. Kytkinlaitokset ovat yhdistetty myös toisiinsa, joka mahdollistaa tarvittaessa tehdasintegraatin sähköverkon saarekekäytön. Saarekekäytössä tehdasintegraatin on mahdollista toimia oman energiantuotannon perässä irrallaan yleisestä sähköverkosta. UPM Kaukaan tehdasintegraatin sähköverkkoon on kytkettynä kaksi tahtigeneraattoria, jotka ovat sähkön tuotantokapasiteetiltaan yhteensä 238 MVA. Generaattorit on yhdistetty 110 kV kytkinlaitteistoon omien muuntajiensa kautta, ja niitä on mahdollista hyödyntää myös loistehon tuotannossa. UPM Kaukaalla käytettävät jännitetasot ja niiden käyttötarkoitus ovat esitetty taulukossa 2.1.

Taulukko 2.1. UPM Kaukaan tehdasintegraatin sähkönjakelussa käytettävät jännitetasot ja pääsääntöinen käyttötarkoitus.

Jännitetaso	U (kV)	Sähköverkon osuus	Mistä -> mihin
Suurjännite (SJ)	110	Sähköverkkoliityntä	Tasepiste -> päämuuntajat
Keskijännite (KJ)	3 10	Keskijännitejakelu	Päämuuntajat -> jakelumuuntajat
Pienjännite (PJ)	0,4 0,5 0,69	Käyttöjännitejakelu	Jakelumuuntajat -> sähkölaitteet

SJ-kytkinlaitteistot syöttävät päämuuntajia, jotka muuntavat jännitteen 10 kV jännitteelle. Tehdasintegraatin päämuuntajat ovat kooltaan 20–63 MVA, ja niitä on yhteensä yhdeksän kappaletta. Päämuuntajat ovat sijoitettu tehdasosastoittain, ja ne syöttävät omia 10 kV KJ-kiskostojaan. KJ-kiskostoista sähkönjakelu etenee jakelumuuntajille, jotka muuntavat jännitteen Kaukaalla käytettäville 400 V, 500 V ja 690 V jännitteille. Jakelumuuntaja kokoina käytössä on 1,6, 2 ja 3,15 MVA, jotka syöttävät PJ-keskuksia. Kaukaalla on

käytössä myös 3 kV jännitettä KJ-tasolla. Lisäksi KJ-kiskostoihin on kytkettynä laitoksen suurimmat moottorikäytöt, sekä kiinteät loistehon kompensointiyksiköt.

UPM Kaukaan tuotannon sähkönjakelusta isoin osa kuormituksesta muodostuu DOL-moottorikäytöistä, joiden ohjaus tapahtuu on/off -periaatteella tuotannon prosessien mukaisesti. Lisäksi laitoksella on käytössä VSD-moottorikäyttöjä, joilla mahdollistetaan prosessin tarkempi ohjaaminen portaattoman säädön ansiosta. Tuotannon sähkönjakelu PJ-tasolla on pääsääntöisesti toteutettu omilla keskuksillaan erillään muusta sähköistyksestä. Erilaisia moottorikäyttötyyppejä syötetään pääosin samoista keskuksista, mutta niitä on osittain toteutettu myös eriteltynä omiin keskuksiinsa.

3 SÄHKÖN LAATU

Käsitteenä sähkön laatu pitää sisällään sähkön tekniset ominaisuudet, sen toimintavarmuuden sekä toimitukseen liittyvän laadukkuuden. Yleisellä tasolla sähkön laadusta on määritelty tarkemmin Suomen standardisoimisliiton (SFS) laatustandardissa SFS-EN-50160:2022, joka käsittelee eri jännitetasojen osalta mm. taajuuteen, jännitteeseen ja yliaaltoihin liittyviä ilmiöitä. Standardi määrittelee rajat-arvot erilaisille sähkön suureille, joiden sisällä sähkön laadun tulisi pysyä jatkuvasti. Lakiteknisesti toimitetun sähkön laatuun ja siihen vaikuttaviin standardeihin viitataan sähkömarkkinalaissa (Finlex 2023).

Yleiseen sähköverkkoon SJ-tasolla liittyvän laitoksen sähkön laatua koskevat asetukset määritellään kantaverkkoyhtiö Fingridin toimesta. Fingrid on asettanut tyyppikohtaiset järjestelmätekniset vaatimukset erilaisille yleiseen sähköjärjestelmään kytketyille laitoksille. Liittyjän ja Fingridin välisissä sopimuksissa sovelletaan yleisiä liittymisehtoja, jotka määrittelevät liittämistavan ja laitteistolle asetetut toimintavaatimukset. Yleisiä liittymisehtoja täydennetään sähkölaitteistotyyppikohtaisilla järjestelmävaatimuksilla, jotka on määritelty käyttötarkoituksen perusteella. Tyyppikohtaiset järjestelmätekniset vaatimukset on määritelty kulutus- ja jakeluverkoille (KJV), voimalaitoksille (VJV), sähkövarastoille (SJV) sekä SJ-tasasähköliitynnöille (HVDC). (Fingrid 2021b)

Fingrid ja liittyjä solmivat kaksi erillistä sopimusta, liittymissopimuksen ja kantaverkkosopimuksen. Liittymissopimuksessa määritellään velvollisuudet, vastuut ja oikeudet liityntää koskien. Kantaverkkosopimuksessa määritellään toiminta, sekä rajat liittymispisteen sähkösiirtoon ja loistehohallintaan liittyen. Liittyjä ja Fingrid ovat vastuussa siitä, että yleiseen sähköverkkoon liittyvä sähkölaitteisto täyttää voimassa olevat lait, asetukset, standardit ja viranomaismääräykset. Osapuolet määrittelevät keskinäisissä sopimuksissaan tarkemmin, mitä tyyppikohtaisia järjestelmäteknisiä vaatimuksia kyseisen sähkölaitteiston osalta miltäkin osin sovelletaan.

Metsäteollisuuden laitoksiin, joilla on myös omaa sähköntuotantoa, sovelletaan tuotannon osalta Fingridin määrittämiä voimalaitosten järjestelmäteknisiä vaatimuksia (VJV). Vaatimuksilla varmistetaan voimalaitoksen stabiili yhteistoiminta osana yleistä sähköverkkoa erilaisissa käyttö- ja vikatilanteissa. Vaatimuksissa voimalaitokset on

määritelty tyyppiluokkiin liittymistehonsa ja jännitetasonsa perusteella. Voimalaitosten järjestelmäteknisten vaatimusten tyyppiluokitus on esitetty taulukossa 3.1. (Fingrid 2018)

Taulukko 3.1. Voimalaitosten järjestelmäteknisten vaatimusten tyyppiluokitus (Fingrid 2018).

Tyyppi-luokka	Liittymispisteen jännitetaso	Ehto	Voimalaitoksen mitoitusteho P_{max}
Tyyppi A	Liittymispisteen jännitetaso on alle 110 kV[1]	ja (*)	Voimalaitoksen mitoitusteho on vähintään 0,8 kW mutta alle 1 MW. (0,8 kW ≤ P_{max} <1 MW)
Tyyppi B	Liittymispisteen jännitetaso on alle 110 kV[1]	ja (*)	Voimalaitoksen mitoitusteho on vähintään 1 MW mutta alle 10 MW. (1 MW ≤ P_{max} < 10 MW)
Tyyppi C	Liittymispisteen jännitetaso on alle 110 kV	ja (*)	Voimalaitoksen mitoitusteho on vähintään 10 MW mutta alle 30 MW. (10 MW ≤ P_{max} < 30 MW)
Tyyppi D	Liittymispisteen jännitetaso on vähintään 110 kV	tai (+)	Voimalaitoksen mitoitusteho on vähintään 30 MW. (P_{max} ≥ 30 MW)

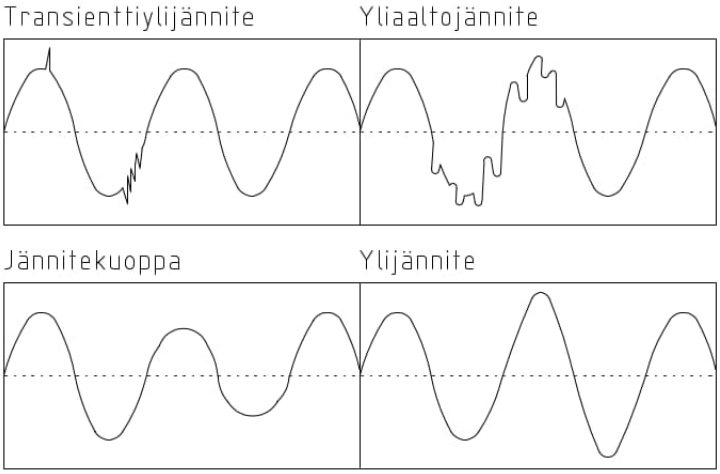
Tässä työssä tarkasteltavan UPM Kaukaan tehdasintegraatti pitää sisällään kaksi erillistä generaattoria, joiden tuotanto on netotettu samaan yleisen sähköverkon liittymispisteeseen (Kauria 2019). UPM Kaukaan voimalaitokset luokitellaan D-tyyppisiksi. D-tyyppiselle voimalaitokselle asetetut vaatimukset velvoittavat mm. loistehokapasiteetin osalta 50 % varautumista yleisen sähköverkon loistehotasapainon tukemiseen.

Vaikkakin suoraan SJ-verkkoon liittyneen suljetussa jakeluverkossa toimivan sähkölaitteiston vaikutusta yleiseen sähköverkkoon tarkastellaan liittymispisteessä, on sen sisäiseltä järjestelmältään myös vastattava voimassa olevia määräyksiä ja standardeja. Metsäteollisuuden laitoksilla joissa sähkönjakelun toimintavarmuus on erityisen tärkeää, nämä standardeissa eri jännitetasoille määritetyt raja-arvot toimivat hyvänä lähtökohtana arvioidessa sähkön laatua eri kohdissa laitoksen sähköverkkoa. Liittymispistettä alemmilla jännitetasoilla tehdyllä sähkön laadun hallinnalla pystytään vaikuttamaan paikallisesti erilaisten sähköteknisten ilmiöiden esiintyvyyteen. Paikallisesti tehdyllä sähkön laadun hallinnalla voidaan estää esimerkiksi yliaaltojen kulkeutumista sähköverkon muihin osiin sekä liittymispisteen kautta kohti yleistä sähköverkkoa.

Standardin SFS-EN 50160:2022 mukaisesti sähköverkon taajuuden on pysyttävä 99,5 % vuodesta ±1 % ja jatkuvasti vähintään +4 - (-6) % sisällä 50 Hz nimellistaajuudesta. Erillisverkkojen, esimerkiksi joidenkin saarien osalta sallitaan 95 % ajalla ±2 % sekä 100 % ajalla ±15 %. Vastaavat määritelmät taajuuden suhteen pätevät kaikilla jännitetasoilla.

Jännitteiden osalta sähkön laatua tarkastellaan jännitemuutoksien, välkynnän, epäsymmetrian, jännitekuoppien, yliaaltojen sekä transienttiylijännitteen osalta. Jännitemuutosten osalta PJ- ja KJ-verkoissa sallitaan maksimissaan ±10 % vaihtelu sovitusta nimellisjännitetasosta. SJ-verkkojen jännitemuutoksille ei ole asetettu vastaavia arvoja. Jännitemuutosten yhteydessä esiintyviä nopeita ilmiöitä voidaan tarkastella ns. välkynnän häiritsevyysindeksin kautta, joka pohjautuu kansainvälinen sähköalan standardointiorganisaation (IEC) 61000–4-15-standardin mukaiseen valaistuksen välkynnän häiritsevyyden arviointiin. Jännitteen epäsymmetrian arvioinnissa jännitteen perustaajuiselle vastakomponentille on 95 % ajalle asetettu 2 % raja sallitun poikkeaman suhteen kaikilla jännitetasoilla. (SFS-EN 2022)

Jännitekuoppien ja ylijännitteiden arviointiin sovelletaan standardia EN 61000-4-30. Kuvassa 3.1 esitetään tyypillisimmät sähkön laadun jänniteilmiöiden aaltomuodot.



Kuva 3.1. Sähkön laadun arviointiin liittyvien jänniteilmiöiden aaltomuodot (SFS-EN 2022).

Jännitekuoppia aiheuttavat pääsääntöisesti sähköverkossa tapahtuvat viat, ja ne ilmenevät tilanteissa, jolloin jännitteenalenema on 90 % tai alle vertailujännitteestä. Ylijännitteet puolestaan ovat 110 % tai yli vertailujännitteestä, ja ne aiheutuvat kuormien erotuksesta ja kytkentätilanteista. Molemmat näistä ilmiöistä luokitellaan tilapäisiksi ilmiöiksi. Verkon transienttiylijännitteet johtuvat tyypillisesti salamoinnista tai kytkentätilanteiden muutoksista, jolloin verkon stabiilisuus häiriintyy indusoituvan ulkoisen jännitteen vuoksi. Yliaaltojännitteitä käsitellään yksityiskohtaisemmin tässä työssä kohdassa 3.3. Standardi SFS-EN 50160:2022 ottaa esille myös verkon tiedonsiirtojännitettä ja siihen liittyvää taajuutta koskevia kohtia. (SFS-EN 2022)

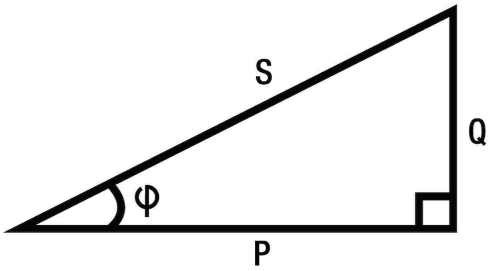
Metsäteollisuuden laitoksissa tuotannon sähkönjakelun toimintavarmuuden ollessa primääriasia, on sähkön laatua oleellista seurata systemaattisesti. Säännöllisellä seurannalla ja panostuksella voidaan vaikuttaa hyvissä ajoin mahdollisten häiriöilmiöiden vahvistumiseen. Heikko sähkön laatu voi ilmetä käytännön tasolla esimerkiksi uusien lisättyjen sähkölaitteistojen toimintahäiriöinä, jotka johtuvat olemassa olleen verkon häiriötason vahvistumisesta. Toimintahäiriö voi olla esimerkiksi katkaisijan laukeaminen rajusta jännitekuopasta johtuvan ylikuormitus tilanteen takia. Sähkölaitteiden rikkoutumisen tutkimisen osalta on suositeltavaa tarkastella myös siihen kytketyn sähkön laatua. Seurannan tarve on vain kasvamassa, sillä tulevaisuudessa tehoelektroniikkaa hyödyntävien sähkölaitteiden määrä vain lisääntyy sähköverkossa. (ABB 2000)

3.1 Sähköteho ja kuormitustaso

Sähköteho voidaan jakaa kolmeen pääsuureeseen, joita ovat näennäis- *S*, pätö- *P* ja loisteho *Q*. Näennäisteho koostuu kulutuskohteessa työtä tekevästä pätötehosta, sekä kuorman ja sähköverkon välillä värähtelevästä loistehosta, joka ei ole hyödyksi kulutuskohteessa. Sähkötehon eri osien riippuvuus toisiinsa voidaan ilmaista yhtälöllä 3.1.

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2} \tag{3.1}$$

Loisteho on kuitenkin välttämätön osa sähköverkkoa, sillä se mahdollistaa kolmivaihejärjestelmän vaihesiirtoon tarvittavan magneettikentän. Magneettikenttää tarvitaan mm. oikosulkumoottorien toimintaan. Loistehon osuutta voidaan tarkastella kuvan 3.2 mukaisesti tehokulman (φ) kautta, joka ilmaisee perustaajuisen DPF-tehokertoimen cos(φ) pätötehon ja näennäistehon välisenä kulmana. (Eronen et. Al. 2018)

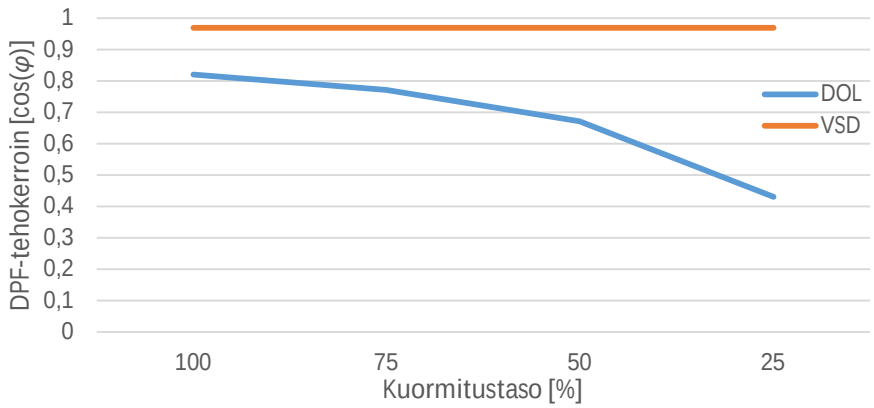


Kuva 3.2. DPF-tehokertoimen cos(φ) suhde sähkötehon eri pääsuureisiin.

DPF-tehokertoimen ollessa arvossa yksi, kuormitus sisältää perustaajuudella näennäistehonsa verran pätötehoa, jolloin loistehoa ei esiinny. DPF-tehokertoimen ollessa <1 näennäisteho koostuu pätö- ja loistehosta. DPF-tehokerroin voidaan määrittää yhtälöllä 3.2. (Eronen et. Al. 2018)

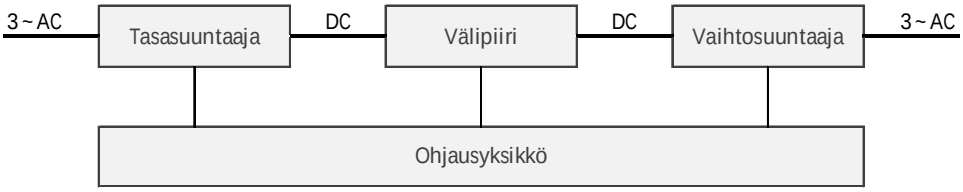
$$\cos(\varphi) = \frac{P}{S} \tag{3.2}$$

Sähkönjakelun kuormituksien näkökulmasta metsäteollisuuden laitoksissa tärkeimmät huomioon otettavat kuormitustyypit ovat DOL- ja VSD-moottorikäytöt. Ne muodostavat suurimman osan kokonaiskuormituksesta esimerkiksi sellutehtaan sähkönjakeluverkossa. DOL-moottorikäyttöjen tehokerroin on riippuvainen käytössä olevien moottorien ominaisuuksista ja kuormitustasosta. DOL-käyttöisten moottorien tehokerroin täydessä kuormituksessa, voi esimerkiksi 18,5 kW moottorilla olla pyömisnopeudesta riippuen 0,75–0,90 (ABB 2000). DPF-tehokerroin heikkenee DOL-moottoreilla kuormitustason tippuessa. DOL- ja VSD-kuormien tehokerrointen muutokset suhteessa kuormitustasoon on esitetty kuvassa 3.3.



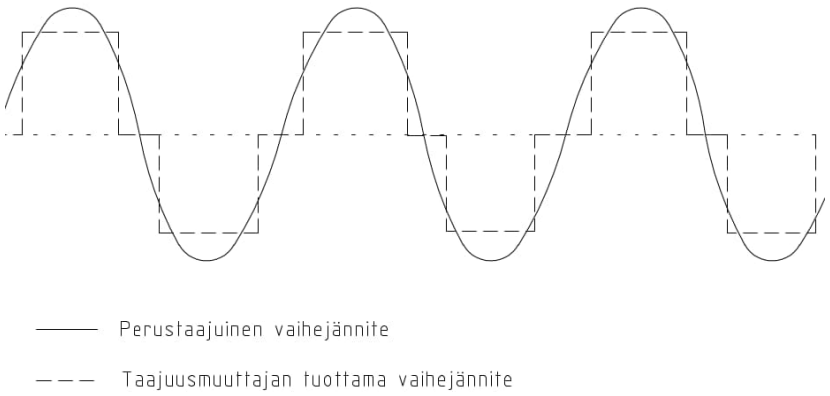
Kuva 3.3. Havainnollistava kuva DOL- ja VSD-moottorikäyttöjen tehokertoimien [cos(φ)] muutoksesta suhteessa moottorin kuormitustasoon [%].

VSD-moottorikäytöissä DPF-tehokerroin säilyy vakiona kuormitustasosta riippumatta. DPF-tehokerroin pystytään säilyttämään hyvällä tasolla taajuusmuuttajien toimintaperiaatteen ansiosta. Taajuusmuuttaja koostuu neljästä osasta, jotka ovat tasasuuntaaja, välipiiri, vaihtosuuntaaja ja ohjausyksikkö. Taajuusmuuttajan toimintaperiaate on esitetty kuvassa 3.4.



Kuva 3.4 Taajuusmuuttajan toimintaperiaatteen lohkokaavio (ABB 2000).

Taajuusmuuttajassa vaihtovirta (AC) otetaan vastaan tasasuuntaajaan, jossa se muuntaa vaihtovirran tasavirraksi (DC). Tasavirta suodatetaan stabiiliksi välipiirissä, josta se syötetään vaihtosuuntaajalle. Vaihtosuuntaaja muodostaa suodatetusta tasavirrasta asetetun taajuuden mukaista vaihtosähköä, jota syötetään taajuusmuuttajan takaiselle kuormitukselle. Taajuusmuuttajan eri lohkojen toimintaa hallitaan ohjausyksiköllä. Taajuusmuuttajat voidaan jakaa kahteen eri tyyppiin välipiirin rakenteensa mukaisesti. Välipiirit voivat olla toteutettu tasoituskuristimella eli välivirtapiirillä tai LC-alipäästösuodattimella eli välijännitepiirillä. Nämä molemmat välipiirin tekniikat soveltuvat moottorikäyttöjen ohjauksiin (ABB 2000). Taajuusmuuttajan kuormalle lähtevää vaihejännitettä on havainnollistettu kuvassa 3.5.



Kuva 3.5. 6-pulssi vaihtosuuntaajaa hyödyntävän taajuusmuuttajan kuormalle lähtevä vaihejännite verrattuna sinimuotoiseen perustaajuiseen jännitteeseen (Hartman 2014).

Taajuusmuuttajan ulostulojännitteen säätö voi perustua virran, jännitteen tai pulssinleveyden modulointiin (PWM) valmistajan käyttämien teknisten ratkaisuiden mukaisesti. Näistä säätötavoista monikäyttöisin on PWM, jonka toiminta perustuu vaihtosuuntaajassa tapahtuvaan pulssisuhteen muutokseen. PWM muodostaa kolmivaiheista ulostulojännitettä johtamalla vaihtosuuntaajasta tasajännitteestä muodostettua vaihejännitettä tietyn mittaisia tasaisia pulsseja kerrallaan kohti kuormitusta. PWM-tekniikan etuna on nopea säädettävyys sekä diodisillan mahdollistamana hyvä hyötysuhde. Tyypillisimmin käytössä on 6-pulssi suuntaajia, mutta on olemassa jo esimerkiksi 12 ja 24-pulssisia suuntaajia taajuusmuuttajakäytössä. Taajuusmuuttajat mahdollistavat paremman tehokertoimen DOL-käyttöihin nähden. (ABB 2000)

Metsäteollisuuden laitoksen sähkönjakeluverkon kokonaistehokerroin (PF) voidaan määritellä eri kuormatyypeille laskettujen kuormitustasosta riippuvaisen tehokertoimien, ja niiden välisen suhteen avulla. Kokonaistehokerroin huomioi myös perustaajuuden ulkopuoliset tehokomponentit, toisin kuin DPF-tehokerroin (Eronen et. Al. 2018). Tehokertoimen määrittelyä varten ensimmäisenä on selvitettävä sen hetkinen kuormitustaso $P_{\%}$, joka voidaan laskea asennetun kuorman P_{as} sekä mitatun pätötehon P_{mit} suhteesta yhtälön 3.3 mukaisesti.

$$P_{\%} = \frac{P_{mit}}{P_{as}} \tag{3.3}$$

Kuormatyyppikohtainen pätötehokuorma P_1 saadaan kertomalla kuormatyyppikohtainen asennettu pätötehokapasiteetti pätötehon kuormitustasolla. Kuormatyyppikohtaisen loistehon Q_1 osuus voidaan määrittää yhtälöllä 3.4 soveltaen yhtälöstä 3.1.

$$Q_1 = \sqrt{\left(\frac{P_1}{\cos(\varphi 1)}\right)^2 - P_1^{\,2}} \tag{3.4}$$

Kuormatyyppikohtainen tehokerroin cos($\varphi 1$) valitaan kuvan 3.3 mukaan, joka on DOL-kuormatyypin osalta muuttuva ja VSD-kuormatyypin osalta vakio. Lopullinen kokonaistehokerroin cos(φkok) saadaan määritettyä laskemalla nämä kuormatyyppien 1 ja 2 sähkötehon osat yhteen yhtälöllä 3.5 soveltaen yhtälöstä 3.2.

$$\cos(\varphi kok) = \frac{(P_1+P_2)}{\sqrt{(P_1+P_2)^2+(Q_1+Q_2)^2}} \tag{3.5}$$

Kokonaistehokerroin kuvaa tarkasteltavan verkon tehokerrointa, jonka muodostumiseen vaikuttavat kuormitustason muutoksista johtuvat kuormatyyppikohtaisten pätö- ja loistehokomponenttien muutokset.

3.2 Loisteho

Loisteho näyttäytyy ylimääräisenä kuormituksena sähköjärjestelmän eri osissa, ja se on otettava huomioon mitoituksessa. Sähkönjärjestelmän mitoituksen perusteena käytetäänkin näennäistehoa *S* sekä kuormitusvirtaa *I*. Kuormitusvirran, jännitteen *U* ja näennäistehon riippuvuus toisiinsa voidaan ilmaista yhtälöllä 3.6. (ABB 2000)

$$I = \frac{S}{\sqrt{3}*U} \tag{3.6}$$

Vastaavasti kuvan 3.2 periaatteella voidaan loistehon ja näennäistehon välinen loistehokerroin sin(φ) esittää yhtälöllä 3.7.

$$\sin(\varphi) = \frac{Q}{S} \tag{3.7}$$

Kuormitusvirta pitää sisällään pätö- I_p ja loisvirtakomponentit I_q. Kuormitusvirran pätö- ja loiskomponenttien jakautumisen tarkastelu voidaan tehdä virralle vastaavaa periaatetta soveltaen kuin sähkötehon osalta yhtälöllä 3.8.

$$I = \sqrt{({I_p}^2 + {I_q}^2)} \tag{3.8}$$

Pätövirta on virran määrä, jonka kulutuskoje käyttää toimintaansa. Loisvirta on kulutuskojeen ja sähköverkon välille verkkoon jäävä virran osa, joka muodostaa käyttöjännitteellä kerrottuna verkon loistehon. Verkon loisteho voidaankin määrittää eri tavoin virran avulla yhtälöillä 3.9, 3.10 ja 3.11. (Korpinen 1997)

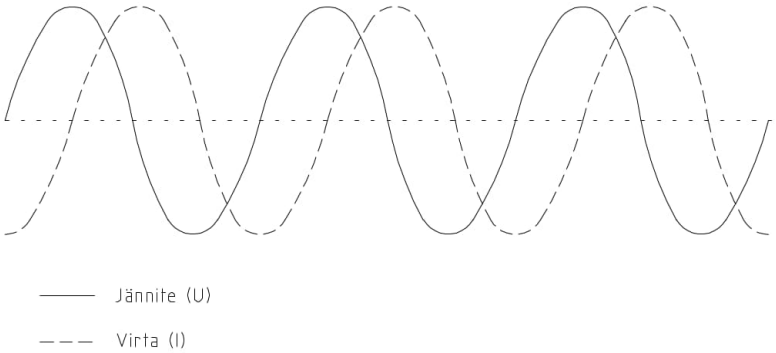
$$Q = U * I * \sin(\varphi) \tag{3.9}$$

$$Q = I^2 * X \tag{3.10}$$

$$Q = U * I_q \tag{3.11}$$

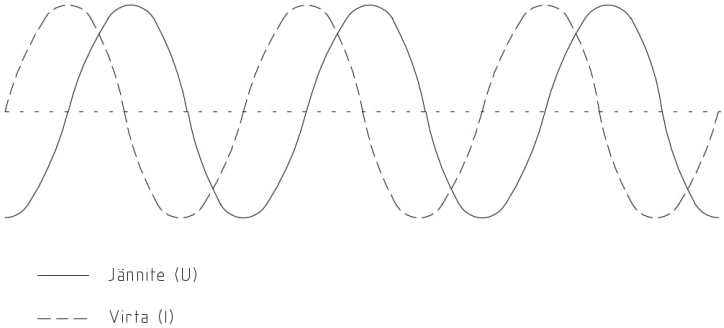
Yhtälön 3.9 osalta määritys tapahtuu jännitteen, kuormitusvirran sekä loistehokertoimen avulla. Yhtälön 3.10 osalta loistehon pystytään määrittämään sähköverkon reaktanssin X sekä kuormitusvirran avulla. Yhtälön 3.11 osalta määritys tapahtuu jännitteen loisvirran avulla.

Loisvirta voidaan jakaa induktiiviseen I_{qL} ja kapasitiiviseen I_{qC} virtakomponenttiin. Virtakomponentit muodostuvat sähköverkon induktiivisen X_L ja kapasitiivisen X_C reaktanssin määrään, ja niihin vaikuttavaan jännitteeseen perustuen. Loisvirtakomponenttien ollessa yhtä suuret, ne kumoavat toisensa. Tällöin verkon virta koostuu pelkästä pätövirrasta, eli toisin sanoen tässä tapauksessa tehokerroin cos(φ) on 1. Sähköverkko voikin olla loisteholtaan joko kapasitiivinen tai induktiivinen riippuen siitä, kumpi loisvirtakomponenteista on hallitsevampi. Induktiivisen loisvirran aiheuttama ilmiö on esitetty kuvassa 3.6.



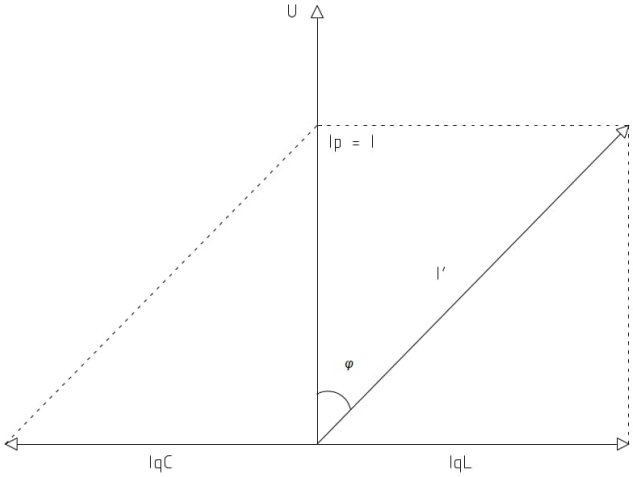
Kuva 3.6. Kuvaaja induktiivista loistehoa sisältävän sähköverkon aiheuttamasta 90 ° jättämästä virran *I* osalta sinimuotoisesta jännitteestä *U*. (Muokattu lähteestä Gorgiev 2022)

Loisvirran ollessa induktiivista, se aiheuttaa kuvan 3.6 mukaisen ilmiön, jossa sähköverkon virta *I* esiintyy 90 ° sinimuotoista jännitettä *U* jäljessä (Korpinen 1997). Kapasitiivisen loisvirran aiheuttama ilmiö on vastaavasti esitetty kuvassa 3.7.



Kuva 3.7. Kuvaaja kapasitiivista loistehoa sisältävän sähköverkon sinimuotoisista käyristä, jossa virta *I* on 90 ° jännitettä *U* edellä. (Muokattu lähteestä Gorgiev 2022)

Vastaavasti kapasitiivista loisvirtaa sisältävässä sähköverkossa virta *I* esiintyy 90 ° edellä sinimuotoista jännitettä *U*. (Korpinen 1997) Tyypillisesti sähköverkko on induktiivinen, jolloin tehokerrointa pyritään parantamaan lisäämällä verkkoon kapasitiivista kuormitusta, kuten kondensaattoriparistoja. Pätö- ja loisvirtakomponenttien vaikutus tehokulmaan (φ) voidaan esittää kuvan 3.8 mukaisesti.



Kuva 3.8. Osoitinpiirros kapasitiivisen I_{qC} ja induktiivisen I_{qL} loisvirtakomponentin vaikutuksesta tehokulmaan (φ) (Aura et. Al. 1993).

Loisvirran komponenttien tarkastelua varten on määritettävä reaktanssin induktiivinen ja kapasitiiviset komponentit. Reaktanssin induktiivinen komponentti määritetään sähköverkon taajuuteen *f* sekä induktanssin *L* avulla yhtälöllä 3.12.

$$X_L = 2 * \pi * f * L \tag{3.12}$$

Reaktanssin kapasitiivinen komponentti sähköverkossa voidaan määrittää samojen komponenttien sekä kapasitanssin *C* avulla yhtälöllä 3.13.

$$X_C = \frac{1}{2*\pi*f*C} \tag{3.13}$$

Induktiivinen loisvirtakomponentti voidaan laskea yhtälöllä 3.12 määritetyn reaktanssin induktiivisen komponentin sekä jännitteen avulla yhtälöllä 3.14.

$$I_{qL} = \frac{U}{X_L} \tag{3.14}$$

Kapasitiivinen loisvirtakomponentti saadaan vastaavasti yhtälöllä 3.13 määritetyn reaktanssin kapasitiivisen komponentin ja jännitteen avulla yhtälöllä 3.15.

$$I_{qC} = \frac{U}{X_C} \tag{3.15}$$

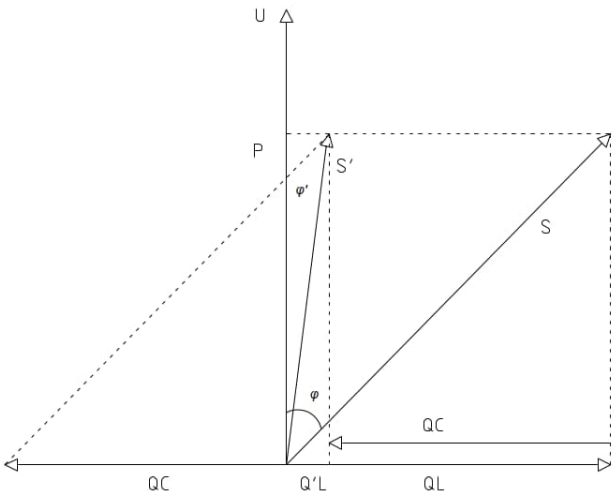
Induktiivisien ja kapasitiivisien komponenttien avulla voidaan tarkastella, onko sähköverkon sisältämä loisteho induktiivista vai kapasitiivista. Loisteho voidaan jakaa vastaaviin komponentteihin kuin loisvirta eli induktiiviseen Q_L ja kapasitiiviseen Q_C loistehoon. Induktiivinen loisteho voidaan määrittää yhtälöllä 3.16.

$$Q_L = U * I_{qL} \tag{3.16}$$

Vastaavasti kapasitiivinen loisteho Q_C voidaan määrittää yhtälöllä 3.17.

$$Q_C = U * I_{qC} \tag{3.17}$$

Loistehon komponentit ovat vastasuuntaiset toisiinsa nähden, ja mitä lähempänä niiden arvot ovat toisiaan, sen pienempi on kokonaisloisteho. Kokonaisloisteho on komponenttiensa summa, joista kapasitiivista loistehoa käsitellään negatiivisella etumerkillä. Induktiivisen ja kapasitiivisen loistehon vaikutusta tehokertoimeen voidaan esittää kuvan 3.9 osoitinpiirroksen avulla.



Kuva 3.9. Tehokertoimen parantaminen kapasitiivisen loistehon lisäämisen avulla (Aura et. Al. 1993).

Kuvassa 3.9 induktiivista loistehoa Q_L kompensoidaan kapasitiivisella loisteholla Q_C, jolloin kokonaisloisteho pienenee arvoon $Q´_L$. Kokonaisloistehon muutos pienentää tehokulmaa arvosta φ arvoon $\varphi´$. Tällöin näennäistehon muuttuessa kulman mukana arvosta S arvoon $S´$, voidaan todeta loistehon osuuden pienentyneen ja yhtälöllä 3.2 määritetyn tehokertoimen parantuneen.

3.2.1 Loissähköikkuna

Suuret metsäteollisuuden laitokset, jotka kuluttavat sekä tuottavat sähköä verkkoon, ovat tasevelvoitettuja kantaverkkoyhtiön suuntaan. Taseselvitys toteutetaan kantaverkkosopimuksessa määritetyssä liityntäpisteessä 15 minuutin pituisen taseselvitysjakson tietoihin perustuen. Taseselvitys pitää sisällään myös loistehon hallintaan liittyvän loissähköikkunan, joka määritetään liityntäpistekohtaisesti. Loissähköikkuna määrittää rajat, joiden sisällä liityntäpisteen ja kantaverkon välillä voidaan siirtää loissähköä ilman erillisiä kustannuksia. Kulutusta ja tuotantoa sisältävän laitoksen liityntäpisteessä sovelletaan tehonvirtauksen suuntaan perustuen kahta eri loistehoikkunaa, joiden rajoja kutsutaan otto- ja antorajoiksi. Loissähköikkunan ottoraja Q_D pätötehon kulutustilanteessa määritetään yhtälöllä 3.18. (Fingrid 2021a)

$$Q_D = 0{,}16 * \frac{W_{otto}}{t_k} + 0{,}1 * \frac{P_{netto}}{0{,}9} \tag{3.18}$$

Yleisesti huipunkäyttöaikana t_k laskennassa käytetään Fingridin ohjeen mukaisesti teollisuudessa 7000 h ja muun kulutuksen osalta 5000 h. Tämän tarkastelun osalta huipunkäyttöaikana tullaan kumminkin käyttämään 8400 h todelliseen käynnissä oloaikaan perustuen. W_{otto} kuvaa liityntäpisteen vuotuista ottoenergiaa sekä P_{netto} laitoksen nettosähkötehoa. Nettosähkötehon laskennassa käytetään voimalaitoksen tuntikohtaisen tuotannon suurinta nettotuotantoa, josta on vähennetty pois omakäyttöenergian osuus. Voimalaitoksen kokonaistehon ollessa alle 1 MW, sen nettosähkötehoksi annetaan 0. Lisäksi yli 450 MW:n nettosähkötehon laitokset eivät enää kasvata loissähköikkunaa. Pätötehon kulutustilanteen loissähköikkunan antoraja Q_{D1} voidaan laskea yhtälöllä 3.19. (Fingrid 2021a)

$$Q_{D1} = -0{,}25 * Q_D \tag{3.19}$$

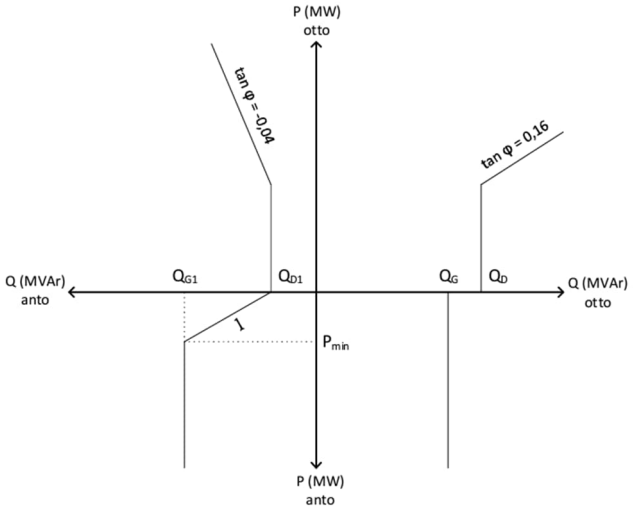
Kulutustilanteen loissähköikkunan antorajan määrittäminen voidaan tehdä vasta kun on määritetty ensin sen ottoraja yhtälöllä 3.18. Pätötehon tuotannon ajalle määritetään omat rajansa loissähköikkunaan. Loissähköikkunan ottoraja tuotantotilanteessa Q_G saadaan yhtälöllä 3.20.

$$Q_G = 0{,}1 * \frac{P_{netto}}{0{,}9} \tag{3.20}$$

Loissähkön ottorajan määrittämiseen kulutustilanteessa tarvitaan tieto nettosähkötehosta, vastaavasti kuin tuotantotilanteen ottorajaa määriteltäessä. Loissähköikkunan pätötehon tuotannon antoraja Q_{G1} saadaan yhtälöllä 3.21.

$$Q_{G1} = -Q_G \tag{3.21}$$

Loissähkön antoraja kulutustilanteessa Q_{G1} on yhtä suuri, mutta vastakkaismerkkinen kuin ottoraja kulutustilanteessa Q_G. Loissähköikkuna havainnollistetaan tyypillisesti kuvan 3.10 mukaisella kuvaajalla, jossa esitetään edellä lasketut rajat.



Kuva 3.10. Loissähköikkunan kuvaaja pätötehon kulutus- ja tuotantotilanteiden otto- ja antorajoilla (Fingrid 2024).

Kuvassa 3.10 havainnollistetut loissähkörajat tarkastetaan kerran vuodessa kantaverkkoyhtiön toimesta, sekä tarvittaessa useammin liityntäpisteen kulutus ja tuotantotilanteen kapasiteetin muuttuessa. Kantaverkkoyhtiö laskuttaa loissähköikkunan rajojen ylittämisistä kuukauden suurimman ylityksen keskituntitehoon sekä kuukauden ylitysenergiaan perustuen. Yksityiskohtaiset loistehon yksikköhinnat määräytyvät kantaverkkoyhtiön verkkosopimuksen mukaisesti. Mahdollisten poikkeamien, kuten isojen kompensointiparistojen rikkoutumisen yhteydessä kantaverkkoyhtiö voi sallia hetkellisiä poikkeamia loistehoikkunasta. (Fingrid 2021a)

3.2.2 Loistehon kompensointi

Loistehon määrää voidaan hallita kompensoinnilla. Kompensoinnilla saadaan pienennettyä loistehon aiheuttamaa virtarasitusta sähköjärjestelmän eri osissa, joka taas mahdollistaa tehokkaamman sähkötehon hyödyntämisen. Kompensointitarpeen laskennalliseen määrittelyyn tarvitaan tarkat tiedot liityttävän verkon sen hetkisestä pätötehosta, kuormituksen hyötysuhteesta η sekä tehokulmasta tan(φ_1). Lisäksi laskentaa varten on määritettävä kompensoinnilla tavoiteltava uusi tehokulma tan(φ_2). Kompensointitarve voidaan määritellä yhtälöllä 3.22. Tehokulman kerroin määritetään liitteen I taulukon mukaisesti. (ABB 2000)

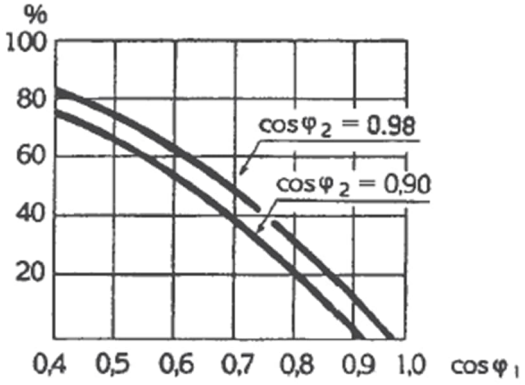
$$Q = \frac{P}{\eta}(\tan(\varphi 1) - \tan(\varphi 2)) \tag{3.22}$$

Tehokulman pienentyessä kompensoinnin toimesta, sen kosinilla kerrottava tehokerroin nousee lähemmäs arvoa 1. Kompensoinnilla pienennetään loisvirran osuutta verkossa, jolloin sen yhtälön 3.8 mukaisesti laskettu kokonaisvirta pienenee. Kokonaisvirran pienentyminen vaikuttaa pätö- P_h ja loistehohäviöihin Q_h, jotka ilmenevät sähköverkon eri osien lämpenemisenä. Tehohäviöt kolmivaiheisessa sähköverkossa voidaan laskea yhtälöillä 3.23 ja 3.24. (Eronen et. Al. 2018)

$$P_h = 3 * I^2 * R \tag{3.23}$$

$$Q_h = 3 * I^2 * X \tag{3.24}$$

Tehokertoimen vaikutusta sähköverkon häviöiden prosentuaaliseen pienenemiseen havainnollistetaan kuvassa 3.11.



Kuva 3.11. Kahden eri tehokertoimen cos(*φ2*) prosentuaalinen vaikutus häviöiden pienentymiseen cos(*φ1*) lähtöarvoon verrattuna (Sähkötieto 2016).

Kompensoinnin avulla tehdyillä tehokertoimen parantamisella kokonaisvirtaa pienentämällä on merkittävä vaikutus sähköverkon häviöiden määrään. Kuten kuvasta 3.11 voidaan nähdä, esimerkiksi tehokerrointa nostettaessa kompensoimalla arvosta cos(*φ1*) 0,7 arvoon cos(*φ2*) 0,98, voidaan saavuttaa jopa 50 % häviöiden pienentyminen sähköverkossa. Vaihtoehtoisesti loisvirran pienentyessä, on mahdollista kasvattaa pätövirran osuutta kokonaisvirrasta, jolloin sähköverkon siirtokapasiteetti nousee. Toisaalta kompensointiyksiköt itsessään tuottavat myös pätötehohäviöitä, mutta niiden vaikutus kokonaispätötehohäviöihin on lähtökohtaisesti pienempi kuin kompensoinnilla saatu hyöty. (Eronen et. Al. 2018)

Kompensoinnilla pystytään myös hillitsemään sähköverkon jännitealenemaa U_a. Jännitealenema voidaan laskea yhtälöllä 3.25.

$$U_a = R * I_p + X * I_q \tag{3.25}$$

Kompensoinnilla saadaan pienennettyä loisvirtaa, joka vaikuttaa alentavasti jännitealeneman loisvirrasta ja reaktanssista muodostuvaan komponenttiin. Yhtälön 3.25 mukaisesti tällöin kokonais-jännitteenalenema pienenee, ja verkon stabiilisuus paranee. (Eronen et. Al. 2018)

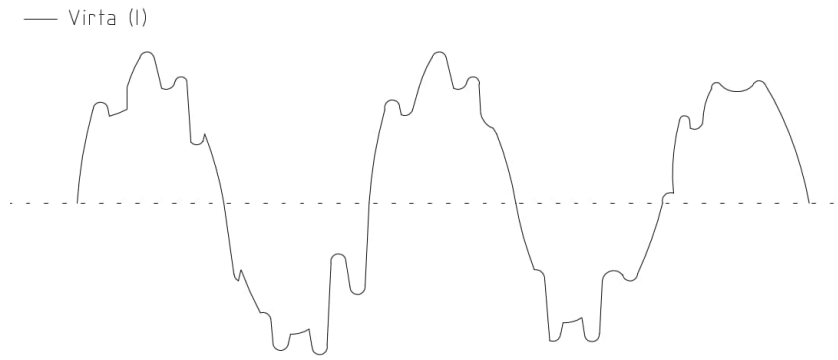
Erilaiset kompensointilaitteistot voidaan liittää sähköverkkoon yksittäiseen laitteeseen, laiteryhmään tai keskitetysti keskuksen tai muuntajan yhteyteen. Laitekohtaista kompensointia voidaan käyttää esim. yksittäisen moottorin kompensointiin, mutta nykyisin se ei ole isommissa laitteistoissa kovinkaan suositeltu toimenpide niiden hankalan ylläpidon vuoksi. Laitekohtaisella kompensoinnilla päästään tarkkaan lopputulokseen kompensoinnin suhteen, mutta esim. moottoripiirejä ei saa ylikompensoida, sillä se saattaa aiheuttaa moottorin sammuksissa ollessaan itseheräämisen ja muuttumisen generaattoriksi. Moottorikohtaisessa kompensoinnissa pyritäänkin maksimissaan 0,99 tehokertoimen arvoon, ja isoilla moottoreilla maksimissaan 90 % mitoitukseen tyhjäkäyntitehosta. Moottorien laitekohtaisessa kompensoinnissa noudatetaan tyypillisesti moottorivalmistajien määrittämiä suosituksia. (Eronen et. Al. 2018)

Ryhmäkohtaista kompensointia käytetään lähinnä vanhojen valaistusten tai useamman samaan ohjaukseen yhdistetyn moottorin kompensointiin. Tämän hetken suosituksien mukaan ryhmäkohtaista kompensointia ei tulisi käyttää niiden hankalan ylläpidon vuoksi. Moottorikäyttötasolla ryhmäkohtaisessa kompensoinnissa olisi määriteltävä moottorikohtainen kompensointi erikseen ja niiden tehot laskettava yhteen muiden laiteryhmän moottorien kanssa. (Eronen et. Al. 2018)

Keskitetty kompensointi on yleisimmin käytetty kompensointiperiaate ja sitä voidaan käyttää eri jännitetasoilla. PJ-tasolla keskitetty kompensointi voidaan toteuttaa keskusten yhteydessä. KJ-tasolla keskitetty kompensointi voidaan liittää esimerkiksi muuntajien tai kojeistojen yhteyteen. Keskitetty kompensointi voidaan toteuttaa myös sähköasemien yhteydessä. (Eronen et. Al. 2018)

3.3 Yliaallot ja säröytyminen

Yliaallot ovat hetkellinen tilanne, jossa vaihtojännite ja -virta poikkeavat perustaajuisesta sinimuotoisesta aaltomuodosta. Säröytynyttä jännitettä kutsutaan yliaaltojännitteeksi tai jännitesäröksi, ja säröytynyttä virtaa yliaaltovirraksi tai virtasäröksi. Säröytymistä aiheuttavat pääsääntöisesti puolijohteita sisältävät epälineaariset kuormat, joiden muuttuva kuormitustilanne aiheuttaa nopeita muutoksia virran suhteen. Sinikäyrästä poikkeavan virran muutokset aiheuttavat yhdessä verkon impedanssin kanssa jännitehäviöitä, jotka näyttäytyvät jännitesärönä. Säröytyminen on mahdollinen myös lineaarisilla kuormilla, jos verkon jännitetaso heittelee jonkin verkkokomponentin epälineaarisen toiminnan takia (Eronen et. Al. 2018). Säröytynyttä aaltomuotoa havainnollistetaan kuvassa 3.12.



Kuva 3.12. Havainnekuva yliaaltopitoisen sähköverkon virtasäröstä.

Säröytyminen voidaan todeta mittaamalla. Kuvassa 3.12 on mitatun kuormitusvirran säröytynyt aaltomuoto, johon vaikuttaa erityisesti viides ja seitsemäs yliaalto. Jännite- ja virtasärökomponentit muodostavat särötehon *D*. Säröytymisen vaikutuksia sähkötehon osalta voidaan tarkastella yhtälöllä 3.26 (Eronen et. Al. 2018).

$$D = \sqrt{S^2 - P^2 - {Q_{fn}}^2} \tag{3.26}$$

Säröteho voidaan siis ilmaista säröytymisestä johtuvan sähkötehon osuutena, joka poikkeaa perustaajuisesta pätö- ja loistehosta Q_{fn}. Harmoninen säröteho D_H on mahdollista määrittää perustaajuisen näennäistehon S_{fn}, harmonisen kokonaissärökertoimen (THD(*U*)) ja virran harmonisen kokonaissärökertoimen (THD(*I*)) avulla yhtälöllä 3.27.

$$D_H = \sqrt{{S_{fn}}^2 * \mathrm{THD}(U)^2 * \mathrm{THD}(I)^2 - {P_H}^2} \tag{3.27}$$

THD eli kokonaissärökerroin on tietyn perustaajuisen aallon ja siihen vaikuttavan yliaallon välinen suhde. Yhtälö 3.27 näin ollen huomioi perustaajuiseen näennäistehoon peilaten harmoniset THD-kokonaissäröt sekä harmonisen pätötehon P_H. (IEEE 2016b)

Yliaaltojen taajuudet jaetaan harmonisiin ja epäharmonisiin yliaaltotaajuuksiin. Harmoniset yliaallot esiintyvät sähköverkon 50 Hz nimellistaajuudella f_n, ja ne ovat taajuutensa monikertoja. Harmoninen yliaaltotaajuus f_h saadaan laskettua kertomalla nimellistaajuus yliaallon järjestysluvulla n yhtälön 3.28 mukaisesti.

$$f_h = n * f_n \tag{3.28}$$

Tämä tarkoittaa yhtälöllä 3.28 laskettuna esimerkiksi seitsemännen harmonisen yliaallon taajuudeksi 350 Hz. Epäharmoninen yliaaltotaajuus vastaavasti ei ole perusaallon monikerta. Yliaalloista haitallisimmat ovat kolmella jaolliset parittomat yliaallot, kuten kolmas ja yhdeksäs yliaalto. Kolmella jaollisten parittomien yliaaltojen vaihevirrat ovat saman vaiheisia ja yhtä suuria, jolloin ne summautuvat nollajohtimeen tähtipisteessään. Tämä ilmiö altistaa nollajohtimeen jopa kolminkertaisen yliaaltovirran, joka voi olla vaihevirtaan nähden jopa 1,7 -kertainen. Kolmella jaollisiin yliaaltovirtoihin pystytään vaikuttamaan kondensaattoripariston yhteydessä käytettävällä kelalla. Tyypillisimmät yliaaltotaajuudet on esitetty taulukossa 3.2. (Eronen et. Al. 2018; Korpinen 2008)

Taulukko 3.2. Tyypilliset yliaaltotaajuudet sekä niiden jaksonajat laskettuna yhtälöllä 3.28.

Yliaallon järjestysluku (n)	Taajuus (f)	Jaksonaika (t)
Perustaajuus	50 Hz	20 ms
3. harmoninen yliaalto	150 Hz	6,7 ms
5. harmoninen yliaalto	250 Hz	4 ms
7. harmoninen yliaalto	350 Hz	2,9 ms
9. harmoninen yliaalto	450 Hz	2,2 ms
11. harmoninen yliaalto	550 Hz	1,8 ms
13. harmoninen yliaalto	650 Hz	1,5 ms

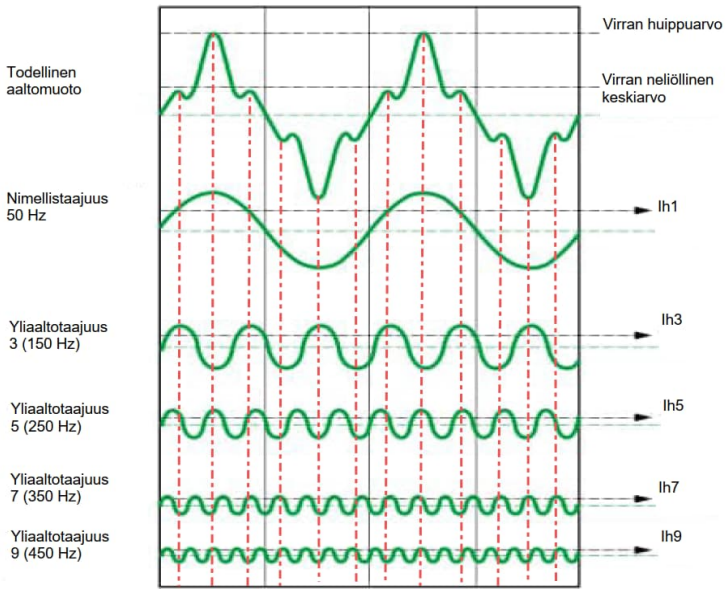
Taulukossa 3.2 esitetty yliaaltotaajuuden jaksonaika *t* voidaan määrittää yhtälöllä 3.29.

$$t = \frac{1}{f} \tag{3.29}$$

Yliaaltojännitteiden muodostumista voidaan tarkastella matemaattisesti Fourier-analyysin avulla. Fourier-analyysillä voidaan määrittää jännite halutulle ajalle *u(t)*. Analyysi ottaa huomioon järjestysluvultaan *n* yliaaltojännitteiden amplitudit U_{hn} ja vaihekulmat a_h tarkasteltavan ajanhetken osalta. Tämän lisäksi laskennassa huomioidaan jännitteen tasakomponentti U_0. Yliaaltojännite voidaan laskea yhtälöllä 3.30. (Eronen et. Al. 2018)

$$u(t) = U_0 + \sum_{n=0}^{\infty} \sqrt{2} U_{hn} \sin(n * 2\pi f_n t + a_h) \tag{3.30}$$

Fourier-analyysillä saatavia tuloksia voidaan havainnollistaa virran osalta esimerkiksi kuvan 3.13 mukaisesti.



Kuva 3.13. Yliaaltotaajuudet ja taajuuskohtaiset yliaaltovirrat (I_{hn}) (IEEE 2020).

Todellinen aaltomuoto muodostuu yliaaltotaajuuskohtaisten virtakomponenttien I_h yhteisvaikutuksesta. Yllä olevassa kuvassa on esitetty yliaaltotaajuuskohtaiset aaltomuodot, sekä niiden vaikutus ylimpänä olevaan todellisen aaltomuotoon. Yliaaltojännitteiden osalta standardi SFS-EN-50160:2022 määrittelee taulukon 3.3 mukaiset sallitut arvot eri jännitetasojen harmonisille yliaaltojännitteille.

Taulukko 3.3. Standardin mukaiset PJ ja KJ sallitut, sekä SJ annetut viitteelliset yliaaltojen jännitesäröt THD(*U*) prosentteina perustaajuuden jännitteeseen verrattuna. (Muokattu lähteestä (SFS-EN 2022)

Harmoniset yliaallot			
Yliaallon järjestysluku	PJ	KJ	SJ (viitteellinen)
2. harmoninen yliaalto	2 %	2 %	1,9 %
3. harmoninen yliaalto	5 %	5% **	3% **
4. harmoninen yliaalto	1 %	1 %	1 %
5. harmoninen yliaalto	6 %	6 %	5 %
*6. harmoninen yliaalto	0,5 %	0,5 %	0,5 %
7. harmoninen yliaalto	5 %	5 %	4 %
9. harmoninen yliaalto	1,5 %	1,5 %	1,3 %
11. harmoninen yliaalto	3,5 %	3,5 %	3 %
13. harmoninen yliaalto	3 %	3 %	2,5 %
15. harmoninen yliaalto	1 %	1 %	1 %
17. harmoninen yliaalto	2 %	2 %	***
19. harmoninen yliaalto	1,5 %	1,5 %	***
21. harmoninen yliaalto	0,75 %	0,5 %	***
23. harmoninen yliaalto	1,5 %	1,5 %	***
25. harmoninen yliaalto	1,5 %	1,5 %	***
*Parillisille yliaalloille 6-24 pätee sama arvo ** Verkon rakenteesta riippuen 3. yliaalto saattaa olla huomattavasti pienempi *** Ei määritelty, harkittavana standardin mukaisesti			

Standardin mukaisia arvoja tarkastellaan PJ, KJ ja SJ liittymiskohdissa, mutta niitä voidaan soveltaa tarkasteluun yhtä lailla myös sähkönjakelun liittymiskohtia alemmilla tasoilla. Arvot koskevat normaalia käyttöolosuhdetta, missä viikon pituisen mittausjakson aikana yksittäisten yliaaltojen jännitteet huomioidaan 10 minuutin tehollisarvojen keskiarvosta 95 % osalta jakelujännitteestä. Sähkön laatua voidaan arvioida jännitesärön osalta taulukon 3.4 mukaisesti.

Taulukko 3.4. Harmonisen jännitesärön laatuluokitus (Sähkötieto 2014).

Laatuluokka	Harmoninen jännitesärö THD(U) [%]
Hyvä	≤ 3
Normaali	≤ 3 - 6
Standardi	≤ 6 - 8

Lähtökohtaisesti sähkön laatu on hyvällä tasolla, jos jännitesärö on ≤ 3 % myös yleisimpien vahvojen parillisten yliaaltojen (5 ja 7) suhteen. Vastaavasti sähkön laatu on heikolla tasolla, kun jännitesärö on ≥6 %. Standardi SFS-EN-50160:2022 asettaa jakelujännitteen kokonaissärökertoimelle 8 % ylärajan, jonka alla sen tulee pysyä edellä mainittujen

mittauksien osalta. Jännitesäröä saattaa hetkellisesti esiintyä suuriakin piikkejä, jotka ovat >8 % särökertoimeltaan sähköverkon resonanssi-ilmiöiden takia. Lähtökohtaisesti harmonisen jännitesärön ollessa laatuluokassa hyvä tai normaali, pyritään välttämään häiriöitä voimistuttavien laitteiden käyttöä. Jännitesärön noustessa >5 % on suosituksena hallita säröä käyttämällä yliaaltosuodatusta (TKF 2024).

3.3.1 Yliaaltojen määritys

Yliaaltojen määrittämisen suhteen tarkimpaan lopputulokseen päästään suorittamalla yliaaltomittaukset erilaisissa kuormitustilanteissa. Yliaaltomittauksissa selvitetään yliaaltotaajuuskohtaisesti yliaaltokohtainen virta I_{hn} ja yliaaltojännite, joiden arvot ilmaistaan prosentuaalisesti kokonaissärön THD kautta. Toisena vaihtoehtona kokonaissärön määrittämiseen on arvioida säröytymistä kuormitustietoihin perustuen, jolla tosin ei päästä samanlaiseen tarkkuuteen kuin mittaamalla. Yliaaltokohtainen virta voidaan määrittää laskemalla mittaamalla todetun virtasärön kautta yhtälöllä 3.31. (Eronen et. Al. 2018)

$$I_{hn} = THD(I_{hn}) * I_{fn} \tag{3.31}$$

Yliaaltokohtainen jännite U_{hn} voidaan määrittää yliaaltokohtaisen virran I_{hn} ja yhtälöllä 3.32 määriteltävän yliaaltokohtaisen reaktanssin X_{hn} avulla. Yliaaltokohtainen reaktanssin määrittelyyn tarvitaan tieto sähköverkon kokonaisreaktanssista X, joka määritellään tapauskohtaisesti esimerkiksi muuntajien osalta.

$$X_{hn} = n * X \tag{3.32}$$

Yliaaltokohtainen jännite saadaan määriteltyä tällöin yhtälön 3.33 mukaisesti.

$$U_{hn} = I_{hn} * X_{hn} \tag{3.33}$$

Yliaaltokohtaisen jännitteen avulla voidaan määrittää laskennallinen säröprosentti. Harmoninen säröprosentti voidaan laskea kahdella tavalla, joita ovat vertaaminen perustaajuiseen jännitteeseen (THD-F) sekä vertaaminen jännitteen tehollisarvoon (THD-R). THD-F tapauksessa kokonaissärö määritetään suhteessa perustaajuiseen jännitteeseen

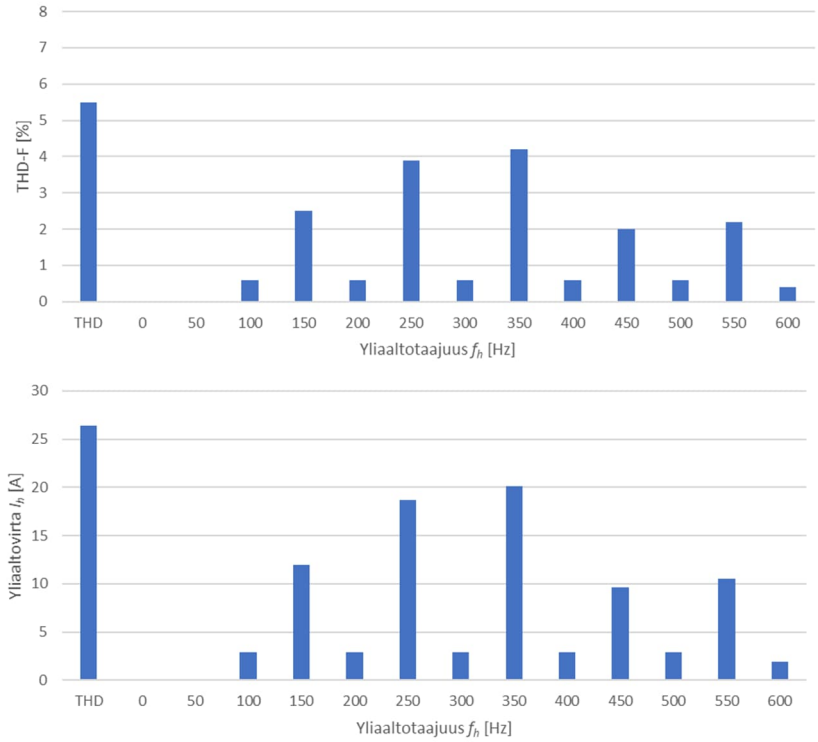
U_{fn}. THD-R tapauksessa vastaava vertailu tehdään jännitteen tehollisarvoon. Molemmat periaatteet ovat sovellettavissa myös virtasärön osalta. THD-F voidaan määrittää yhtälöllä 3.34. (Eronen et. Al. 2018)

$$THD - F = \sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} \left(\frac{U_{hn}}{U_{fn}}\right)^2} \tag{3.34}$$

THD-R voidaan vastaavasti määrittää yhtälöllä 3.35.

$$THD - R = \sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} \left(\frac{U_{hn}}{U}\right)^2} \tag{3.35}$$

THD-arvojen tuloksia tarkastellaan tyypillisesti palkkikaavioina, jotka esittävät varsinaista mitattua yliaaltoa ja säröprosenttia. Tyypillisiä yliaaltomittauksella saatavia tietoja on havainnollistettu kuvassa 3.14.

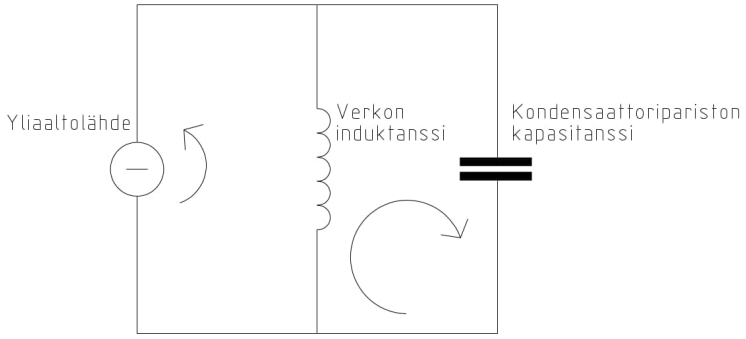


Kuva 3.14. Havainnekuva yliaaltomittauksella saatavista tuloksista, jotka sisältävät yliaaltovirtakomponentit (I_{hn}) ja taajuuskohtaiset säröprosentit (THD-F).

Palkkikaaviossa tulokset esitetään yliaaltotaajuuskohtaisesti, jotka yhdessä muodostavat kaavion vasemmassa reunassa olevan kokonaissärön THD. Yliaaltokohtaisen särön haitallisuutta voidaan arvioida aikaisemmin esitetyn taulukon 3.4 mukaisesti.

3.3.2 Resonanssitaajuus ja yliaaltojen suodatus

Kompensointilaite voi muodostaa sähköverkon kanssa resonanssipiirin, joka vahvistaa yliaaltoja sähköverkossa. Resonanssipiiri voi olla tyypiltään kytkentätapaansa perustuen, joko sarja- tai rinnakkaisresonanssissa sähköverkon kanssa. Sarjaresonanssissa sähköverkon reaktanssi muodostuu kapasitiivisen kondensaattoripariston sekä sähköverkossa esiintyvän induktanssin sarjakytkennästä, jossa niiden keskinäinen vaikutus reaktanssin suhteen kumoaa toisensa. Esimerkiksi KJ-muuntajan ensiöpuolelle kytketty kondensaattoriparisto voi muodostaa muuntajan induktanssin kanssa sarjaresonanssin, joka aiheuttaa jännitesäröä PJ-puolelle. Rinnakkaisresonanssin periaate on esitetty kuvassa 3.15. (Eronen et. Al. 2018)



Kuva 3.15. Rinnankytketyn kompensoinnin sijaiskytkentä (Eronen et. Al. 2018).

Rinnakkaisresonanssissa induktiivinen sähköverkko, sekä sen rinnalle kytketty kapasitiivinen kondensaattoriparisto voivat muodostaa keskinäisen äärettömän reaktanssin. Rinnakkaisresonanssin takia voivat yliaaltovirrat vahvistua PJ-verkossa jopa viisinkertaiseksi, ja KJ-verkossa 10–20-kertaisiksi. Vahvistumisen voimakkuus on riippuvainen sähköverkon resistiivisten ja reaktiivisten kuormitusten suhteesta toisiinsa siten, että resistiivinen kuorma vaikuttaa vaimentavasti yliaaltojen vahvistumiseen. Lisäksi yliaaltojen vahvistumiseen vaikuttaa sähköverkon resonanssitaajuuden f_r ja verkossa esiintyvien yliaaltotaajuuksien etäisyys toisistaan. Resonanssitaajuus voidaan määrittää suoraan verkkoon kytketylle kondensaattoriparistolle yhtälöllä 3.36. (Eronen et. Al. 2018)

$$f_r = \sqrt{\frac{S_k}{Q}} * f_n \tag{3.36}$$

Resonanssitaajuuden määrittämistä varten kondensaattoriparistoon loistehokapasiteetin lisäksi tarvitaan tieto sähköverkon sen hetkisestä oikosulkutehosta S_k, joka tyypillisesti määritetään mittausten ja laskentaohjelmien avulla. Sähköverkon kompensointia ei

suositella toteutettavaksi vain kapasitiivisella kondensaattoriparistolla resonanssi-ilmiön, ja siitä johtuvan yliaaltojen voimistumisen takia. Resonanssi-ilmiöstä johtuvat voimakkaat yliaallot voivat johtaa laitteiden, kuten taajuusmuuttajien rikkoutumiseen. Haitallisen resonanssi-ilmiön syntymistä voidaan kuitenkin hallita käyttämällä kompensoinnin yhteydessä suodatuspiiriä. (Eronen et. Al. 2018)

Yliaaltoja voidaan hallita kolmella eri periaatteella, joita ovat verkon ylimitoitus, yliaaltolähteenä toimivien laitteiden käytön välttäminen tai yliaaltojen suodattaminen. Periaatteista ylimitoittaminen ei ole isossa kuvassa taloudellisesti kannattavaa, sekä nykyaikaisten korkean hyötysuhteen tehoelektroniikka käyttävien sähkölaitteiden käyttöä on vaikeaa välttää. Ylimitoitukseen liittyen on kuitenkin mahdollista vaikuttaa yliaaltoihin esimerkiksi taajuusmuuttajien osalta ryhmittelemällä kuormia eri muuntajien taakse tai valitsemalla suurempipulssisia, kuten 12-pulssisia suuntaajia. Edellä mainituista tehokkain periaate yliaaltojen hallintaan on kuitenkin niiden suodattaminen. Yliaaltojen suodatuksella tarkoitetaan yliaaltojen huippuarvojen muokkaamista lähemmäs sinimuotoista aaltomuotoa kelaan tai tehoelektroniikkaan pohjautuvan tekniikan avulla. (Eronen et. Al. 2018)

Suodatin on impedanssiltaan kapasitiivinen eli se tuottaa perustaajuista loistehoa. Loistehon tuoton lisäksi se pienentää viritystaajuutensa mukaista säröä. Passiivisilla komponenteilla toteutettuna suodatuksen perusperiaatteena on kapasitiivisen kondensaattoripariston ja induktiivisen reaktorin eli kelan sarjakytkentä, jolla muodostetaan pieni-impedanssinen piiri yliaaltojen kulkeutumista varten. Pieni-impedanssinen piiri on viritettävä jokaiselle halutulle taajuudelle erikseen. Yhdellä passiivisuodattimella voidaan suodattaa jopa kolmea yliaaltotaajuutta. Passiivisuodatin ei saa ylikuormittua, joten se on ylimitoitettava kapasiteetiltaan tarpeeseen nähden. Aktiivisuodattimen osalta särön pienennys perustuu yliaaltokohtaisella 180 ° vastakomponentilla tehtyyn yliaallon kumoamiseen. Aktiivisuodattimella on mahdollista vaikuttaa useampaan yliaaltotaajuuteen. (Eronen et. Al. 2018)

Yliaaltosuodatuksen hankinnan osalta olemassa olevaan verkkoon parhaimpaan lopputulokseen päästään suorittamalla yliaaltomittaukset. Yliaaltomittaukset suoritetaan verkkoanalysaattorilla, jonka analytiikkaan liittyvät ominaisuudet vaihtelevat valmistajakohtaisesti. Yliaaltomittauksen tulisi vastata standardin SFS-EN 50160

mittalaitteelle, mittauksen laajuudelle sekä jännitteelle asetettuja vaatimuksia. Mittaus tulisi suorittaa tarvittavan pitkällä seurantajaksolla, jotta sähköverkon särökäyttäytyminen saataisiin selvitettyä riittävällä tarkkuudella. Seurannan mittausjakso tulisi valita pisimmillään niin, että mittauksella saadaan selville suurin särövirran 10 minuutin keskiarvo. Jakso voi olla tätäkin lyhyempi. Mittaustulosten suhteen yksittäisenkin mittausjakson arvon ylittäessä standardin asettaman arvon, on suositeltavaa käyttää yliaaltosuodatinta. Lähtötiedoiksi yliaaltosuodattimen mitoitukseen tarvitaan taulukon 3.5 mukaiset tiedot. (ABB 2000)

Taulukko 3.5. Yliaaltosuodattimen mitoitukseen tarvittavat lähtötiedot (ABB 2000)

Tarvittavat yliaaltosuodattimen mitoitustiedot	Tarkennus
Verkkotiedot	Nimellijännite ja -taajuus
Tarvittava perustaajuinen loisteho	Kompensointi tarve
Yliaaltovirrat syötöstä tai yliaaltoja tuottavasta kuormasta	Täydellä ja tyypillisellä kuormalla ilman kompensointia
Yliaaltoja tuottavan kuorman tiedot	Esim. 6-pulssi, 500 kVA
Keskuksen oikosulkuteho	Muuntajan nimellisteho ja oikosulkuprosentti
Mahdolliset suodatusvaatimukset	THD(U)max ja maksimivirrat
Kotelointiluokka ja ympäristön lämpötila	
Asennustila	Olemassa olevat lähdöt ja kaapelointi

Olemassa olevan metsäteollisuuden laitoksen osalta mitoitukseen tarvittavat tiedot saadaan hankittua mittaamalla, sekä kohteen sähköjärjestelmään tutustumalla. Mittaamalla saadaan määritettyä tarkka kuva mittauskohteen sähkön laadusta, jonka pohjalta voidaan määrittää kohteeseen sopiva yliaaltosuodatin. Uuden laitoksen osalta yliaaltosuodatusta lähestytään kokemusperäisen arvion pohjalta määrittämällä yliaaltosuodatukselle tarvittavan kapasiteetin alkutilanteessa. Yliaaltosuodatuksen kapasiteettia tulee lisätä tarvittaessa sekä sitä on tarpeen tarkastella uudestaan kuormituksen lisääntyessä. Tärkeimpänä asiana yliaaltosuodatuksen määrittelyyn liittyen uusissa laitoksissa on suunniteltu muuntajien kuormitustaso sekä kuormatyyppi (TKF 2024).

3.3.3 Yliaaltojen aiheuttajat

Yliaaltojen lähteenä voivat toimia erilaiset hakkuriteholähdettä, puolijohteilla toteutettua suuntaajakäyttöä tai tyristorikytkintä hyödyntävät laitteet. Lisäksi yliaaltoja voivat tuottaa mm. muuntajat, oikosulkumoottorit, generaattorit, valaistus sekä erityisesti terästeollisuudessa käytössä olevat valokaariuunit. Erilaisten suuntaajakäyttöjen määrä on kasvamassa jatkuvasti sähköverkossa sen mahdollistaman korkean hyötysuhteen, sekä tarkkojen säätö ominaisuuksiensa ansiosta. Säädön tarkkuus suuntaajakäytöissä perustuu puolijohteiden nopeaan muutoskykyyn, joka toisaalta vahvistaa säätöhetken aikana

säröytymistä. Suuntaajien aiheuttama säröytyminen johtuu epäideaalisesta suuntaajan toiminnasta, jossa sen verkosta ottama virta ei ole sinimuotoista. Yliaaltoja tuottavan laitteen vaikutus jännitesärön vahvuuteen sähköverkossa riippuu liityttävän sähköverkon sähkön laadusta. Heikkolaatuisessa sähköverkossa yliaaltolähde aiheuttaa suurempaa jännitesäröä. (ABB 2000)

Puolijohdetekniikalla toteutettuja suuntaajakäyttöjä voidaan hyödyntää erilaisissa sovellutuksissa monipuolisesti. Teollisuuden sähköverkon tyypillisimmät käyttökohteet suuntaajilla ovat erilaiset moottorikäytöt, kuten taajuusmuuttajat, ja UPS-laitteet. Taajuusmuuttaja ohjattuja moottoreita on yleisesti käytössä metsäteollisuuden laitoksissa, joissa niillä pystytään toteuttamaan esimerkiksi erilaisten prosessiin liittyvien pumppujen portaaton ohjaus. Toimintavarmuutta parantavia UPS-laitteita käytetään yleisesti metsäteollisuuden laitoksissa tasaamaan jännitettä lyhyiden sähkökatkojen aikana. UPS-laitteistoissa hyödynnetään suuntaajakäyttöä muuntaessa akuston tasajännitettä sähköverkon vaihtojännitteeksi. UPS-laitteiden huolto ja akustojen kunnossapito on tärkeässä osassa voimakkaiden yliaaltojen syntymisen estämiseksi, sillä huonokuntoiset akustot aiheuttavat suuntaajissa syötettävän sähkön laadun heikkenemistä. Lisäksi suuntaajakäyttöjä voi teollisuudessa esiintyä osana automaatio-ohjausjärjestelmää mm. puolijohdekytkimissä. (Korpinen 2008)

Yleisellä tasolla suuntaajakäyttöjä sovelletaan elektroniikkalaitteiden virtalähteissä, valaistuksessa sekä sen ohjauksessa. Elektroniikan, kuten tietokoneen DC-jännitesyöttö on yleisesti toteutettu hakkuriteholähteellä, jossa yksivaiheinen vaihtojännite tasasuunnataan tasajännitteeksi. Hakkuriteholähde tuottaa kulutuskohteeseensa epälineaarista virtaa, joka sisältää vain osittain sinimuotoista perusaaltoa. Lisäksi hakkuriteholähteitä käytetään mm. LED-valonauhojen virtalähteinä. Tyypillisesti hakkuriteholähde vahvistaa harmonisia yliaaltoja. (Eronen et. Al. 2018)

Tyristorikytkimiä käytetään teollisuudessa tyypillisesti resistiivisten kuormien ohjauksissa, ja sen toiminta perustuu vastarinnan kytkettyihin samavaiheisiin kahteen tyristoriin. Tyristoreilla pystytään ohjaamaan jännitteen positiivista ja negatiivista puolijaksoa. Tyristorikytkimien yleisimmät ohjausperiaatteet ovat vaihekulma- ja nollapisteohjaus. Vaihekulmaohjaus perustuu tyristoreiden sytytykseen johtavuustilaan puolijakson aikana

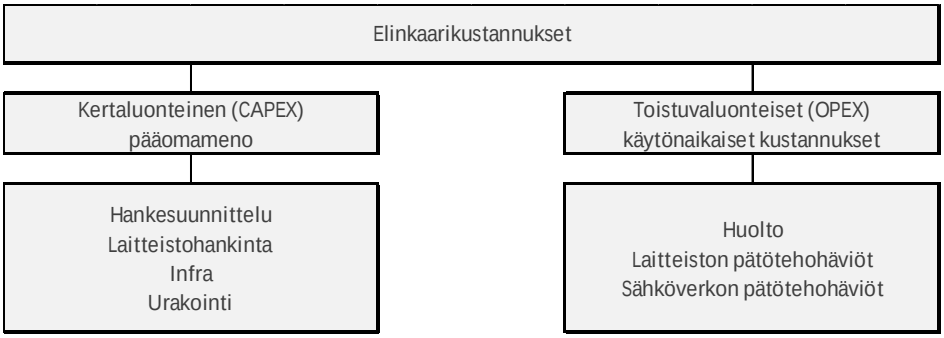
sytytyskulman avulla. Nollapisteohjaus perustuu kokonaisten jaksojen määrän säätelyyn. Tyristorikytkimet synnyttävät toimintaperiaatteensa takia epäharmonisia yliaaltoja. (Korpinen 2008)

Myös muuntajat voivat toimia yliaaltolähteenä. Muuntajalähtöiset yliaallot perustuvat magneettiseen epälineaarisuuteen sen raudoissa, jossa magneettivuon tiheys ei muutu lineaarisesti magneettikentän muutosten mukana. Tämän hystereesi-ilmiön takia muuntajan magnetointivirta on poikkeava syöttöjännitteen käyrämuotoon nähden. Yliaaltojen muodostumiseen ja leviämiseen muuntajassa vaikuttavat sen kytkentä, maadoitustapa ja sydämen rakenne. Tähtikytkentäisessä muuntajassa kolmella jaolliset yliaaltovirrat summautuvat nolla-, tai maadoitusjohtimeen. Ilman maadoitusta olevan tähtikytkentäisen muuntajan kolmella jaolliset yliaallot vaikuttavat magneettivuon käyrämuotoon, ja sen kautta vaihejännitteeseen. Toisiostaan kolmiokytkentäisissä tai kolmiokytkentäisen tertiäärikäämityksen sisältävissä muuntajissa muodostuu kiertävä kolmas yliaaltovirta sen kolmioon kytkettyihin käämeihin. Ensiöpuolen ollessa kolmiokytketty ei muuntajan magnetointivirrassa esiinny kolmella jaollisia yliaaltoja. Muuntajien ylikuumenemista aiheuttavat erityisesti Dyn-kytkentäisen muuntajan takana olevien kolmatta yliaaltoa aiheuttavien kuormien nollajohdossa kulkevat yliaaltovirrat. Käyttöolosuhteiden ollessa normaalit ja vakaat, muuntajat eivät tyypillisesti kuitenkaan tuota merkittäviä yliaaltoja. (Korpinen 2008)

Yliaaltoja aiheuttaa myös valokaariuunit, oikosulkumoottorit ja generaattorit. Valokaariuunille tyypillistä on pätö- ja loistehon taajuuksien nopea vaihtelu muutaman hertsin tarkkuudella, joka aiheuttaa jännitesäröä. Kuormitusvirrat valokaariuuneissa vaihtelevat nopeasti ja ne saattavat olla jopa kiloampeerien luokkaa. Nopeat virran vaihtelut aiheuttavat virtasäröä, joka saattaa ilmetä jopa perustaajuutta alempana esiintyvinä virtoina. Valokaariuuni aiheuttaa harmonisia sekä epäharmonisia yliaaltoja sähköverkkoon. Lisäksi yliaaltolähteinä voivat toimia sähkökoneet, tarkemmin sanottuna generaattorit ja oikosulkumoottorit. Käämitysrakenteiden muoto ja magneettipiirin raudan kyllästyminen aiheuttavat yliaaltoja sähkökoneissa. Sähkökoneen navan ilmaväli ei ole täysin sinimuotoinen, joka aiheuttaa esim. generaattori toiminnassa ulostulojännitteen poikkeavuutta sinimuotoisesta käyrästä. Yliaaltoja voimistumiseen pystytään vaikuttamaan käämien muotoiluilla. (Korpinen 2008)

4 ELINKAARIKUSTANNUKSET JA INVESTOINNIN KANNATTAVUUS

Elinkaarikustannukset pitävät sisällään kaikki tarkasteltavaan laitteistoon liittyvät kustannukset sen elinkaaren aikana. Elinkaarikustannukset voidaan jakaa kertaluonteisiin pääomamenoihin (CAPEX) eli investointeihin, sekä käytönaikaisiin toistuvaluonteisiin kustannuksiin (OPEX). Elinkaarikustannusten muodostuvat tässä työssä kuvan 4.1 mukaisesti.



Kuva 4.1 Periaatekaavio kompensointilaitteiston elinkaarikustannuksiin vaikuttavista tekijöistä.

Kompensointilaitteistojen elinkaareksi tässä tarkastelussa määriteltiin 30 vuotta laitteistotoimittajan tietojen pohjalta. Seuraavassa luvussa tarkemmin esitetään mitä eri kustannuslajeja huomioidaan tässä tarkastelussa, sekä kuinka investointien kannattavuutta tullaan tarkastelemaan eri investointivaihtoehtojen välillä.

4.1 Investointikustannukset

Investointikustannus on kiinteä ja kertaluontoinen pääomakustannus. Tässä tarkastelussa investointikustannukset on määritelty yksityiskohtaisesti case-tarkastelua varten määritetyille erilaisille kompensoinnin tyyppilaitteistoille. Kokonaisinvestointi kustannukset K_i määritetään case-tapauksittain käytettyjen yksittäisten tyyppilaitteistojen yksikkökustannukset K_{ix}, ja kappalemäärät *kpl* huomioiden yhtälön 4.1 mukaisesti.

$$K_i = (K_{i1} * kpl) + \ldots (K_{ix} * kpl) \tag{4.1}$$

Investointikustannukset tässä tarkastelussa koostuvat hankesuunnittelusta, laitteistohankinnasta, tarvittavasta lisäinfrasta sekä urakoinnista. Hankesuunnittelun, lisäinfran sekä urakkakustannusten osalta tarkastelussa hyödynnetään työn tilaajan tietoutta menneisiin suunnittelu- ja konsultointitoimeksiantoihin perustuen. Sähköisen laitteiston ja

mahdollisten muiden laitteistotoimittajan tarjoamien ratkaisuiden investointikustannusten osalta tukeudutaan laitteistovalmistajien kustannusarvioihin.

4.2 Käytönaikaiset kustannukset

Kompensointilaitteistojen käytönaikaisten kustannusten osalta tässä tarkastelussa huomioidaan tyyppilaitteistojen huollosta sekä häviöistä johtuvat kustannukset. Huoltokustannukset on määritelty tyyppilaitteistokohtaisesti 30 vuoden elinkaarensa ajalle, ja niiden suhteen otetaan huomioon suositeltu huoltoväli tarvittavine komponenttiuusintoineen. Huoltokustannusten määrittelyn suhteen tarkastelussa tukeudutaan laitteistotoimittajan antamiin yksikköhintoihin ja teknisiin tietoihin. Tyyppilaitteistokohtaiset elinkaaren aikaiset huoltokustannukset jaetaan tasaeriksi vuositasolla yksikköä kohti, jotta niitä voidaan käsitellä osana vuotuisten kassavirtojen laskentaa. Huoltokustannukset case-tapauksittain K_{hn} saadaan kertomalla tyyppikohtaiset yksikkökustannukset K_{hx} kappalemäärällä yhtälön 4.2 mukaisesti.

$$K_{hn} = (K_{h1} * kpl) + \ldots (K_{hx} * kpl) \tag{4.2}$$

Häviökustannusten osalta tässä tarkastelussa otetaan huomioon kompensointilaitteistojen tuottamat pätötehohäviöt P_{hl}, sekä case-ympäristön sähköverkossa esiintyvät pätötehohäviöt. Kompensointilaitteistojen pätötehohäviöt määritetään valmistajan antamien teknisten tietojen perusteella tyyppilaitteistokohtaisesti. Case-tapausten pätötehohäviöiden vertailtavuuden osalta tyyppilaitteistokohtainen kustannus kerrotaan laitteistojen kappalemäärällä. Case-ympäristön sähköverkon pätötehohäviöt määritetään Neplan-verkkosimulointiohjelman avulla, jotta verkosta saataisiin mahdollisimman tarkat tiedot laskentaa varten. Case-ympäristön sähköverkon osalta pätötehohäviöt voidaan jakaa muuntajissa ja johdoissa syntyviin pätötehohäviöihin. Muuntajien kokonaispätötehohäviöt muodostuvat kuormitus- P_{hk} ja tyhjäkäyntihäviöistä P_{h0}. Muuntajan kuormitushäviöt voidaan määrittää muuntajan nimellistehon S_n ja nimelliskuormitushäviöiden P_{kn} avulla yhtälöllä 4.3.

$$P_{hk} = (\frac{S}{S_n})^2 * P_{kn} \tag{4.3}$$

Yhtälössä 4.3 esitetyt muuntajan nimellisteho ja nimelliskuormitushäviöt ovat muuntajakohtaisia ns. kilpiarvoja. Muuntajan tyhjäkäyntihäviöt voidaan määrittää yhtälön 4.4 avulla.

$$P_{h0} = (\frac{U}{Un})^2 * P_{0n} \tag{4.4}$$

Yhtälössä 4.4 esitetty U_n on nimellisjännite ja P_{0n} on muuntajakohtainen nimellistyhjäkäyntihäviö. Muuntajan kuormitushäviöt vaihtelevat muuntajan kuormitustason mukaisesti, kun taas tyhjäkäyntihäviöt eivät ole riippuvaisia kuormituksesta. Tyhjäkäyntihäviöt muodostuvat muuntajan rautasydämen magneettivuon vaihtelusta synnyttäen pyörrevirta- ja hystereesihäviöitä, joiden suuruuteen vaikuttaa vahvasti muuntajassa vaikuttavan jännitteen taso (Lakervi & Partanen 2008). Häviöiden jakautumisen selvittämiseksi tarkasteltavassa sähköverkossa case-tapausten välillä, muuntajahäviöt jaotellaan päämuuntajassa ja jakelumuuntajissa ilmeneviin pätötehohäviöihin.

Johdoissa syntyvät pätötehohäviöt P_{hj} voidaan määrittää yhtälöllä 3.23 kuormitusvirran, sekä tarkasteltavan kaapelin pituuden ja kaapelityypin resistiivisten ominaisuuksien avulla määritettävän kokonaisresistanssin kautta. Johtohäviöiden kustannusten määrittämiseen hyödynnetään verkkosimulointiohjelmasta saatuja tietoja olemassa olevien kaapelityyppien ja pituuksien osalta. Häviöiden jakautumista case-tapausten välillä johdoissa tarkastellaan erikseen PJ sekä kootusti KJ- ja SJ-johtojen osalta. Häviöistä muodostuvat vuotuiset kassavirrat $K_{HÄVn}$ case-tapauksille voidaan määrittää yhtälöllä 4.5.

$$K_{HÄVn} = \left(P_{hl} + P_{hk} + P_{h0} + P_{hj}\right) * t_k * H_h \tag{4.5}$$

Häviöiden huipunkäyttöaika t_k on vastaava kuin kuormituksen huipunkäyttöaika vuodessa. Häviöenergian hintana H_h tarkastelussa käytetään Nord Pool-sähköpörssin vuoden 2023 kuukauden tuntikohtaista keskiarvoa. Case-tapausten osalta vuotuinen kassavirta K_n voidaan lausua yhtälöllä 4.6.

$$K_n = K_{hn} + K_{HÄVn} \tag{4.6}$$

Käytönaikaisista kuluista johtuvan vuotuisen kassavirran määritys tehdään jokaiselle case-tapaukselle erikseen, jotta investointimahdollisuuksia päästään vertailemaan kokonaisvaltaisesti toisiinsa nähden. Käytönaikaisten kulujen jakautumiseen vaikuttavat laitteistojen tekniset ominaisuudet, niiden tarvitsemat huolto-ohjelmat sekä sähköverkon häviöiden muodostuminen laitteistojen sijoittelun perusteella.

4.3 Nykyarvomenetelmä

Tässä työssä investoinnin kannattavuutta tarkastellaan nykyarvomenetelmällä. Nykyarvomenetelmällä saadaan selvitettyä investoinnista johtuva arvonlisäys halutulle ajanjaksolle t ottamalla huomioon investointikustannuksen K_{i0}, tarkastelujakson aikaiset kassavirrat S_t sekä rahan ajallisen arvon laskentakorkokannassa r. Nykyarvomenetelmällä yhtälön 4.7 mukaisesti laskettuna tulokseksi saadaan määritetyn tarkastelujakson investoinnin sen hetkinen nettonykyarvo *NPV*.

$$NPV = \sum_{t=1}^{n} \frac{S_t}{(1+r)^t} - K_{i0} \tag{4.7}$$

Nykyarvomenetelmää käytetään yleisesti erilaisten investointivaihtoehtojen vertailuun sillä saatavien yksiselitteisten tuloksien pohjalta. Menetelmällä saadaan vertailtua tasapuolisesti eri investointivaihtoehtoja, mutta toisaalta se ei ota huomioon mahdollisia investointiin liittyviä riskejä, esimerkiksi tulevaisuuden nettotuottojen todennäköisyyden suhteen. Nykyarvomenetelmässä vuositasolle määriteltävät kassavirrat diskontataan investointihetkeen. Diskonttaus ottaa huomioon määritellyn korkokannan. Tässä tarkastelussa nämä kassavirrat koostuvat edellisessä kappaleessa esitellyistä käytönaikaisista kustannuksista, joita verrataan vaihtoehtoisten loisteholähteiden arvioituihin vuosittaisiin kassavirtoihin. Investointi kirjataan vuodelle 0 negatiivisena kuluna, ja vuosittaiset kassavirrat kirjataan vuodesta 1 lähtien halutulle tarkastelun ajalle, korkokanta huomioiden. Investointi muuttuu kannattavaksi sillä ajanhetkellä, jolloin nettonykyarvo muuttuu positiiviseksi. Kassavirtojen vertailulla saadaan määriteltyä investoinnin vuotuinen nettotuotto. (Lakervi & Partanen 2008)

4.3.1 Nettotuoton määritys

Investointeihin voi sitoutua suuriakin määriä yrityksen pääomaa. Yritystoiminnan kannalta oleellisena asiana on tarkastella investoinneilla saatavaa taloudellista hyötyä, joka itsessään

toimii ohjaavana tekijänä investointipäätöksissä. Muita oleellisia huomioitavia ohjaavia tekijöitä investointien suhteen voi olla mm. lainsäädäntö sekä ympäristötekijät. Investoinnilla saavutettavia taloudellisia hyötyjä tietylle ajanjaksolle voidaan tarkastella määrittämällä nettotuotto tietylle ajanjaksolle. Nettotuoton määrityksen osalta on oleellista ymmärtää investointiin liittyvä kulurakenne, sekä kuinka investointi tulee niihin vaikuttamaan.

Nettotuoton tarkastelua varten tässä työssä tuli määrittää loistehon tuottamisen kustannukset vaihtoehtoisille loistehon tuotantotavoille K_v. Vaihtoehtoisina tuotantotapoina tässä tarkastelussa toimi generaattori tuotanto, sekä sähköverkosta saatavan loistehon hyödyntäminen. Vaihtoehtoisten tuotantotapojen kustannukset huomioidaan vastaavaa kiinteiden kompensointilaitteistojen loistehon tuotantotarvetta kohden. Generaattori tuotannon osalta tämä kassavirta koostuu generaattoreissa syntyvästä pätötehohäviöistä sekä kompensoimattoman case-ympäristön sähköverkon häviöistä. Verkosta hankitun loistehon kustannukset tarkastellaan vastaavasti myös kiinteiden kompensointilaitteistojen loistehon tuotantotarvetta kohden, case-ympäristölle laskettu loistehoikkuna hyödyntäen. Verkosta hankitun loistehon loistehoikkunan ylittävän kompensoitavan osuuden osalta kustannusten arvostukseen sovelletaan Fingridin yleisiä kantaverkkopalvelumaksuja (Fingrid 2024). Myös verkosta hankitun loistehon tapauksessa kustannuksiin huomioidaan lisäksi kompensoimattoman case-ympäristön sähköverkon kokonaispätötehohäviöt. Yhtälön 4.7 mukaiseen nettonykyarvon laskentaan tarvittava nettotuotto S_t määritetään yhtälön 4.8 mukaisesti.

$$S_t = K_v - K_n \tag{4.8}$$

Nettotuotto itsessään eri kompensointilaitteistojen sijoittelun välillä määritetään vertaamalla case-tapauksia vaihtoehtoisiin tuotantotapoihin. Vaihtoehtoisten tuotantotapojen osalta tarkastelussa ei oteta huomioon muita hyödyttäviä seikkoja, kuten generaattorilla tuotetusta sähköstä saatua tuottoa. Tässä tarkastelussa nettotuotto määritetään vuositasolla kassavirtojen erotuksesta nettonykyarvon määritystä varten, ja sen tarkoituksena on toimia apuna erilaisten kiinteiden kompensointilaitteistoihin liittyvien investointien keskinäisessä vertailussa. Nettotuoton määritys vaihtoehtoisten loistehon tuotantomuotojen osalta sisältää epävarmuustekijöitä, joten ne eivät sovellu suoraan eri tuotantomuotojen vertailuun.

5 TEKNISET RATKAISUT KOMPENSOINNIN JA YLIAALTOJEN SUODATUKSEN TOTEUTUKSEEN

Loistehon hallintaan tarkoitetut kiinteät laitteistot voidaan karkeasti jakaa käyttötarkoituksensa mukaisesti kompensointiin ja yliaaltosuodatukseen tarkoitettuihin laitteistoihin. Kompensointilaitteistojen pääsääntöinen tarkoitus on tuottaa loistehoa verkkoon. Yliaaltosuodattimilla pääsääntöinen tarkoitus on suodattaa verkossa esiintyviä yliaaltoja, ja samalla tuottaa loistehoa verkkoon. Metsäteollisuuden laitoksilla loisteholaitteistoihin liittyviä investointipäätöksiä ohjaa sähköverkon laatu ja takaisinmaksuaika (UPM 2024). Tämän vuoksi metsäteollisuuden laitoksilla käytetään yleisesti käytössä olevia yksinkertaisen rakenteen omaavia laitteistoja, jotka ovat todettu kustannukset, käyttökokemukset ja huollot huomioiden toimiviksi ratkaisuiksi.

Tässä luvussa käsitellään metsäteollisuuden laitoksilla yleisesti käytettäviä teknisiä ratkaisuita, jonka lisäksi luodaan katsaus muihin olemassa oleviin loistehon hallintaan soveltuviin laitteistoihin. Lisäksi luvussa luodaan katsaus yleisesti käytettyjen laitteiden lisäksi sähköverkon tehonsiirtokykyä ja ohjattavuutta parantaviin tehoelektroniikkaa ja staattisia ohjaimia käyttäviin joustavan vaihtovirran siirtojärjestelmän (FACTS) -laitteisiin (GIGRE 2020). Erilaisilla kompensointilaitteilla tuottamisen lisäksi loistehoa voidaan hankkia sähköverkosta.

5.1 Kompensointilaitteistot

Kompensointilaitteistojen kapasitiivista loistehoa tuottava peruskomponentti on kondensaattoriparisto. Loistehon kompensointiin PJ-tasolla käytettävissä paristoissa kondensaattorin toiminta perustuu itseparantuviin materiaaleihin. Yleisesti nykyiset kondensaattoriparistot ovat valmistettu metalloidusta polupropyleenikalvosta, ja ne ovat rakenteeltaan kuivia. Kuivien kondensaattoriparistojen toiminta perustuu metallointikerroksessa tapahtuvaan höyrystymiseen. Kompensointiyksikön kapasitanssin määrä perustuu kondensaattoriparistojen määrään ja niiden välisiin kytkentätapoihin. SJ- ja KJ-tasolla käytettävät kondensaattoriparistot voivat olla rakenteeltaan joko öljyeristeisiä tai kuivia. (Eronen et. Al. 2018)

Rinnakkaiskondensaattoriparistoja on olemassa kahta eri tyyppiä, joita ovat kiinteät ja säädettävät rinnakkaiskondensaattoriparistot. Kiinteät rinnakkaiskondensaattoriparistot on

liitetty suoraan kuorman rinnalle sähköverkkoon ilman säätöä. Säädettävissä paristoissa kompensointitehon säätö perustuu kuorman kanssa rinnan olevien kondensaattoriparistojen määrään liittyvään portaittaisiin kytkentä muutoksiin. Säädettävää rinnakkaiskondensaattoriparistoa kutsutaan toiselta nimeltään automatiikkaparistoksi, ja se pitää sisällään kondensaattoriparistojen lisäksi kokonsa mukaan erilaisen määrän kytkin- ja suojalaitteita. Rinnakkaiskondensaattoreita on aikaisemmin asennettu yleisesti metsäteollisuuden laitoksissa varsinkin PJ-keskusten yhteyteen. Rinnakkaiskondensaattoreiden käytöllä on kuitenkin riski yliaaltopitoisissa verkoissa yliaaltoja vahvistavien resonanssien suhteen, joten niitä ei enää suositella toteutettavaksi metsäteollisuuden laitoksissa (TKF 2024). Rinnakkaiskondensaattoreiden tilalla käytetään nykyisin yliaaltojen vahvistumista estäviä kuvassa 5.1 esitettyjä estokelaparistoja.

Kuva 5.1 Pienjännite estokelaparistokaappi.

Estokelaparisto pitää sisällään kondensaattorin ja siihen sarjakytketyn estokelakuristimen. Kondensaattori ja kela sarjakytkettynä muodostavat sarjaresonanssipiirin, jonka avulla se kykenee oikealle taajuudelle viritettynä ehkäisemään yliaaltojen vahvistumista. PJ-estokelaparisto voi pitää sisällään useampia sarjaresonanssiportaita, joita ohjataan käyttöön loistehotarpeen mukaisesti. Estokelaparisto viritetään eri taajuudelle kuin verkossa esiintyvät yliaallot, ja sen toimintaperiaate on kaksivaiheinen. Viritystaajuutensa alapuolelta se tuottaa kapasitiivista loistehoa, mutta viritystaajuuden yläpuolella se muuttuu

induktiiviseksi, ja näin se ei vahvista mahdollisia verkossa olevia yliaaltoja. Estokelapariston tyypillisin viritystaajuus on kolmannen ja viidennen yliaallon välissä 189 Hz, jolloin päästään 10–30 % suodatusvaikutukseen viidennen yliaallon virrasta. (Eronen et. Al. 2018)

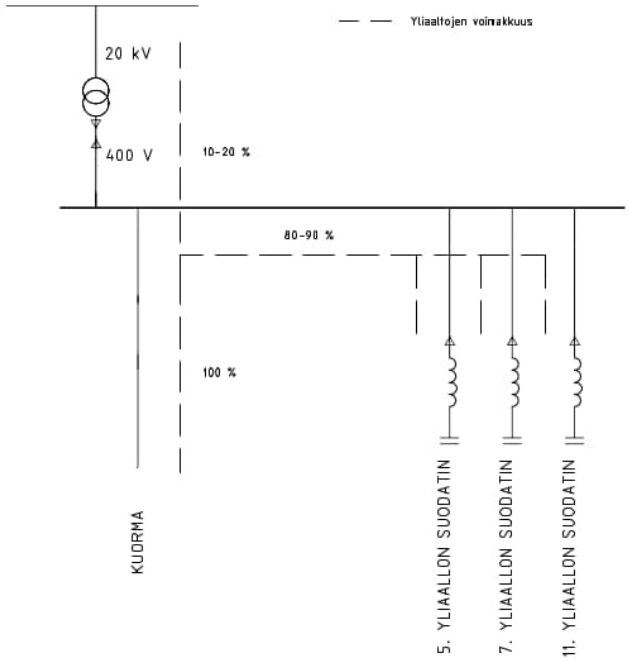
Estokelaparistoja käytetään nykyisellään yleisesti PJ- ja KJ-verkoissa metsäteollisuudessa, ja se soveltuu yliaaltopitoisten verkkojen kompensointiratkaisuksi. PJ-estokelaparistot ovat toteutettu kaapistoihin ja niitä on saatavilla 45–400 kVar kokoisina yksiköinä. Estokelaparistoja voidaan käyttää laitekohtaiseen kompensointiin tai keskusten yhteydessä keskitettynä kompensointina. KJ-verkossa estokelaparistoa voidaan käyttää katkaisijalla keskitetysti kiskostoon liitettynä erilliseen moduuliin konttiin tai kuvassa 5.2 esitettynä avolaitteistona toteutettuna.

Kuva 5.2 Keskijännite estokelaparisto avolaitteistona toteutettuna.

Kompensointiyksiköitä voidaan asentaa useampi saman säädön alle. Esimerkiksi PJ osalta voidaan asentaa useampi kaapisto yhden loistehosäätimen ohjauksen taakse. Lisäksi nykyisin ohjaus on mahdollista toteuttaa väyläliitynnällä osana tehtaan ohjausjärjestelmää.

5.2 Yliaaltosuodattimet

Metsäteollisuuden laitoksilla käytetään pääsääntöisesti passiivisilla komponenteilla toteutettuja yliaaltosuodattimia. Passiivisuodattimien lisäksi on olemassa puolijohdetekniikalla hyödyntäviä aktiivisuodattimia. Passiivisuodatin pitää sisällään kondensaattorin ja sen kanssa sarjaan kytketyn kuristinkelan, samalla tavalla kuin estokelaparisto. Passiivisuodattimen erona portaittaiseen, yksitaajuus-viritteiseen sarjaresonanssiin perustuvaan estokelaparistoon nähden on mahdollisuus suodattaa useampaa taajuutta yhdellä yksiköllä. Yliaaltosuodattimen suodatusvaikutuksen jakautuminen on esitetty kuvassa 5.3.



Kuva 5.3. Yliaaltosuodatin yksikön suodatusvaikutus PJ-verkossa aseteltuna viidennen, seitsemännen ja 11. yliaallon suodatukseen (Muokattu lähteestä Eronen et. Al. 2018).

Suodattimien tarkemman asettelun avulla on mahdollista saavuttaa jopa 80–90 % yliaaltojen suodatusvaikutus. PJ-yksiköt on tarkoitettu pääsääntöisesti kohdennettuun yliaaltojen suodatukseen, mutta samalla ne tuottavat loistehoa verkkoon. KJ-yksiköillä pyritään tuottamaan laajempi perustasoinen yliaaltosuodatus verkossa.

Passiivinen yliaaltosuodatin pitää tyypillisesti sisällään kolme erillistä sarjaresonanssipiiriä. Yliaaltosuodattimen kondensaattorin loisteho mitoitetaan vastaamaan viritystaajuutensa haluttua kompensointitasoa. Sarjaresonanssipiirit mitoitetaan kondensaattorin ja

kuristinkelan väliseltä impedanssiltaan pieniksi, jotta ne mahdollistavat yliaaltojen etenemisen suodattimelle. Yliaaltosuodattimen sarjaresonanssipiirit viritetään tyypillisimmin ainakin yleisimmille viidennelle ja seitsemännelle yliaaltotaajuudelle. Tyypillisimmin passiivisuodatinta käytetään keskitettynä kompensointina, ja se soveltuu PJ- ja KJ-verkkoihin. Passiivista yliaaltosuodatinta suunnitellessa on selvitettävä tarkasti liityttävän verkon tila, jotta yliaaltosuodattimen kondensaattori ja kuristinkela saadaan aseteltua oikein kompensoinnin suhteen. Passiivinen yliaaltosuodatin ei saa ylikuormittua, joten se on ylimitoitettava. Lisäksi epätarkasti aseteltu yliaaltosuodatin saattaa huonoimmillaan aiheuttaa yliaaltovirtojen kasvua. (Eronen et. Al. 2018)

Aktiivinen yliaaltosuodatin eli aktiivisuodatin on ohjattu virtalähde, joka toimii pienenä kompensointina ja samalla se tuottaa yliaaltovirtaa kumoavan 180°:n vastakomponentin. Aktiivisuodattimen toiminta perustuu aktiiviseen yliaaltojen mittaamiseen, joita kompensoidaan suuntaajan PWM-modulaation tuottamalla virralla. Aktiivisuodattimen etuna passiiviseen yliaaltosuodattimen nähden on monipuolinen säätömahdollisuus. Aktiivisuodattimella on mahdollista suodattaa useampia eri taajuuksia, käyttää yliaaltosuodatusta ilman loistehoa ja aktiivisen mittauksen avulla välttää rinnakkaisresonanssitilanteet. Lisäksi PJ-aktiivisuodattimien kaapit ovat fyysisesti pienempiä kuin passiivisilla yliaaltosuodattimilla. (Eronen et. Al. 2018)

Aktiivisuodatin soveltuu asennettavaksi mihin kohtaan tahansa PJ-verkkoa, ja sen sijoitus valitaan sähkön laatua heikentävät kuormat, sekä kustannustehokkuus huomioiden (Eronen et. Al. 2018). Moduulikoko PJ-aktiivisuodattimilla on tyypillisesti 180–300 A, ja niitä voidaan kytkeä monta rinnakkain. Aktiivisuodatin kompensoi ja suodattaa maksimissaan aina kapasiteettinsa verran kuorman yliaaltovirtoja, ja sen toiminta on riippumaton kompensoitavan virran suunnasta ja laadusta. Kapasiteetin ylittävät yliaaltovirrat jäävät kompensoimatta, joten aktiivisuodatin ei voi ylikuormittua. Lisäksi sen toiminta on riippumaton verkonimpedanssista, jännitteen laadusta, kuorman symmetriasta sekä vaihesiirron suunnasta. Aktiivisuodattimia on käytössä enimmäkseen kiinteistöverkoissa. Metsäteollisuuden laitoksilla ne eivät ole yleistyneet passiivisiin yliaaltosuodattimiin nähden korkeamman hintansa sekä kalliimpien käytönaikaisten kustannustensa takia.

5.3 Kompensointilaitteistojen ohjaus ja muu tekniikka

Säädettyjen kompensointiyksiköiden ohjaukseen PJ-verkossa käytetään loistehonsäätäjää. Loistehonsäätäjän toiminta perustuu kuormituksen loistehon mittaukseen, jonka perusteella se ohjaa kondensaattoriportaiden kytkentöjä. Loistehonsäätäjään pystytään määrittämään omat havahtumisrajansa induktiivisen ja kapasitiivisen loistehon suhteen. Yhdellä säätäjällä on mahdollista ohjata useampaa yksikköä, jonka lisäksi ne on mahdollista yhdistää muuhun tehtaan ohjausjärjestelmään väyläkaapeloinnilla. (TKF 2024)

Kompensointilaitteistojen kytkentä PJ-verkossa on minimissään toteutettava varokkeilla. Yleisesti kompensointilaitteistojen kytkennät PJ-verkkoon voidaan toteuttaa kompaktikatkaisijan tai kytkinvarokkeen kautta, joiden käyttäminen on suositeltavaa laitteistojen huoltamista ajatellen. PJ-verkon kompensointilaitteen ylivirta- ja oikosulkusuojaus toteutetaan tyypillisesti sulakkeella. PJ-laitteistot on varustettu tyypillisesti myös sisäisillä ylivirta- ja ylilämpöreleillä. (Eronen et. Al. 2018)

KJ-verkon kompensointilaitteistojen liitäntälaitteen valintaan vaikuttaa kondensaattoripariston teho, sekä sen haluttu kytkentätarve. Kytkentälaitteen katkaisukyvyn on riitettävä katkaisemaan kondensaattorin kapasitiivinen virta. KJ-verkon kompensointilaitteistojen liitäntälaitteina voi olla katkaisija, erotin tai kuormanerotin. KJ-verkon kondensaattoripariston kytkentätilanteiden ilmiöitä pystytään vaimentamaan ja hallitsemaan käyttämällä nollapistekatkaisijaa tai erillistä portaittaista vaimennusvastuskytkentää. Oikosulku- ja ylijännitesuojaukset KJ- ja SJ-verkoissa toteutetaan tyypillisesti suojareleillä. Lisäksi suojauksiin voidaan käyttää erilaisia tapauskohtaisia suojalaitteita tai kondensaattoripariston sisäistä epäbalanssisuojausta. (Eronen et. Al. 2018)

Nopeita kuormitusmuutoksia sisältävät verkot asettavat tarpeen nopealle kompensointitehon ohjaukselle. Tyristorikytkettyä kondensaattoriparistoa (TSC) käytetään tällaisissa verkoissa, joissa mekaaniset kytkinlaitteet eivät kykene toimimaan tarpeeksi nopeasti. Tyristorikytkimellä päästään lähes transienttivapaaseen ja äänettömään kytkentätapahtumaan, jonka tyristorikytkin on mekaanisesti kulumaton. Tyristorikytkettyyn kondensaattoriin voidaan tuoda ohjaussignaali suoraan kompensoitavalta laitteelta, ja se kykenee kytkemään minimissään yhden verkkojakson aikana kaikki kompensointiportaansa käyttöön. Kompensointiportaat koostuvat kondensaattorin ja kuristinkelan

sarjaresonanssipiiristä, jonka taajuus viritetään alemmaksi kuin alin yliaaltotaajuus. (Eronen et. Al. 2018)

Tyristorisäädetty kompensointilaitteisto on yleisesti käytössä oleva ratkaisu kohteisiin eri jännitetasoilla, joissa on tarve nopeaan loistehon säätöön. Tyristorilla säädettäviä laitteistoja voidaan myös hyödyntää mm. järjestelmissä, jotka parantavat sähköverkon tehonsiirtokapasiteettia. Tehonsiirtokapasiteettia pystytään parantamaan mm. tyristorikytketyn sarjakondensaattorin (TSSC) avulla. (GIGRE 2020)

Reaktori eli ilmasydäminen kela, on sähkönjakeluverkossa käytettävä komponentti, jolla pystytään tuomaan verkkoon induktiivista loistehoa. Itsenäisellä reaktorilla pystytään rajoittamaan oikosulkuvirtoja sekä vaimentamaan kytkentätilanteissa syntyviä ylijännitteitä. Estokelaparistoissa ja yliaaltosuodattimissa reaktoria käytetään kondensaattoripariston yhteydessä. Reaktorien yleisimpiä käyttösovelluksia ovat sarjakuristin, rinnakkaiskuristin, suodatinkuristin, vaimennuskuristin, tyristoriohjattu kuristin (TCR) sekä maadoituskuristin. (Eronen et. Al. 2018)

Sarjakuristimella voidaan rajoittaa oikosulkuvirtaa, joka mahdollistaa sähkönjakelun eri osien mitoituksen pienemmälle oikosulkuteholle. Oikosulkuvirran rajoituksen hyötynä on laiterikkoriskin hallinta. Sarjakuristin kytketään sarjaan kondensaattoripariston kanssa, ja sen kolme vaihekelaa asennetaan joko päällekkäin tai vierekkäin toisiinsa nähden. Rinnakkaiskuristimella voidaan toteuttaa sähkönjakeluverkon kapasitiivisen loistehon kompensointi verkon pienen kuormituksen aikana. Tyypillisesti rinnakkaiskuristin kytketään muuntajan tertiäärikäämiin katkaisijan avulla. (Eronen et. Al. 2018)

Suodatinkuristinta käytetään yliaaltosuodatuslaitteistojen yhteydessä harmonisten yliaaltojen suodatukseen. Suodatinkuristimella yhdessä kondensaattorin kanssa toteutetaan pieni impedanssinen sarjaresonanssipiiri halutulle yliaaltotaajuudelle, jonka vuoksi se kykenee suodattamaan yliaaltovirtoja tyypillisiltä yliaaltotaajuuksilta. Viritystaajuutta suodatinkuristimessa pystytään säätämään väliottopiirin avulla. Korkeampia yliaaltotaajuuksia suodattavaa suodatinkuristinta kutsutaan laajakaistasuodattimeksi. Suodatuskuristimien osalta loistehon kompensointilaitteistoissa ja passiivisuodattimissa voidaan vaikuttaa laitteistossa syntyviin häviöihin käyttämällä pienempi häviöisiä keloja.

Vaimennuskuristinta käytetään sarjaan kytkettynä kondensaattoripariston kanssa, ja sillä voidaan rajoittaa kompensointipariston kytkentävirtoja. Vaimennuskuristin on periaatteeltaan sarjakuristimen tapainen, tosin vaimennuskuristimella on korkeammat jännitevaatimukset. Tyristoriohjattu kuristin TCR on periaatteeltaan rinnakkaiskuristimen tapainen. Nimensä mukaisesti erona on mahdollisuus säätää tyristorin avulla kelan virtaa tehontarpeen perusteella. TCR-kuristin on yleisesti käytössä staattisen kompensaattorin (SVC) säätöratkaisuna. Lisäksi on olemassa maasulkuvirran hallintaan varten maadoituskuristin. Maadoituskuristimen kytkentä tapahtuu kolmivaihejärjestelmän tähtipisteeseen. (Eronen et. Al. 2018)

5.4 FACTS-järjestelmät

Joustava vaihtovirran siirtojärjestelmä FACTS, on tehoelektroniikkaa ja staattisia laitteita hyödyntävä sähkön laatua parantava järjestelmä. FACTS-järjestelmällä voidaan vaikuttaa sähköverkon tehonsiirtokykyyn ja ohjaukseen parantamalla transienttistabiilisuutta, jännitevakautta, sekä jännitesäädön tarkkuutta. Järjestelmän etuna on nimensä mukaisesti joustava ja nopea kyvykkyys reagoida sähköverkossa tapahtuviin muutoksiin esimerkiksi loistehon kompensointitarpeen suhteen. Pääsääntöisesti FACTS-järjestelmiä käytetäänkin loistehotasapainon ja sähkön laadun dynaamiseen ylläpitoon isoja tehovaihteluita sisältävissä siirto- ja jakeluverkoissa. (GIGRE 2020)

FACTS-järjestelmiä ovat synkronikompensaattori (SCS), staattinen loistehon kompensaattori SVC, staattinen synkronikompensaattori (STATCOM) ja tyristoriohjattu sarjakompensaattori (TCSC). Näistä SCS, SVC ja STATCOM-järjestelmillä pystytään toteuttamaan loistehon kompensointia, kun taas TCSC-järjestelmällä pystytään parantamaan sähköverkon siirtokykyä. FACTS-laitteita käytetään tyypillisimmin KJ- ja SJ-verkoissa. (GIGRE 2020)

SCS, eli synkronikompensaattori on sähköverkkoon liitetty tahtikone, jolla voidaan toteuttaa jakeluverkon loistehon kompensointi. Loistehon tuotanto verkkoon tapahtuu ylimagnetoimalla tahtikone, jota ohjataan tyypillisesti tyristorisäädetyllä magnetointijännitteellä. Normaalitilassa tahtikone on liitettynä verkkoon ilman kuormaa. Tahtikoneella pystytään kompensoimaan vain symmetrisiä loistehon muutoksia, ja sen

säätönopeus on suhteellisen hidas magnetointikäämin suuren induktanssin takia. Pyöriviä tahtikoneita on yleisesti käytössä teollisuusympäristöissä, joissa niitä pystytään hyödyntämään osana teollisuusprosessia. (Eronen et. Al. 2018)

Vaativissa olosuhteissa, joissa esiintyy nopeita jännitteen ja loistehon muutoksia voidaan kompensointiratkaisuna käyttää staattista kompensaattoria SVC. Sitä käytetään KJ-, ja SJ-verkoissa, sekä lisäksi se on käytössä teollisuusympäristössä mm. valokaariuuneissa ja kaivoshisseissä. SVC kykenee vastaamaan perustaajuudella ohjaukseen alle 10 ms, ja sen toiminta perustuu verkkojännitteen stabilointiin loistehon kompensoinnin ja yliaaltojen suodatuksen avulla. Kompensaattorin säätö perustuu TCR-kuristimella tehtävään reaktorivirran portaattomaan säätöön. Lisäksi SVC kykenee yksivaiheisen ohjauksensa ansiosta poistamaan kolmivaihekäyttöisten moottorien jännitteen epäsymmetriaa. Tyypillisesti SVC-yksikkö voi pitää sisällään tyristoriohjatun reaktorin (TCR), tyristorikytkentäiset kondensaattorit (TSC), harmoniset suodattimet sekä katkaisijalla liitetyt tai kiinteät kondensaattoriparistot. (Eronen et. Al. 2018)

STATCOM, eli staattinen synkroninen kompensaattori, on loistehon säätöön KJ- ja SJ-verkossa käytettävä kompensointilaitteisto. STATCOM toiminta perustuu sähköverkon kanssa kytkentämuuntajalla rinnankytkettyyn suuntaajaan, jolla voidaan ylläpitää kolmivaiheisen vaihtojännitteen laatua. STATCOM-suuntaaja käyttää samalla tavalla kuin aktiivisuodatin laitteessa olevaa ladattua kondensaattoriparistoa tasajännitelähteenään, jolla se stabiloi vaihtojännitettä aseteltujen parametrien mukaisesti. SVC verrattuna STATCOM mahdollistaa nopeamman ja tarkemman loistehon hallinnan, jonka lisäksi laitteisto vaatii fyysisesti vähemmän tilaa. Tällä hetkellä STATCOM-laitteistoja ei ole yleisesti käytössä metsäteollisuuden jakeluverkoissa korkeiden investointikustannusten vuoksi. (IEEE 2016a; GIGRE 2020)

Tässä luvussa käsitellyt kompensoinnin ja yliaaltosuodatuksen laitteistot on esitetty kootusti taulukossa 5.1.

Taulukko 5.1 Koontitaulukko kompensointi- ja yliaaltosuodatuslaitteistojen soveltuvuudesta eri jännitetasoille.

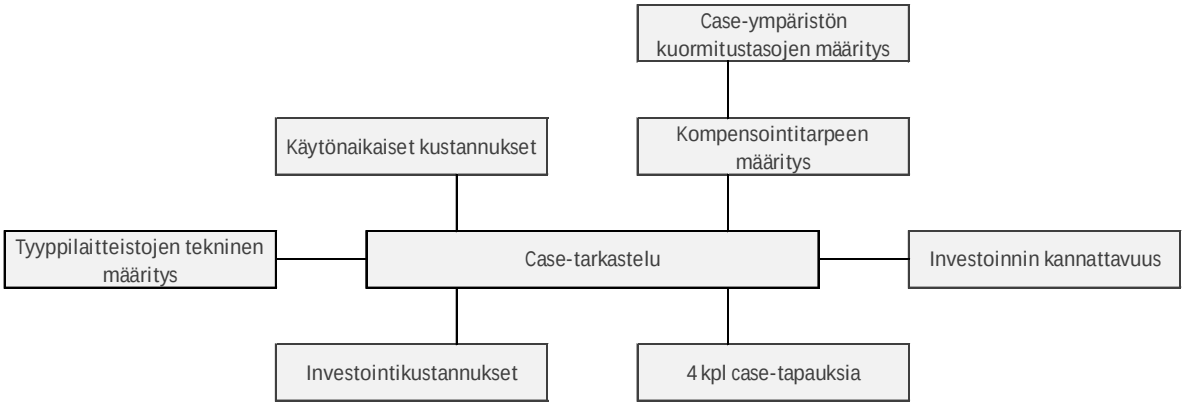
Laitteistotyyppi	Laitteisto	PJ	KJ	SJ
Kompensointilaitteistot	Rinnakkaiskondensaattoriparisto	x	x	
	Estokelaparisto	x	x	
	Tyristorikytketty kondensaattoriparisto	x	x	
Yliaaltosuodattimet	Passiivinen yliaaltosuodatin	x	x	
	Aktiivisuodatin	x		
FACTS-järjestelmät	Tahtigeneraattori SCS		x	x
	Staattinen kompensaattori SVC		x	x
	STATCOM		x	x

Taulukon 5.1 mukaisista teknisistä ratkaisuista parhaiten metsäteollisuuden laitoksen vakaan kuormituksen loistehon hallintaan sähkön laatu, ja toimintavarmuus huomioiden soveltuu estokelaparisto sekä passiivinen yliaaltosuodatin.

6 KOMPENSOINNIN JA YLIAALTOSUODATUKSEN OPTIMOINNIN TARKASTELUMETODIIKKA

Tämä case-tarkastelu toteutetaan UPM Kaukaan kahteen eri kokoiseen olemassa olevaan päämuuntajapiiriin, jotka ovat kooltaan 63 MVA ja 31,5 MVA. Päämuuntajapiirit valikoituivat tarkasteluun sillä perusteella, että ne ovat tyypillisiä metsäteollisuudessa käytettäviä muuntajakokoja ja ne syöttävät tyypillisiä metsäteollisuuden tuotantoprosesseja. Tarkastelu käsittelee yhtä päämuuntajapiiriä kerrallaan, eikä se ota huomioon muun sähköverkon aiheuttamia ilmiöitä, pl. päämuuntajan SJ-puolen tasepisteeseen meneviä kaapelointeja ja kiskostoa. Yliaaltosuodattimien käytön vaikutusta tarkastellaan erillään 63 MVA päämuuntajan osalta laskennallisesti korvaamalla 8 MVar asennettua kompensointitehoa vastaavalla määrällä yliaaltosuodattimen kompensointitehoa.

Tarkastelu suoritetaan kahden eri kokoisen päämuuntajan osalle, jotta tuloksien analysointiin saadaan näkökulmaa erilaisten kuormitusten ja verkkorakenteiden osalta. Tarkastelussa ei oteta huomioon pätötehon ja kuormituksen osalta verkkoon kytkettyä omaa tuotantoa, kuten generaattoreita. Tarkastelussa pyritään tuottamaan tarvittava loisteho kompensointilaitteistoilla siten, että päämuuntajan tasalta katsottuna loisteho olisi täysin kompensoitu. Tällöin se ei aiheuttaisi rasitteita osaltaan muihin päämuuntajapiireihin tai loistehoikkunaan nähden. Case-tarkastelussa huomioitavat seikat ovat esitetty kuvassa 6.1.



Kuva 6.1. Case-tarkasteluun vaikuttavat osatekijät laitteistoiden, kustannusten, case-ympäristön sekä kannattavuuden osalta.

Case-tarkastelua varten määritetään tyyppilaitteistot, joille määritetään yksikkökohtaiset investointi ja käytönaikaiset kustannukset. Tyyppilaitteistoilla täytetään case-ympäristön kuormitustasoon liittyen määritetty kompensointitarve erilaisilla case-tapausten mukaisilla

tyyppilaitteistojen sijoitteluperiaatteilla. Case-tapauskohtainen investoinnin kannattavuus vertaillaan nettonykyarvomenetelmällä päämuuntajapiirin alainen sähköverkon kokonaisuus huomioiden.

6.1 Tyyppilaitteistot ja yksiköiden sijoittelu

Kompensointilaitteistojen osalta tarkastelua varten määriteltiin tyyppilaitteistot erilaisille loistehokapasiteeteille eri jännitetasoille. Tarkastelussa käytetyt tyyppilaitteistot valittiin edellisessä luvussa esiteltyjen laitteistojen joukosta kirjallisuuden ja haastatteluilla saatujen käyttökokemusten perusteella. Laitteistojen soveltuvuutta arvioitiin toimintavarmuuden, turvallisuuden sekä kustannusten osalta. Tyyppiratkaisuiden tekniset tiedot on esitetty taulukossa 6.1.

Taulukko 6.1 Case-tarkasteluun valittujen tyyppilaitteistojen tekniset tiedot.

Jännitetaso	Tyyppilaitteisto	Jännite [V]	Viritystaajuus [Hz]	Loistehokapasiteetti [kVar]	Liityntä	Yliaaltojen suodatus
Pienjännite	Estokelaparisto	690 (500)	189	300	Keskuksen yhteyteen, ≤ 630 A kytkinvaroke	Vähäinen, estää vahvistumista
	Passiivisuodatin	690 (500)	250 350	170	Keskuksen yhteyteen, ≤ 630 A kytkinvaroke	Vahva, 300 A
	Aktiivisuodatin	690 (500)	2.- 50. yliaallot	40...200	Keskuksen yhteyteen, ≤ 630 A kytkinvaroke	Vahva, 180...300 A
Keskijännite	Estokelaparisto	10500	189	4000	Katkaisijalla KJ-kojeistoon	Vähäinen, estää vahvistumista
				8000		
	Passiivisuodatin	10500	250 350	4000	Katkaisijalla KJ-kojeistoon	Vahva
				8000		

Kompensoinnin sijoittelun tarkastelua varten tyyppilaitteistoiksi valikoitui 300 kVar PJ-estokelaparisto ja 4000 sekä 8000 kVar:n KJ-estokelaparistot. Lisäksi yliaaltosuodatuksen osalta määritettiin tyyppilaitteistot PJ- ja KJ-tasoille tarkasteltaviksi. Yliaaltosuodattimien osalta tyyppilaitteistoksi valikoituivat PJ-passiivi- ja aktiivisuodatin, ja KJ-passiivisuodatin. KJ-laitteistojen toteutusta tarkastellaan myös fyysisen sijoittelun näkökulmasta perinteisen laitteistotilan sekä moduuliratkaisuiden osalta. Moduuliratkaisu on sovellettavissa myös PJ-yksiköiden osalta. Passiivisuodattimia sekä estokelaparistoja on saatavilla myös vähähäviöisellä kelalla PJ- ja KJ-tasoilla, joiden käytön vaikutusta verkkohäviöihin ja kustannuksiin tarkastellaan laskennallisesti. Tyyppilaitteistojen osalta muodostettiin neljä

erilaista case-tapausta laitteistojen optimaaliseen sijoitteluun liittyen. Case-tapaukset on esitetty taulukossa 6.2.

Taulukko 6.2. Case-tapausten kompensointilaitteistojen sijoittelun pääperiaatteet.

Tarkasteltavat päämuuntajapiirit	Tyyppiratkaisuiden sijoittelun case-tapaukset
63 MVA, 115/10,5 kV, 15 %	I. Kompensointitarpeen täyttö PJ puolella II. Pääosin PJ puolella + yksi KJ-yksikkö (8 MVar) III. Pääosin KJ puolella, yksittäisiä PJ puolen yksiköitä IV. Kompensointitarpeen täyttö KJ puolella
31,5 MVA, 115/10,5 kV, 10 %	I. Kompensointitarpeen täyttö PJ puolella II. Pääosin PJ puolella + yksi KJ-yksikkö (4 MVar) III. Pääosin KJ puolella, yksittäisiä PJ puolen yksiköitä IV. Kompensointitarpeen täyttö KJ puolella

Case-tapausten määrittelyssä ohjaavana tekijänä oli saada vertailuun erilaisilla sijoitteluperiaatteilla toteutetut kokonaisuudet. Kompensointiyksiköiden sijoittelussa pyrittiin huomioimaan case-kehyksen reunaehdot, joiden puitteissa sijoittelu sähköverkkoon tehtiin mahdollisimman hyvin loistehon hallinnan näkökulmasta.

Case-tapauksista I keskittyy sähkökeskustiloihin tai vaihtoehtoisesti moduuleihin asennettavien kaapistojen käyttöön, jotka kytketään keskusten kytkinvarokelähtöihin. Suuren loistehokapasiteetin osalta keskuksiin keskitetään useampi master-slave periaatteella toimiva PJ estokelayksikkö. Case-tapauksessa I loisteho kompensoidaan lähellä kulutusta, ja yksiköt ovat hajautettuna useaan keskukseen.

Case-tapauksessa II sijoitetaan yksi KJ-estokelayksikkö katkaisijalla kytketyksi KJ-kiskostoon. KJ-estokela voi olla rakenteeltaan erilliseen rakennettavaan laitteistotilaan tai moduuliin asennettava. KJ-estokelan lisäksi käytetään PJ-estokeloja lopun kompensointitarpeen täyttämiseen. Case-tapauksessa II loistehon kompensointi on toteutettu pääosin hajautettuna PJ-keskusten yhteydessä, jota täydennetään yhdellä isommalla keskitetyllä KJ-yksiköllä. Loistehon hallinnan näkökulmasta tässä tapauksessa KJ-yksikkö toimii peruskuormana koko tarkasteltavan verkon osalta, jota täydennetään kuormituksen mukaisesti kohdennetuilla hajautetuilla PJ-yksiköillä.

Case-tapauksessa III kompensointi tapahtuu pääosin keskitettynä KJ-tasolla, jota täydennetään hajautetuilla PJ-yksiköillä keskusten yhteydessä. Loistehon hallinnan

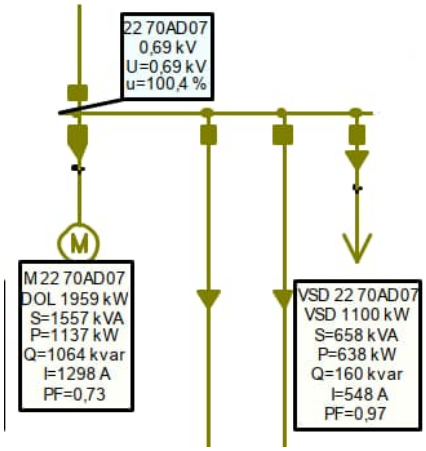
näkökulmasta osa loistehon säädöstä on tässä tapauksessa tehtävä KJ-yksiköillä, sekä valittuihin keskuksiin kohdennetuilla PJ-yksiköillä. Case-ympäristönä toimivan olemassa olevan laitoksen nykyinen loistehon kompensoinnin toteutus paristoyksiköiden osalta on lähes samankaltainen tämän case-tapauksen kanssa.

Case-tapauksessa IV loistehon kompensointi toteutetaan täysin KJ-kiskostoon keskitetyillä KJ-yksiköillä. Toteutustapa asettaa omat vaatimuksensa yksiköiden säädettävyydelle, mutta toisaalta niiden ohjaus on selkeämpää isomman yksikkökoon ansiosta. Usean KJ-yksikön osalta huomioon otettava asia on myös niiden vaatima fyysinen tilantarve.

6.1.1 Kuormitustasojen määritys

Ennen varsinaiseen tarkasteluun liittyvän verkkomallinnuksen aloittamista oli määritettävä tarkasteltavien päämuuntajien kuormitustasot. Tarkastelun kuormitustason määrityksen perustana toimi liitteessä II esitetty mittausdata KJ-kojeistolähtöjen tuntikohtaisesta pätötehon kulutuksesta helmikuulta 2023, jolloin laitos on toiminut tasaisella tuotannolla. Mittausdatan pohjalta määriteltiin selvitettävät kuormitustasot kolmelle eri tuotantoprosessin käynnin tasolle, joista oletuksena kuukauden maksimipätöteho kuvaa normaalia tuotantoa, pätötehon keskiarvo osittaista tuotantoa, sekä minimiarvo pienintä tuotannon tasoa tuolla ajanjaksolla. Case-tarkastelukohteena olevien päämuuntajien kuormitus oli suhteellisen vakaata, kuten tyypillisesti metsäteollisuuden laitoksilla. Pätötehon kuormitusvaihtelut syntyvät tiettyjen tuotantoprosessien ollessa hetkittäisesti pysähdyksissä osana normaalia tuotantoa.

Toinen oleellinen asia oli tarkentaa kuormitusten jakautuminen tarkasteltavassa sähköverkossa. Kuormien jakautumisen osalta tarvitaan tieto asennetusta kuormasta keskuksittain, joka tähän työhön liittyen pystyttiin hankkimaan riittävässä tarkkuudessa laitoksen suunnittelujärjestelmästä. Olemassa oleva simulointimalli päivitettiin saaduilla kuormitustiedoilla, joiden avulla pystyi määrittämään päämuuntajan takaisiin kuormiin vaikuttavan kuormitustason. Keskuskohtaista kuormitusten jakautumista on havainnollistettu kuvassa 6.2.



Kuva 6.2. Havainnekuva PJ-keskuksen DOL ja VSD kuormien jakautumisesta, sekä kuormatyyppikohtaisesta vaikutuksesta tehokertoimeen (PF).

Metsäteollisuuden laitoksen kuormitus voidaan pelkistäen jaotella suorakäyttöisiin DOL-, sekä taajuusmuuttajakäyttöisiin VSD-kuormiin. Verkkotarkastelun suhteen näiden kuormien erottelu on tärkeää, sillä niiden tehokertoimet eroavat paljon toisistaan niiden käyttäytyessä eri tavoilla kuormitustason muuttuessa. VSD-käytöt säilyttävät tehokertoimensa vakiona kuormituksesta riippumatta, kun taas DOL-käyttöjen tehokerroin muuttuu suhteessa kuormitukseen. Näin ollen DOL-käyttöjen tehokertoimella on suuri vaikutus tarkasteltavan verkon kokonaistehokertoimeen. Kompensointitarpeen laskentaa varten määritetty kuormituksen lähtötilanne on esitetty alla olevassa taulukossa 6.3.

Taulukko 6.3. Lähtötilanne tarvittavan kompensoinnin määrittelyyn päämuuntajapiireille eri kuormitustasoilla.

Tarkasteltavat päämuuntajapiirit	Tuotanto	Päämuuntajan kuomitustaso [%]	Asennetun kuormituksen kokonaistehokerroin [cos(φ)]
63 MVA, 115/10,5 kV, 15 %	Normaali	58 %	0,79
	Tuotanto -17 %	48 %	0,72
	Tuotanto -48 %	30 %	0,61
31,5 MVA, 115/10,5 kV, 10 %	Normaali	52 %	0,77
	Tuotanto -35 %	33 %	0,72
	Tuotanto -55 %	24 %	0,50

Taulukossa 6.3 esitetyt kuormituksen kokonaistehokertoimet on määritetty yhtälön 3.5 sekä kuormitustason yhtälön 3.3 perusteella. Yksityiskohtaisempi taulukko kuormitusten jakautumisesta kuormatyypeittäin on esitetty liitteessä III.

6.1.2 Päämuuntajapiirikohtaisen kompensointitarpeen määritys

Loistehon kompensointitarve on riippuvainen tarkasteltavan kohteen kuormitustasosta ja tehokertoimesta. Case-tarkastelussa kompensointitarve määritettiin laskemalla yhtälön 3.22 ja liitteen I taulukon avulla eri kuormitustilanteille. Taulukossa 6.4 esitetään laskennallisen kompensointitarve (MVar) eri kuormitustilanteissa.

Taulukko 6.4. Tarkasteltavien päämuuntajapiirien eri kuormitustasojen laskennalliset kompensointitarpeet.

Tarkasteltavat päämuuntajapiirit	Tuotanto	Päämuuntajan kuomitustaso [%]	Laskennallinen kompensointitarve [MVar]
63 MVA, 115/10,5 kV, 15 %	Normaali	58 %	33,5
	Tuotanto -17 %	48 %	34,2
	Tuotanto -48 %	30 %	29,7
31,5 MVA, 115/10,5 kV, 10 %	Normaali	52 %	11,6
	Tuotanto -35 %	33 %	8,6
	Tuotanto -55 %	24 %	11,2

Laskennallinen kompensointitarve toimi lähtöarvona verkkomallinnusta varten yksiköiden kappalemäärän määritykseen. Laskennallinen kompensointitarve case-tapauksittain täytettiin määritetyillä tyyppilaitteistoilla. Lisäksi laskennallinen kompensointitarve toimii vertailukohtana verkkomallinnusta varten kompensointitehon sijoittelun arvioinnissa eri case-tapausten välillä.

6.2 Verkkomallinnus

Case-tapausten verkkomallinnus suoritettiin Neplan-verkostolaskentaohjelmalla, joka sisälsi jo valmiiksi olemassa olevan case-ympäristön jakeluverkon ja tarkastelukohteena olevat päämuuntajapiirit. Jakeluverkkoon tehtiin tarvittavat päivitykset edellä mainittujen kuormien, kuormitustasojen ja tehokertoimien käyttäytymisen suhteen. Tämän jälkeen ohjelmaan täydennettiin tarkastelua varten määritetyt tyyppilaitteistot teknisine arvoineen. Verkkomallinnuksen avulla oli mahdollista tarkastella case-ympäristön laajuudessa sähkönjakeluverkkoa ja arvioida eri toteutustyylien suhteen ilmenneitä asioita.

Case-tarkastelun suhteen verkkomallinnuksessa tärkeimmät huomioon otettavat asiat olivat loistehokapasiteetin sijoiteltu määrä, tarkasteltavan verkon häviöiden jakautuminen sekä loisteho tasapaino. Taloudellisuuden osalta katsottuna kompensointiyksiköiden sijoittelulla ja yksiköiden määrällä on merkitystä kertaluonteisiin investointikustannuksiin, kun taas häviöt vaikuttavat käytönaikaisiin toistuvaluonteisiin kustannuksiin. Häviöiden

jakautumisen tarkemmalla tarkastelulla on mahdollista löytää case-tapausten väliset erot toistuvaluonteisien elinkaarikustannusten suhteen.

Tarkastelussa arvioidaan verkon kompensointitarpeen täyttöä päämuuntajan tasalta katsottuna, mutta verkkomallinnuksen avulla voidaan arvioida tarkemmin yksittäisen yksikön sijoittelua ja sen vaikutusta kokonaisuuteen. Yksityiskohtaisempi tarkastelu korostuu varsinkin PJ-yksiköiden osalta, sillä yli- ja alikompensoinnilla on vaikutusta keskusten jännitteisiin, johon ne ovat liitettynä. Tosin ylikompensointiin keskuksella voidaan vaikuttaa kompensointiyksikön portaittaisen säädön ansiosta, jota tässä tarkastelussa ei erikseen mallintamalla tarkasteltu. Oletuksena portaittaisen säädön osalta oli, että kompensointiyksiköiden määrä perustuu tarvittavan loistehon maksimikapasiteetin tuottoon, joka kattaa myös oman säätökapasiteettinsa ansiosta pienemmätkin loistehotarpeet.

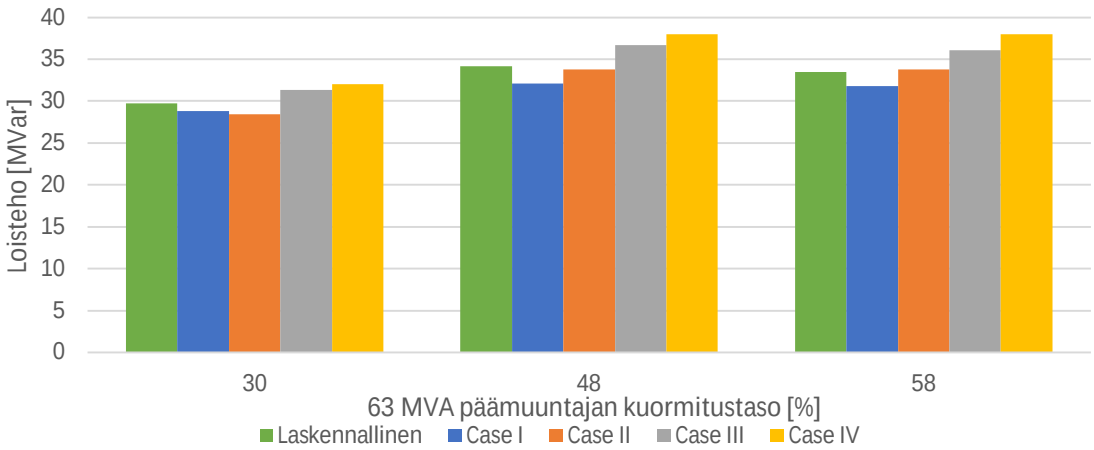
Case-tarkastelun osalta yksittäisten PJ-keskusten loistehotarvetta ei laskettu erikseen, vaan se määriteltiin puhtaasti verkkomallinnuksessa. Kompensointilaitteistojen sijoittelu tehtiin PJ-keskuksia syöttävän jakelumuuntajan tehokertoimeen sekä keskuksen kiskoissa vaikuttavaan jännitetasoon peilaten. Verkkomallinnuksella tehdyn teknisen tarkastelun ja valittujen taloudellisuuslaskelmaperiaatteiden avulla on mahdollista suorittaa case-tapausten keskinäinen vertailu.

7 CASE-TARKASTELU

Tämä luku esittelee työn kannalta keskeisimmät tulokset case-tapauksissa tarvittaviin kompensointilaitteistoihin, sekä niiden teknistaloudellisiin vaikutuksiin liittyen. Teknisten vaikutusten suhteen tarkastellaan kompensointiyksiköiden sijoittelusta johtuvia vaikutuksia sekä häviöiden jakautumista jakeluverkossa.

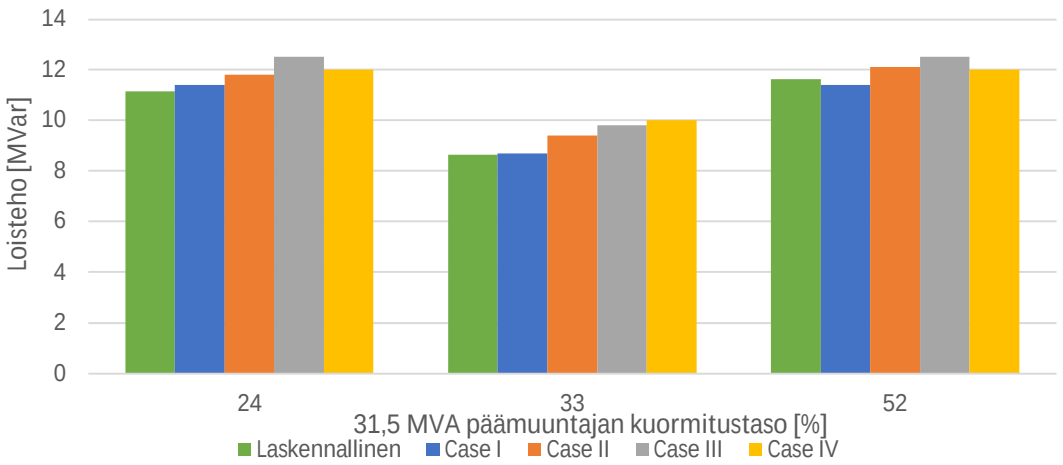
7.1 Tekninen tarkastelu

Loistehon osalta case-tarkastelussa otetaan huomioon asennetun loistehokapasiteetin määrä eri kuormitustilanteissa. Optimaalinen sijoittelu ja case-tapauskohtaiset tulokset pystyttiin määrittämään verkkomallinnuksen avulla. Laskennallinen päämuuntajan loistehokapasiteetti oli sama kaikille case-tapauksille ja se toimi vertailuarvona tulosten vertailua varten. Tarkasteltavista päämuuntajista 63 MVA päämuuntajan loistehokapasiteetit (MVar) case-tapauksittain eri kuormitustasoilla on esitetty kuvassa 7.1.



Kuva 7.1. Verkkomallinnuksella tarkastellun loistehokapasiteetin [MVar] määrä case-tapauksittain eri kuormitustasoilla [%] 63 MVA päämuuntajan osalta verrattuna yhtälöllä 3.22 määritettyyn laskennalliseen loistehokapasiteettiin.

Mallinnetun loistehon arvot ovat lähempänä laskennallista case-tapauksissa, joissa kompensointi tehdään pääasiassa PJ-tasolla. Vastaava tarkastelu tehtiin myös 31,5 MVA päämuuntajan osalta, jonka tulokset on esitetty kuvassa 7.2.



Kuva 7.2. Verkkomallinnuksella tarkastellun loistehokapasiteetin [MVar] määrä case-tapauksittain eri kuormitustasoilla [%] 31,5 MVA päämuuntajan osalta verrattuna yhtälöllä 3.22 määritettyyn laskennalliseen loistehokapasiteettiin.

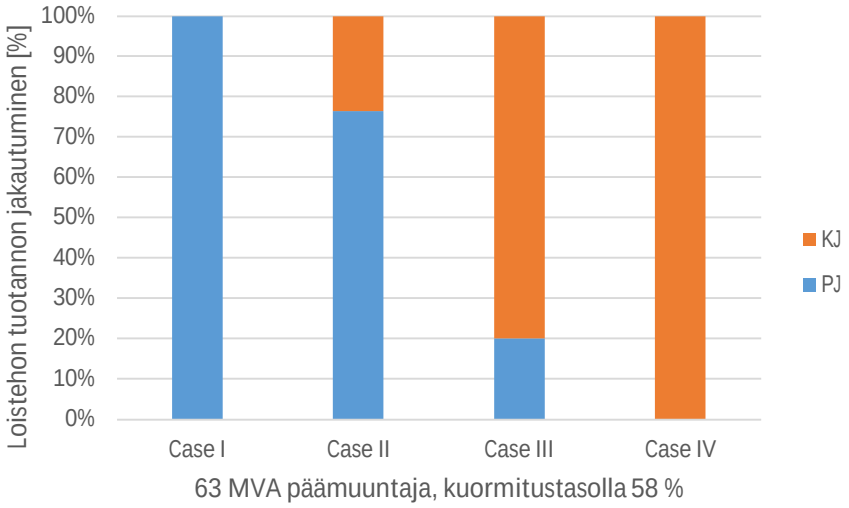
Pienemmän 31,5 MVA päämuuntajapiirin osalta erot loistehon suhteen ovat pienempiä verrattuna isompaan 63 MVA päämuuntajaan verrattuna. Tuloksista kuitenkin on huomattavissa vastaavasti kuin edellä, että PJ-tasolla tehty kompensointi on lähimpänä laskennallista arvoa. Erot mallinnetun ja laskennallisen kuormituksen välillä muodostuvat tarkasteltavan sähköverkon johdoissa ja muuntajissa syntyvien loistehohäviöiden, sekä PJ-tasolla pienempien yksiköiden mahdollistaman kohdistetun sijoittelun ansiosta. Tarkemmat tapauskohtaiset verkkomallinnuksella saadut loistehon arvot on esitetty liitteessä IV.

Kompensointiyksiköiden määrät case-tapauksittain määritettiin verkkomallinnuksen avulla. Yksiköiden määrät ja tyyppi vaikuttaa investointikustannuksiin. Case-tapauskohtaiset yksiköiden määrät sekä asennettu kokonaisloistehokapasiteetti 63 MVA päämuuntajan osalta 58 % kuormitustasolla on esitetty taulukossa 7.1.

Taulukko 7.1. 63 MVA päämuuntajan 58 % kuormitustason kompensointiyksiköiden määrät ja asennettu kokonaisloistehokapasiteetti eri case-tapauksissa.

Yksikkö [MVar]	Kappalemäärät			
	Case I	Case II	Case III	Case IV
PJ 0,3	106	86	27	0
KJ 4	0	0	1	1
KJ 8	0	1	3	3
*KJ 10	0	0	0	1
Q YHT	31,8	33,8	36,1	38

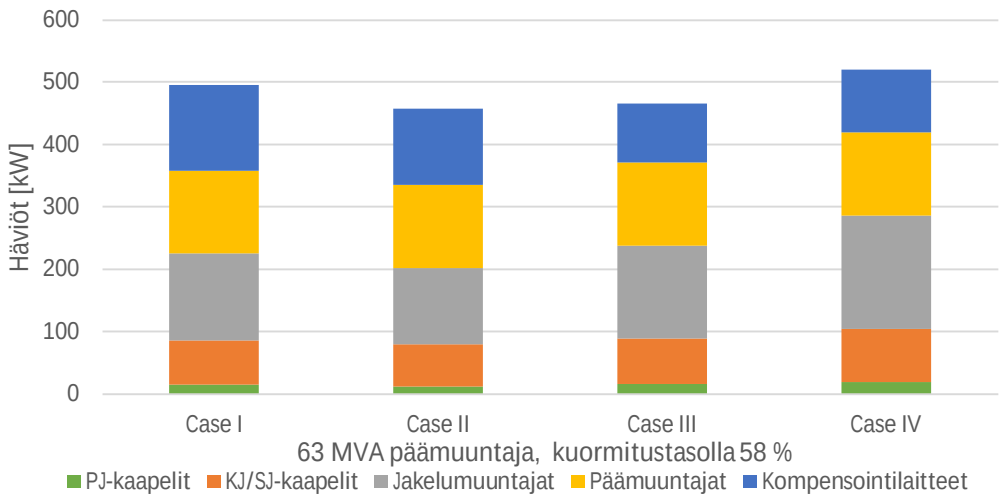
Kompensointilaitteistojen kappalemäärään perustuva case-asettelun mukainen loistehon tuotanto jakautui jännitetasojen välillä vastaavasti edellä esitetyssä tapauksessa kuvan 7.3 mukaisesti.



Kuva 7.3. Loistehon tuotantokapasiteetin jakautuminen [%] PJ ja KJ osalta eri case-tapauksisssa 63 MVA päämuuntajan osalta 58 % kuormitustasolla.

Kuormitustason vaihtelulla on vaikutusta loistehon tuotannon prosentuaaliseen jakautumiseen jännitetasojen välillä case-tapausten II ja III osalta. Loistehon tuotantokapasiteetin jakautumisen vaihtelu 63 MVA päämuuntajapiirillä on case II osalta 5 % ja case III osalta 13 %. Vastaavat arvot 31,5 MVA päämuuntajapiirillä ovat case II osalta 10 % ja case III osalta 18 %. Tarkemmat kappalemäärät sekä loistehon tuotannon jakautuminen case-tapauksittain on esitetty liitteessä V.

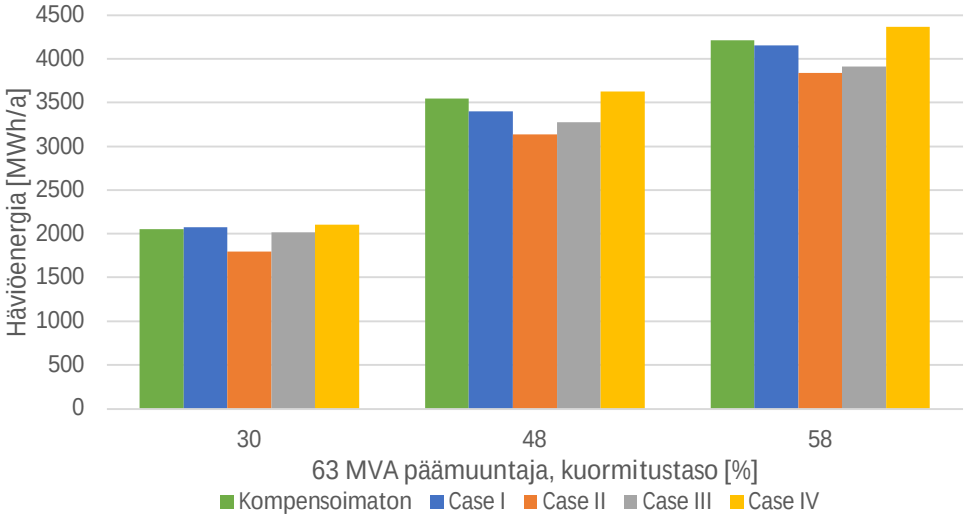
Pätötehohäviöt aiheuttavat käytönaikaisia toistuvaluonteisia kustannuksia. Verkkomallinnuksen avulla suoritettiin tarkasteltavan jakeluverkon kokonaisvaltainen häviöiden tarkastelu, joka huomioi eri jännitetasojen johdoissa ja muuntajissa syntyvät häviöt. Lisäksi tarkastelu huomioi kompensointilaitteistoissa syntyvät pätötehohäviöt. Häviöiden jakautuminen case-tapauskohtaisesti 63 MVA osalta edellä mainitulla kuormitustasolla on esitetty kuvassa 7.4.



Kuva 7.4. Häviöiden [kW] muodostuminen jakeluverkon osissa 63 MVA päämuuntajapiirillä 58 % kuormitustasolla eri case-tapauksissa.

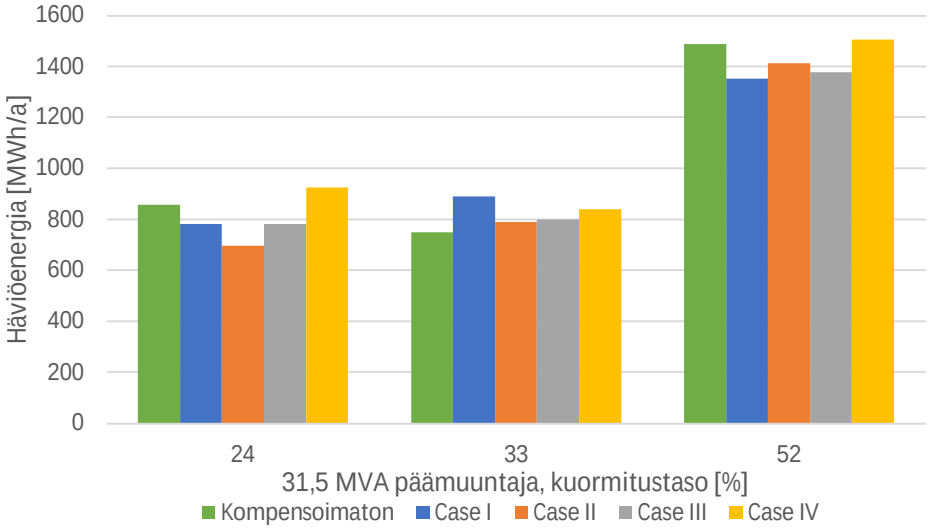
Häviöiden muodostumisen osalta voidaan havaita, että kompensoinnin sijoittelulla pystytään vaikuttamaan isoimmin jakelumuuntajissa sekä KJ/SJ-kaapeleissa syntyviin pätötehohäviöihin. Lisäksi itse kompensointilaitteissa syntyvien pätötehohäviöiden osuus on merkittävässä osassa kokonaishäviöistä. Eri kuormitustasojen osalta pienimmän ja suurimman häviöiden määrän ero toisistaan case-tapausten välillä on 63 MVA päämuuntajapiirin osalta 12–24 %, ja 31,5 MVA päämuuntajapiirin osalta 10–24 %. Tarkemmat case-tapauskohtaiset häviöt on esitetty liitteessä VI.

Elinkaarikustannusten tarkastelua varten on määritettävä häviöenergian määrä vuositasolla. Määritystä varten huipunkäyttöajaksi valitaan 8400 h metsäteollisuuden laitoksen arvioidun todellisen vuotuisen käyttöajan perusteella. Häviöenergian määrä (MWh/a) 63 MVA päämuuntajan osalta eri kuormitustasoilla case-tapauksittain kompensoimattomaan verkkoon verrattuna on esitetty kuvassa 7.5.



Kuva 7.5. Vuotuinen häviöenergia [MWh/a] kompensoimattomassa sähköverkossa, sekä case-tapauksittain 63 MVA päämuuntajapiirillä eri kuormitustasoilla [%].

Kompensoimattomaan sähköverkkoon verrattuna 63 MVA päämuuntajapiirin osalta vuotuinen kokonaishäviöenergia pienenee case-tapauksissa II ja III kaikilla kuormitustasoilla. Case-tapauksessa I häviöt ovat lähellä kompensoimattoman verkon arvoa ja case-tapauksen IV osalta häviöt ovat hieman korkeammat. Pienempi tehoisemman 31,5 MVA päämuuntaja osalta vastaavat tiedot on esitetty kuvassa 7.6.

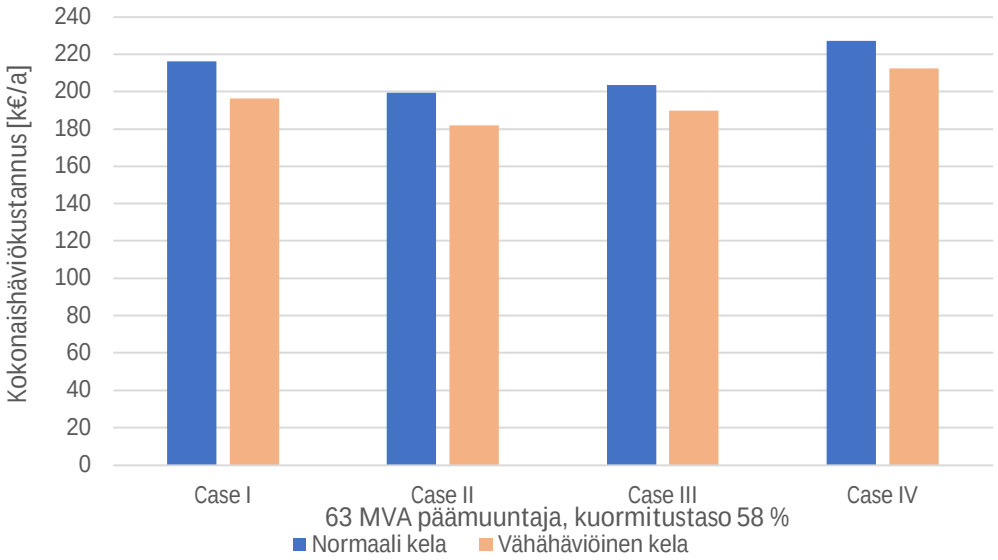


Kuva 7.6. Vuotuinen häviöenergia [MWh/a] kompensoimattomassa sähköverkossa, sekä case-tapauksittain 31,5 MVA päämuuntajapiirillä eri kuormitustasoilla.

Kompensoimattomaan sähköverkkoon verrattuna 31,5 MVA päämuuntajapiirillä vastaavasti on nähtävissä vaihtelua kokonaishäviöenergian suhteen case-tapausten I, II ja III välillä. Case-tapaus IV osalta on huomattavissa vastaavasti kuin edellä kompensoimatonta verkkoa

korkeammat kokonaishäviöt. Case-tapausten kokonaishäviöenergian vaihtelun osalta suurimmat muutokset johtuvat tekokertoimen vaihtelusta, sekä kompensointitarpeen kohdistamisen epätarkkuudesta varsinkin KJ-yksiköiden osalta.

Vuotuiset häviökustannukset määritetään häviöenergian sekä sähköenergian hinnan avulla. Häviöenergian hintana tässä tarkastelussa käytettiin 52 €/MWh, joka perustuu Nord Pool-sähköpörssin vuoden 2023 kuukauden tuntikohtaisen keskiarvoon. Häviöihin on mahdollista vaikuttaa valitsemalla kompensointilaitteistoihin vähähäviöiset kelat, jotka pienentävät kompensointilaitteistojen pätötehohäviöitä. Tässä tarkastelussa vähähäviöisen kelan käytön vaikutus kompensointilaitteessa syntyviin häviöihin on -33 %. Vuotuiset kokonaishäviökustannukset (€/a) käyttäen normaalia tai vähähäviöistä kelaa case-tapauksittain 63 MVA 58 % kuormitustasolla on esitetty kuvassa 7.7.

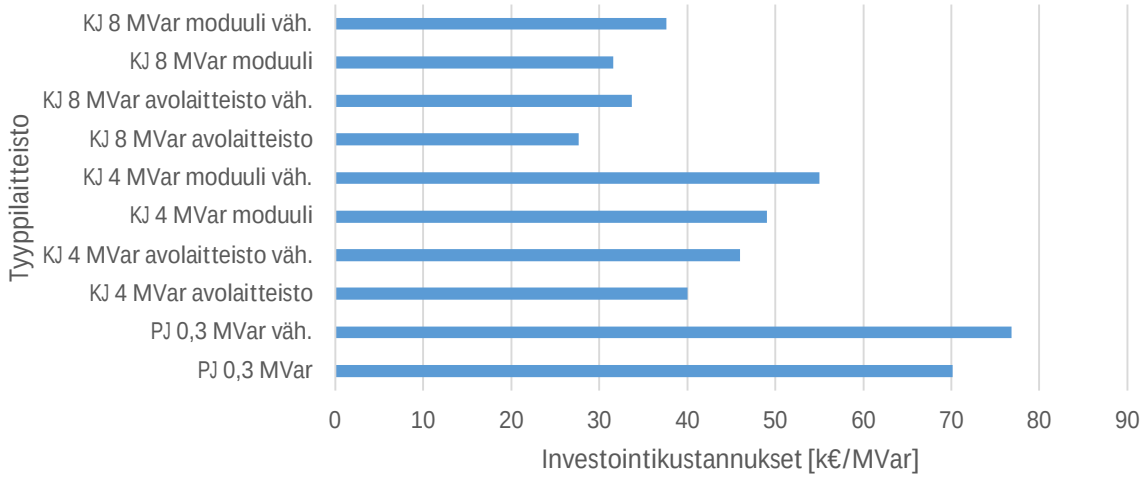


Kuva 7.7. Kokonaishäviökustannukset [k€/a] eri case-tapauksissa normaalilla ja vähähäviöisellä kelalla toteutuilla kompensointilaitteistoilla 63 MVA päämuuntajapiirillä 58 % kuormitustasolla.

Vähähäviöisen kelan käytön osalta suurin vaikutus häviökustannuksiin saadaan aikaan case-tapauksissa, joissa on isoimmat kompensointilaitteistoista johtuvat pätötehohäviöt. Prosentuaalisesti 63 MVA päämuuntajapiirin osalta 58 % kuormitustasolla case I ja II osalta saavutetaan -9 % vaikutus vuotuisiin häviökustannuksiin. Vastaava lukema case III osalta on -7 % ja case IV osalta -6 %. Tarkemmat päämuuntajapiirikohtaiset vuotuiset häviökustannukset, sekä vähähäviöisen kelan vaikutukset niihin on esitetty liitteessä VII.

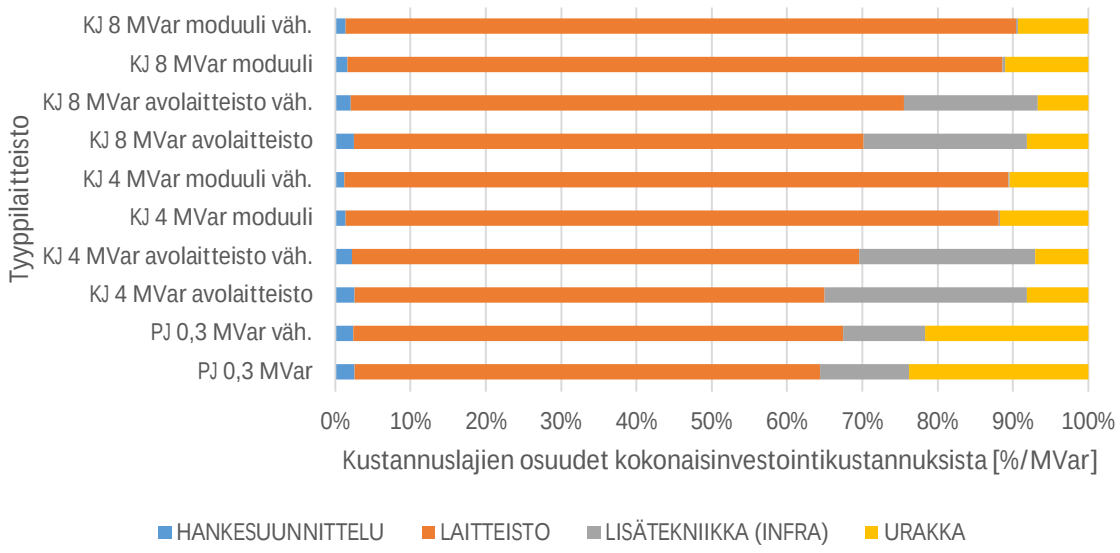
7.2 Tyyppilaitteistojen yksikkökustannukset

Tyyppilaitteistojen yksikkökustannusten avulla voidaan laskea lopullinen investointikustannus case-tapauksissa. Investointikustannuksissa otettiin huomioon laitteistokohtaisesti hankesuunnitteluun, laitteistohankintaan, infraan ja urakointiin liittyvät kustannukset. Kuvassa 7.8 esitetään case-tarkastelua varten määritettyjen estokela tyyppilaitteistojen investointikustannukset (€/MVar).



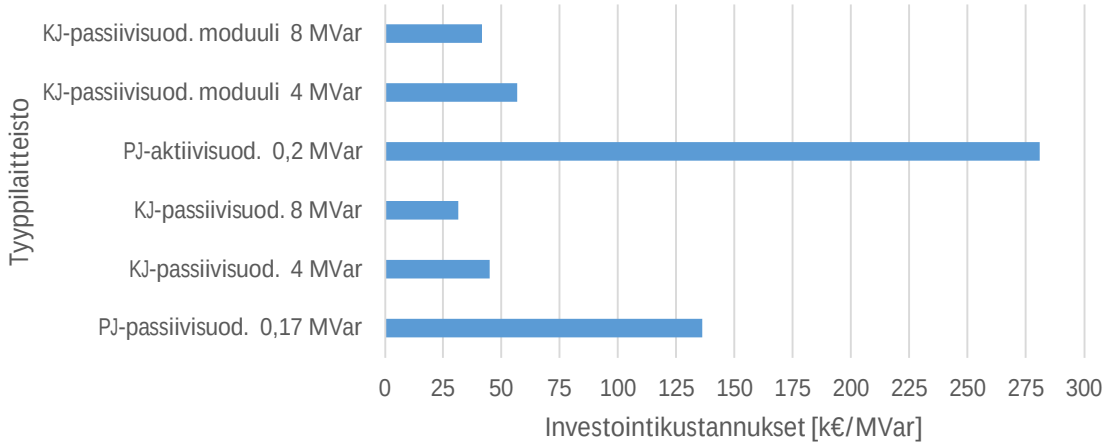
Kuva 7.8. Estokela tyyppilaitteistojen investointikustannukset [k€/MVar].

Estokelaparistojen osalta investointikustannukset ovat halvempia, jos investoidaan isompiin yksiköihin. KJ-tasolla moduuliin toteutettujen laitteistojen investointikustannukset ovat avolaitteistoon verrattuna 4 MVar osalta n. 22 % ja 8 MVar osalta n. 14 % isommat. Vaihtoehtoisten vähähäviöisten KJ-laitteistojen osalta investointikustannus perustuu laskennalliseen arvioon. Estokela tyyppilaitteistojen investointikustannusten prosentuaalinen jakautuminen (%/MVar) kustannuslajeittain on esitetty kuvassa 7.9.



Kuva 7.9. Estokela tyyppilaitteistojen investointikustannusten jakautuminen kustannuslajeittain [%/MVar].

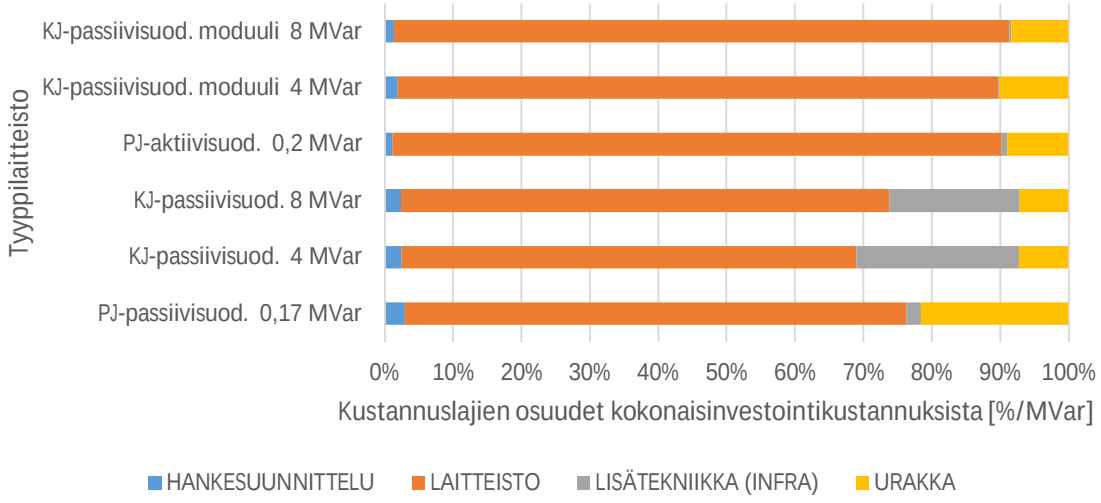
Estokela tyyppilaitteistojen hankinnasta johtuva kustannus on suurin yksittäinen kustannuslaji investointikustannuksiin liittyen. Pienemmillä laitteistoilla urakan osuus on isompi verrattuna isompiin yksiköihin. Moduuliratkaisuilla laitteistokustannus on isossa osassa investointikustannuksia, mutta tarve lisätekniikalle avolaitteistoon nähden on huomattavasti pienempi. Yliaaltosuodatin tyyppilaitteistojen osalta investointikustannukset (€/MVar) on esitetty kuvassa 7.10.



Kuva 7.10. Yliaaltosuodatin tyyppilaitteistojen investointikustannukset [k€/MVar].

Yliaaltosuodatin tyyppilaitteistojen osalta suurempien yksiköiden investointikustannukset ovat halvempia pieniin yksiköihin nähden. Lisäksi puolijohdetekniikkaa hyödyntävä aktiivisuodatin on huomattavasti kalliimpi ratkaisu passiivisilla komponenteilla toteutettuun

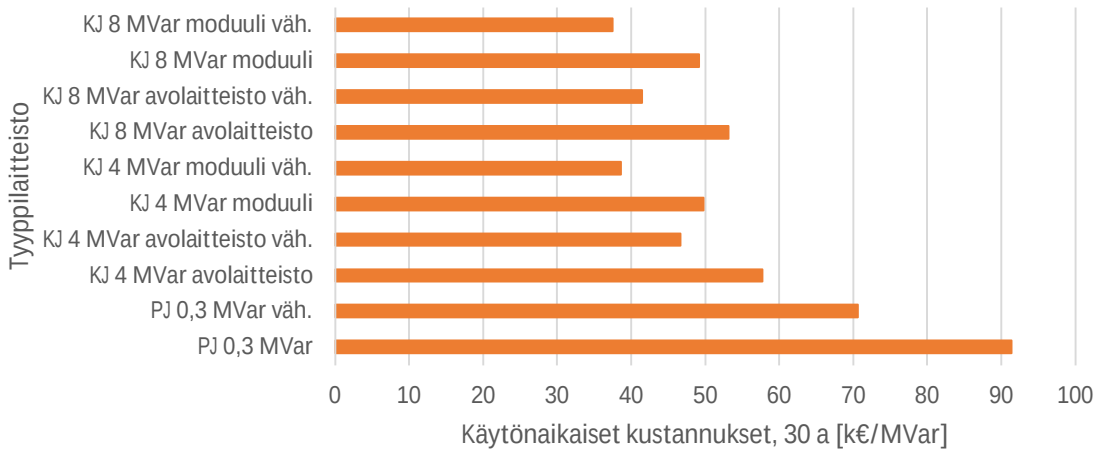
passiivisuodattimeen nähden. Moduuliin toteutettujen yliaaltosuodattimien investointikustannukset ovat kalliimpia avolaitteistoon nähden samalla tavalla kuin estokelaparistojen osalta. Kuva 7.11 esittää yliaaltosuodatin tyyppilaitteistojen investointikustannusten prosentuaalisen jakautumisen (%/MVar) kustannuslajeittain.



Kuva 7.11. Yliaaltosuodatin tyyppilaitteistojen investointikustannusten jakautuminen kustannuslajeittain [%/MVar].

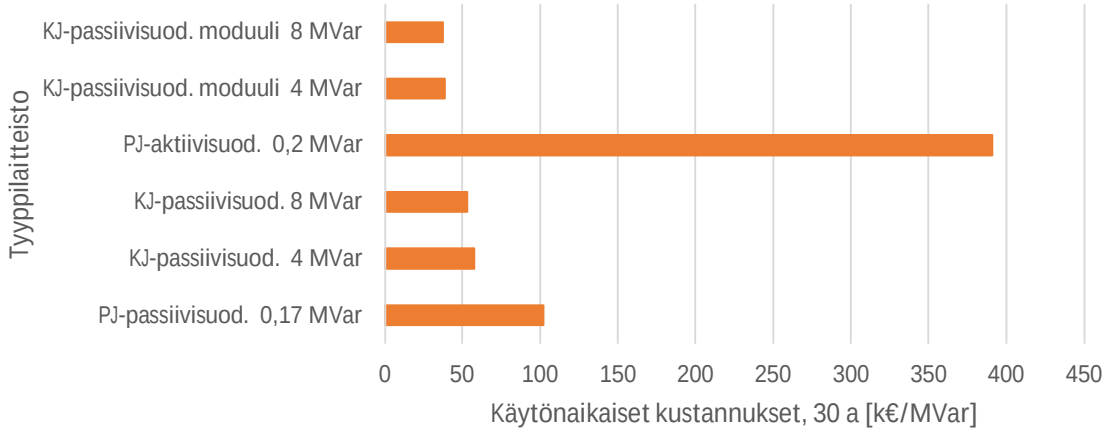
Yliaaltosuodatin tyyppilaitteistojen osalta kustannukset jakautuvat lähes vastaavalla tavalla kuin estokelan osalta. Vastaavan kompensointikapasiteetin omaava yliaaltosuodatin on kustannuksiltaan kalliimpi estokelaan verrattuna, jolloin itse yliaaltosuodatinlaitteiston osuus on isompi investointikustannuksista.

Tyyppilaitteistojen käytönaikaisten kustannusten avulla voidaan vertailla laitteistojen teknisiä ominaisuuksia. Laitteistokohtaiset käytönaikaiset toistuvaluonteiset kustannukset tarkastellaan koko laitteistojen oletetun elinkaaren ajalle, joka on tässä tarkastelussa 30 vuotta. Käytönaikaiset kustannukset ottavat huomioon huolto-ohjelmien mukaisista huolloista koituvat kustannukset, sekä lisäksi kompensointilaitteistosta johtuvat häviökustannukset. Estokela tyyppilaitteistojen käytönaikaiset toistuvaluonteiset kustannukset (€/MVar) on esitetty kuvassa 7.12.



Kuva 7.12. Estokela tyyppilaitteistojen käytönaikaiset kustannukset [k€/MVar] 30 vuoden elinkaaren ajalta.

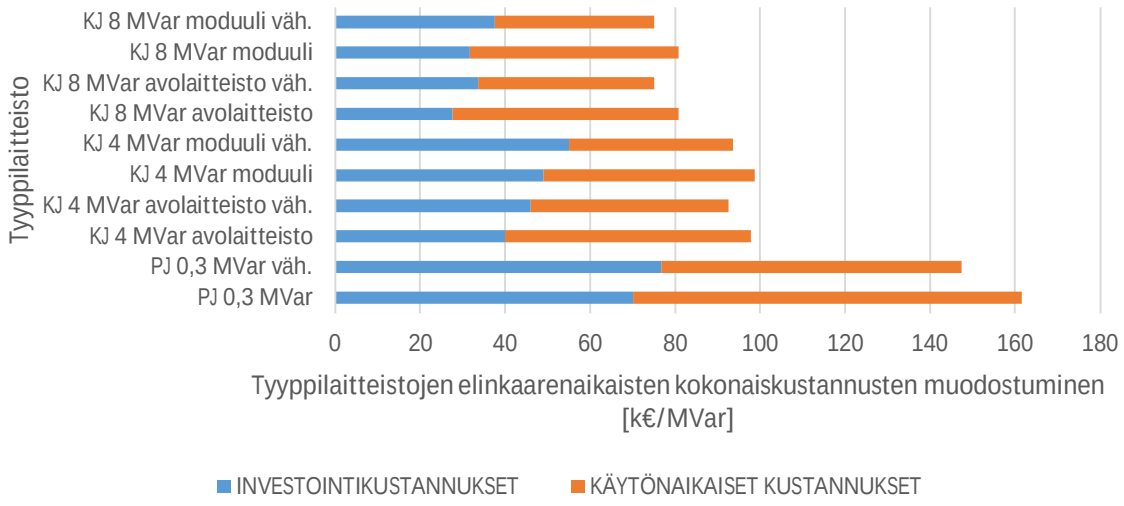
Käytönaikaiset kustannukset ovat suurimmat PJ-estokeloilla isomman huoltotarpeen vuoksi. KJ-estokelojen osalta moduulitoteutusten käytönaikaiset kustannukset ovat avolaitteistoja pienemmät halvempien huoltokustannusten vuoksi. Vähähäviöisen kelan käytöllä saavutetaan PJ-laitteiston osalta -23 % vaikutus käytönaikaisiin kokonaiskustannuksiin. KJ-laitteistojen osalta vastaava vaikutus on isoimmillaan -24 %. Yliaaltosuodattimien osalta vastaava tarkastelu on esitetty kuvassa 7.13.



Kuva 7.13. Yliaaltosuodatin tyyppilaitteistojen käytönaikaiset kustannukset [k€/MVar] 30 vuoden elinkaaren ajalta.

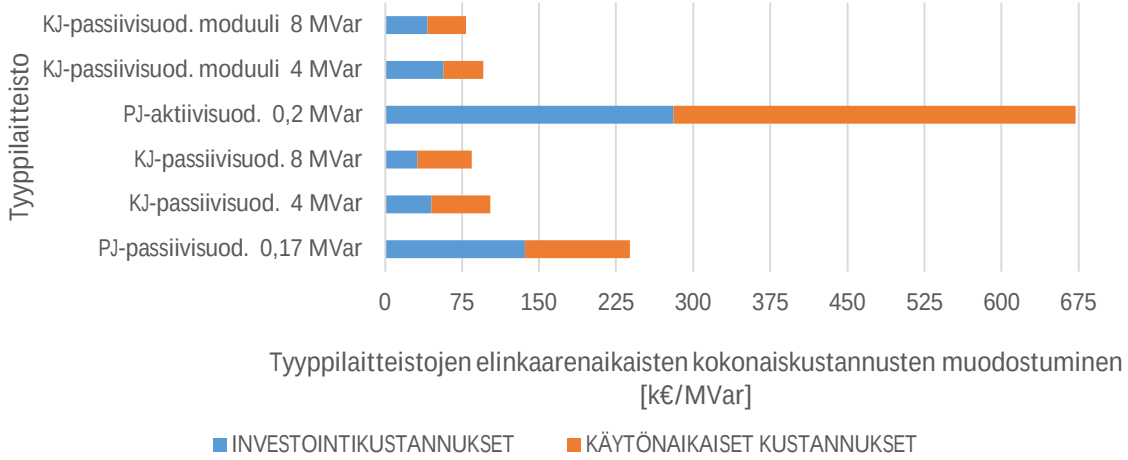
Yliaaltosuodattimien käytönaikaisten kustannusten osalta aktiivisuodatin on selvästi kallein kustannuksiltaan. Yliaaltosuodattimien osalta moduuliratkaisujen käytönaikaiset kustannukset ovat pienemmät samalla tavalla kuin estokela tyyppiratkaisuiden osalta. Laitteiston elinkaarikustannuksen muodostumista kertaluonteisen investointikustannuksen

ja toistuvaluonteisten kustannusten osalta voidaan vertailla kokonaiskustannusten kautta. Estokela tyyppiratkaisuiden osalta kokonaiskustannukset (€/MVar) ovat esitetty kuvassa 7.14.



Kuva 7.14. Estokela tyyppilaitteistojen elinkaarenaikaisten kokonaiskustannusten jakautuminen [k€/MVar] 30 vuoden elinkaaren ajalta.

Isompien yksiköiden kokonaiselinkaarikustannukset ovat pienemmät muihin verrattuna. Isompien yksiköiden osalta suurin vaikutus tulee halvemman investointikustannuksen takia. Yliaaltosuodatin tyyppilaitteistojen osalta suoritettu vastaava tarkastelu on esitetty kuvassa 7.15.



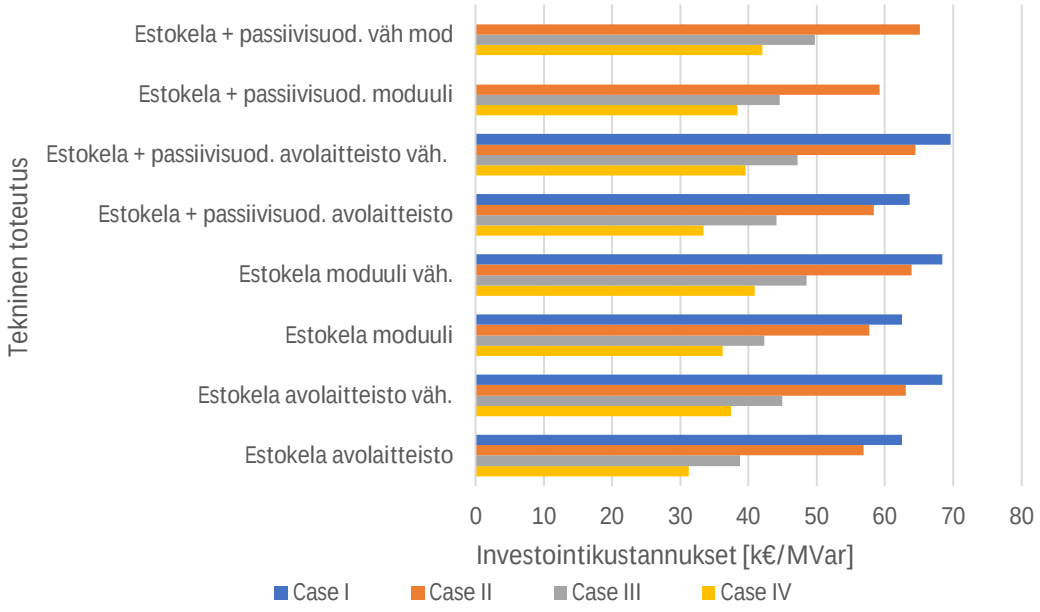
Kuva 7.15. Yliaaltosuodatin tyyppilaitteistojen kokonaiskustannusten jakautuminen [k€/MVar] 30 vuoden elinkaaren ajalta.

Yliaaltosuodattimien osalta on huomattavissa vastaava ilmiö kuin estokela tyyppiratkaisuiden osalta isojen yksiköiden ollessa pienempiä kustannuksiltaan.

Tyyppilaitteistokohtaisten elinkaarikustannusten muodostuminen on esitetty tarkemmin liitteessä VIII.

7.3 Case-tapausten investoinnin kannattavuus

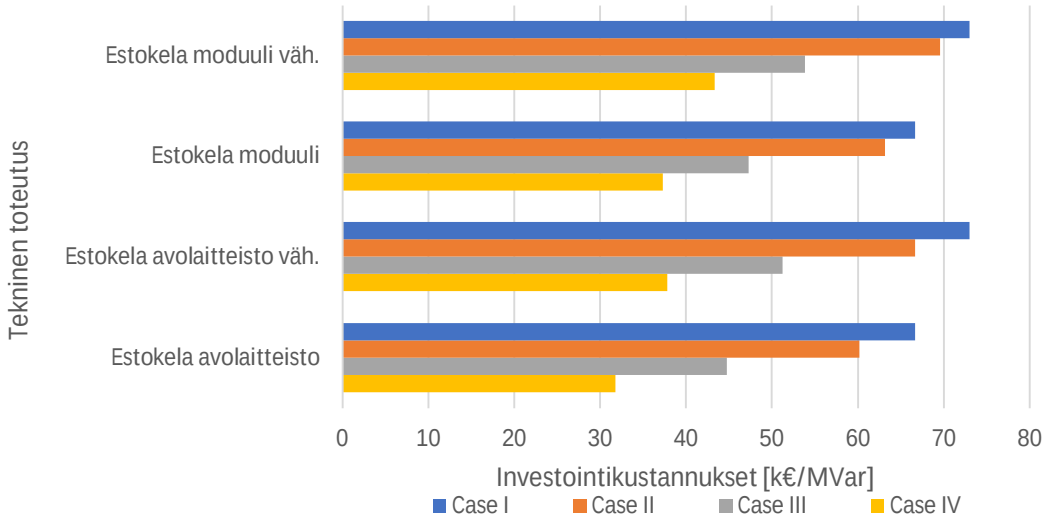
Case-tapausten kokonaisinvestointi eli kertaluonteinen pääomakustannus muodostuu, kun kerrotaan case-tapauskohtaiset tyyppilaitteistojen määrät yhden tyyppilaitteiston investointikustannuksella. Case-tapauskohtaiset investointikustannukset (€/MVar) 63 MVA päämuuntajapiirin 58 % kuormitustason osalta eri tekniikoilla toteutettuna on esitetty kuvassa 7.16.



Kuva 7.16. Case-tapauskohtaiset investointikustannukset [k€/MVar] eri tekniikoilla toteutettuna 63 MVA päämuuntajapiirin osalta 58 % kuormitustasolla.

Investointikustannukset case-tapauksittain ovat edullisimmat case IV jokaisen eri teknisen toteutuksen osalta. Estokelaparistoilla KJ-tasolla toteutettu kompensointi on investoinniltaan kaikista edullisin. Lisäksi 8 MVar yliaaltosuodatus kapasiteetilla toteutettuna se on edullisin yliaaltosuodatusta sisältävistä ratkaisuista. Tarkasteluun ei sisällytetty moduuliin asennettua PJ-passiivisuodatusta case I osalta, sen kustannusten epävarmuuden takia. Yliaaltosuodatuksen osalta case-tarkastelu suoritettiin vain 63 MVA 58 % kuormitustasolle.

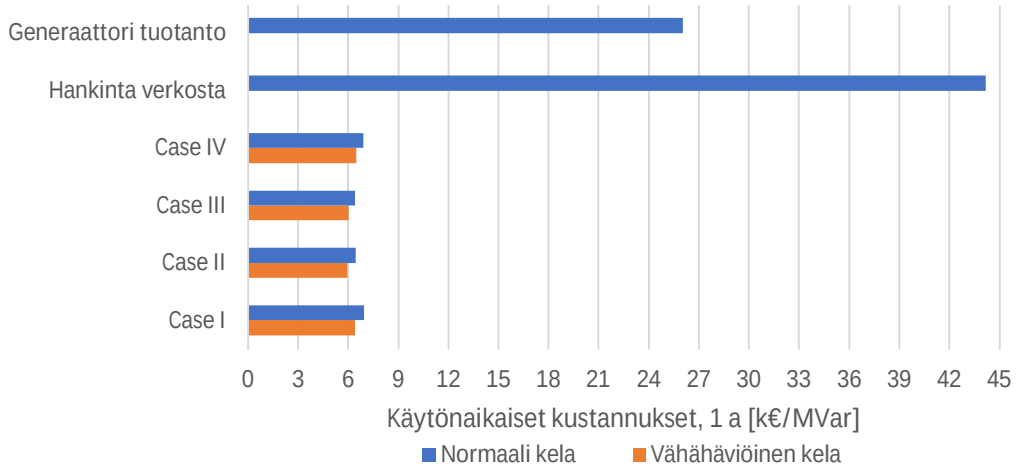
Pelkästään estokeloilla kompensoidun 52 % kuormitustasolla toimivan 31,5 MVA päämuuntajan investointikustannukset (€/MVar) case-tapauksittain on esitetty kuvassa 7.17.



Kuva 7.17. Case-tapauskohtaiset investointikustannukset [k€/MVar] eri estokela tyyppiratkaisuilla toteutettuna 31,5 MVA päämuuntajapiirin osalta 52 % kuormitustasolla.

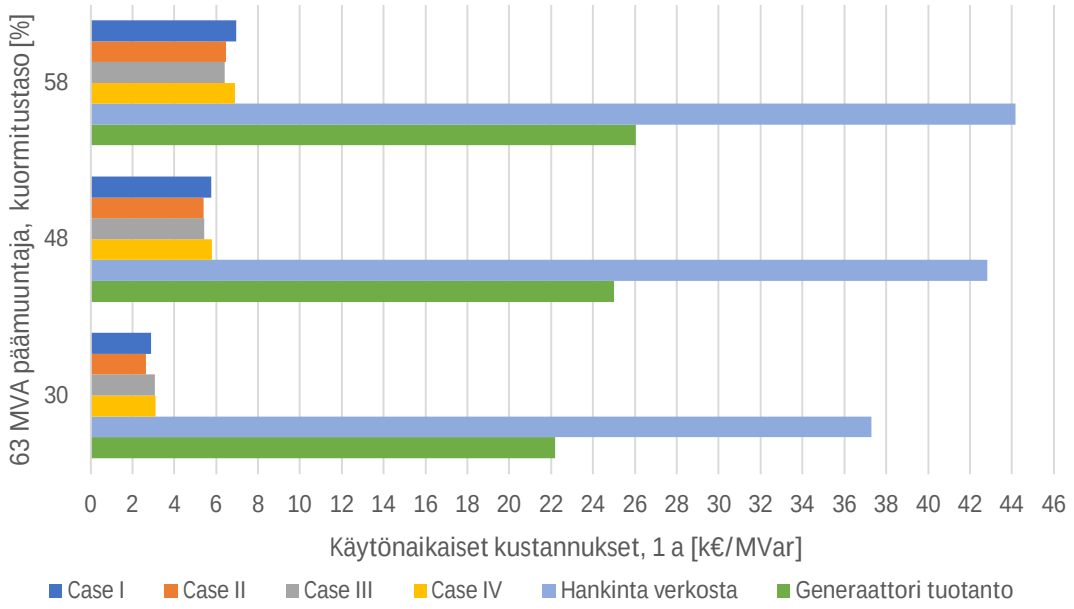
Investointikustannusten määrä säilyy lähes vastaavana kuin isommalla päämuuntajapiirillä. Edullisuusjärjestys säilyy myös samana case IV investointien ollessa edullisimmat. Päämuuntajien pienemmillä kuormitustasoilla avolaitteistona toteutettu case IV säilyy edelleen edullisimpana investointikustannuksiltaan. Investointikustannukset päämuuntajien eri kuormitustasojen osalta on esitetty tarkemmin liitteessä IX.

Investoinnin kannattavuuden laskentaa varten määritettävä nettotuotto saadaan vertaamalla kompensointilaitteistojen vuotuisia toistuvaluonteisia kustannuksia kahteen vaihtoehtoiseen loistehon tuotantovaihtoehtoon. Tässä tarkastelussa nettotuoton määritystä varten vertailu tehdään generaattori tuotantoon, sekä verkosta hankittuun loissähköön nähden. Nettotuoton määritystä varten lasketut vuotuiset käytönaikaiset kustannukset (€/MVar) case-tapauksittain sekä vaihtoehtoisten loisteho tuotantomuotojen osalta on esitetty kuvassa 7.18.



Kuva 7.18. Case-tapausten ja vaihtoehtoisten tuotantomuotojen vuotuiset käytönaikaiset kustannukset [k€/MVar] 63 MVA päämuuntajapiirin osalta 58 % kuormitustasolla.

Kiinteillä kompensointilaitteistoilla toteutettujen case-tapausten osalta vuosittaiset käytönaikaiset kustannukset ovat huomattavasti pienemmät loistehon generaattori tuotannossa syntyviin häviökustannuksiin, sekä sähköverkosta ostettuun loissähköön nähden. Vähähäviöisen kelan käytöllä saavutetaan vuodessa kuvan 7.18 mukaisessa tilanteessa 350–600 € säästö käytönaikaisissa kustannuksissa. Verkosta hankinnan osalta laskennassa käytettiin Fingridin yleistä kantaverkkopalvelumaksu hinnastoa, sekä tarkasteluympäristölle määriteltyjä huipunkäyttöaikoja. Verkosta hankinnan osalta on huomioitu case-tapauskohtainen loissähköikkunan ilmaisosuus. Generaattorin käytönaikaisiin kustannuksiin huomioitiin generaattorin pätötehohäviöt, eikä sen suhteen huomioitu muita hyötyjä, kuten tuotetun sähkön myyntiä. Pätötehohäviöiden määrityksessä hyödynnettiin UPM Kaukaan generaattorien arvoja. Generaattori tuotannon sekä verkosta hankinnan kustannuksiin on huomioitu lisäksi kompensoimattoman sähköverkon häviöt. Päämuuntajan kuormitustason vaikutus tarkasteltaviin käytönaikaisiin kustannuksiin (€/MVar) on esitetty kuvassa 7.19.

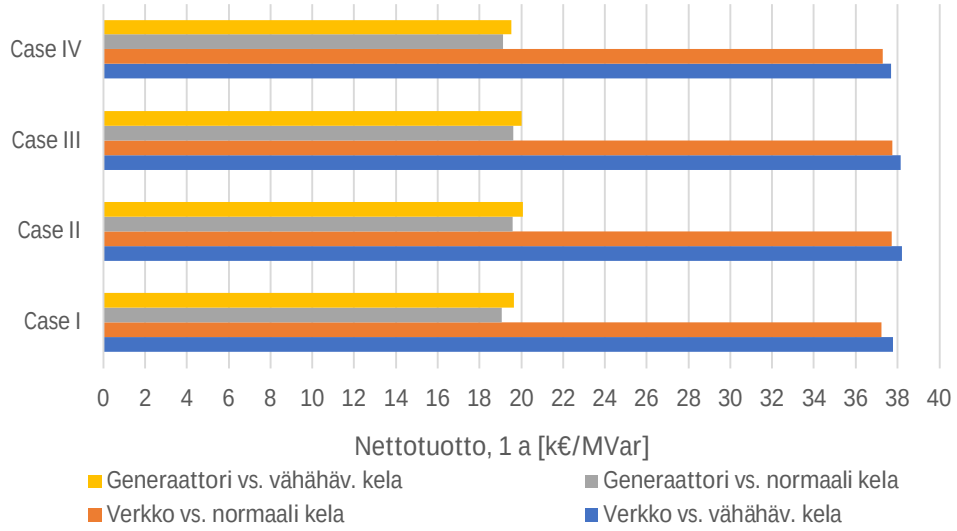


Kuva 7.19. Case-tapausten ja vaihtoehtoisten tuotantomuotojen vuotuiset käytönaikaiset kustannukset [k€/MVar] 63 MVA päämuuntajapiirin osalta eri kuormitustasolla [%].

Päämuuntajan kuormitustason muuttuessa, vaihtoehtoisten tuotantomuotojen edullisuusjärjestys säilyy ennallaan. Generaattori tuotannossa häviöiden määrä on riippuvainen generaattorin loistehon tuotannon määrästä, ja verkosta hankitun loissähkön osalta loissähköikkunan ilmaisosuus on määritetty tapauskohtaisesti case-ympäristön laajuuden mukaisesti. Vaihtoehtoisten tuotantomuotojen kustannusten osalta generaattori tuotannon kustannukset ovat eri kuormitustasoilla 58–60 % verkosta hankitun loissähkön kustannuksiin verrattuna.

Case-tapauksissa käytettyjen kompensointilaitteistojen kokonaiselinkaarikustannuksissa huomioidaan aiemmin esitettyjen case-asettelujen mukaiset yksikkömäärät sekä laitteistotyyppien määritetyt vuotuiset käytönaikaiset kustannukset. Case-tapausten välinen edullisuusjärjestys käytönaikaisten kustannusten osalta säilyy hyvinkin samana 48 ja 58 % kuormituksella. Näillä kuormitustasoilla case II ja III ovat pienimmät kustannuksiltaan, ja case I ja IV kalleimmat. Edullisuusjärjestyksen osalta on huomattavissa muutos matalalla 30 % kuormitustasolla PJ-laitteistoja sisältävien case-tapausten I ja II käytönaikaisten kustannusten ollessa pienimmät. Vaihtoehtoisiin tuotantotapoihin verrattuna case-tapausten väliset eroavaisuudet ovat pieniä.

Investoinnin kannattavuuden arviointia varten case-tapauskohtainen nettotuotto tarkastellaan generaattori tuotantoon ja verkosta hankittuun loissähköön verraten. Vuotuisen nettotuoton arvioinnissa huomioidaan myös häviöitä pienentävän vähähäviöisen kelan käyttö. Vuotuinen nettotuotto (€/MVar) case-tapauksittain 63 MVA päämuuntajan osalta 58 % kuormitustasolla on esitetty kuvassa 7.20.



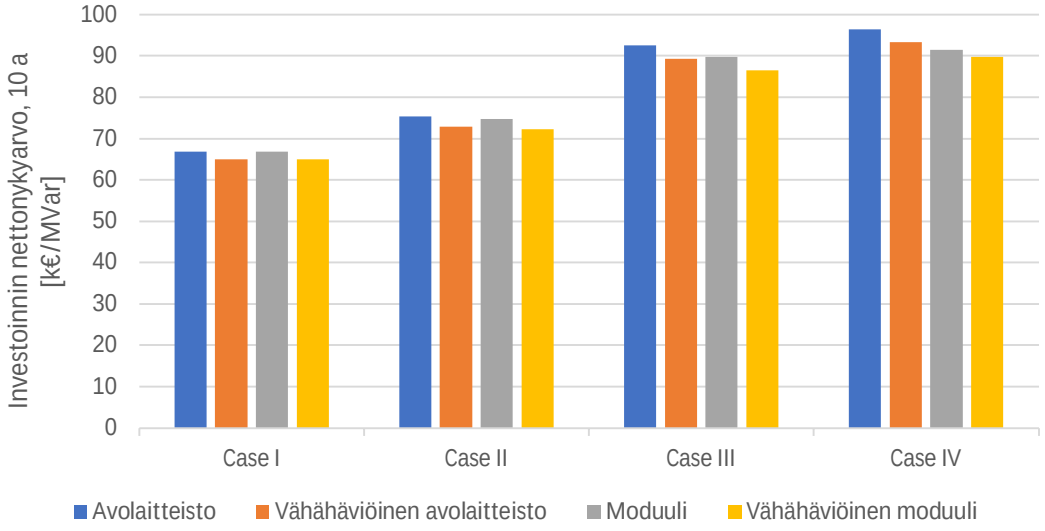
Kuva 7.20. Case-tapausten vuotuinen nettotuotto [k€/MVar] normaalilla ja vähähäviöisellä kelalla toteuttettuna 63 MVA päämuuntajapiirin 58 % kuormitustasolla vaihtoehtoisiin tuotantomuotoihin nähden.

Paras vuotuinen nettotuotto normaaleja keloja käyttäessä saavutetaan case III osalta ja vähähäviöisiä keloja käyttäessä case II osalta molempien vaihtoehtoisten tuotantomuotojen suhteen. Kokonaisuutena loistehon generaattori tuotantoon verrattu nettotuotto on n. 60 % verkosta hankintaan verrattuun nettotuottoon nähden. Nettotuoton määritys on esitetty tarkemmin liitteessä X.

7.3.1 Investoinnin kannattavuus 63 MVA päämuuntajapiirillä

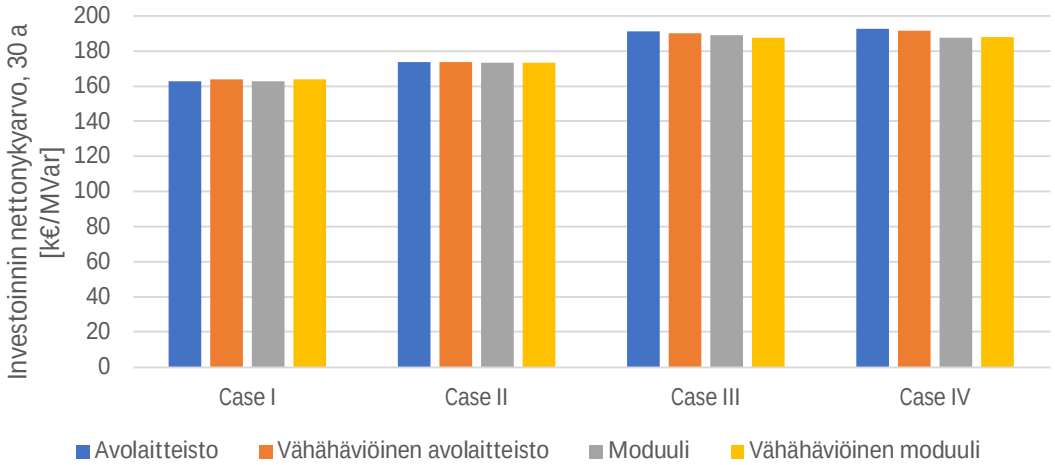
Investoinnin kannattavuutta verrataan kahden eri ajanjakson osalta, jotka ovat kymmenen ja 30 vuotta. Investoinnin kannattavuutta arvioidaan nettonykyarvomenetelmällä käyttämällä toimeksiantajan puolesta valmiiksi määriteltyä 7 % korkokantaa. Nettonykyarvon määritykseen käytetään generaattoriin verrattuna saatavaa nettotuottoa, joka on pienempi kuin verkosta ostettuun verrattu nettotuotto. Toisin sanoen investoinnin kannattavuutta verrataan heikompaan tapaukseen nettotuoton osalta. Estokeloilla toteutetun 63 MVA

päämuuntaja piirin kompensoinnin nettonykyarvo (€/MVar) kymmenen vuoden ajalla tarkasteltuna on esitetty kuvassa 7.21.



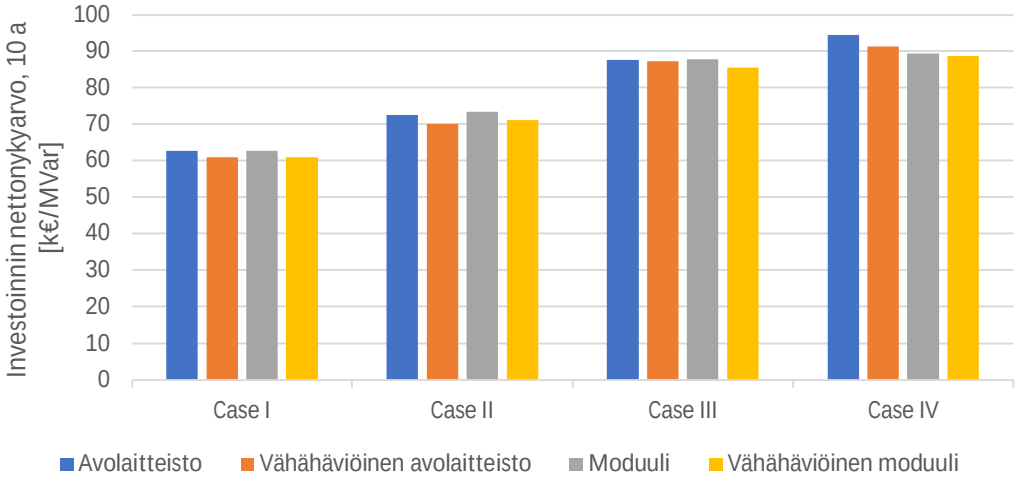
Kuva 7.21. Case-tapausten investoinnin nettonykyarvo [k€/MVar] 63 MVA päämuuntajapiirin 58 % kuormitustasolla kymmenen vuoden tarkastelujakson aikana.

Case-tapaukset III ja IV ovat kymmenen vuoden tarkastelujaksolla nettonykyarvoltaan isoimmat. Avolaitteistoilla saavutetaan näissä case-tapauksissa paras investoinnin kannattavuus. Pääsääntöisesti KJ-tasolla toteutetut kompensointi investoinnit tuottavat enemmän PJ-tason kompensointeihin verrattuna kymmenen vuoden ajalla. Vastaavan tapauksen nettonykyarvon (€/MVar) tarkastelu 30 vuoden ajalta on esitetty kuvassa 7.22.



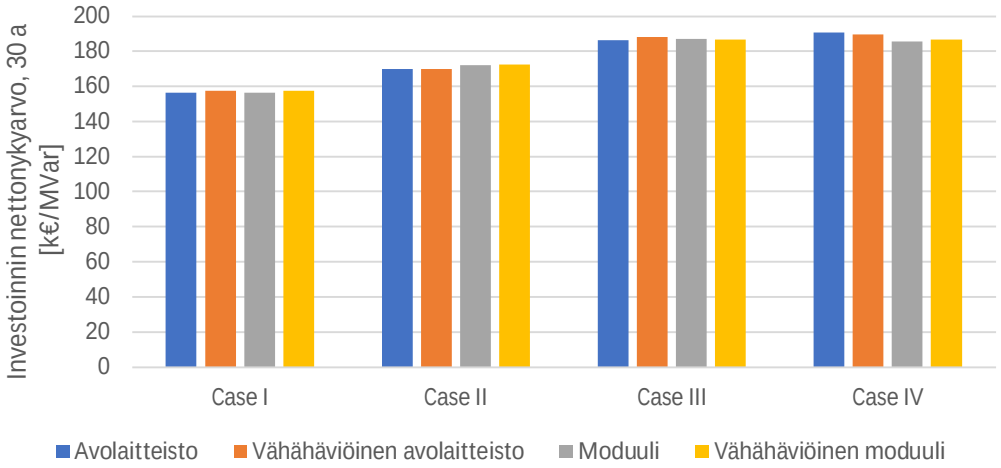
Kuva 7.22. Case-tapausten investoinnin nettonykyarvo [k€/MVar] 63 MVA päämuuntajapiirin 58 % kuormitustasolla 30 vuoden tarkastelujakson aikana.

Case-tapausten nettonykyarvojen järjestys PJ- ja KJ-tasoilla toteutettujen suhteen säilyy samana 30 vuoden tarkastelujaksolla. Kannattavimpina case-tapauksina nettonykyarvoon peilaten ovat case III ja IV, joiden arvot ovat lähes samalla tasolla. Case I on heikoin tapaus ja case II kannattavuus sijoittuu edellä mainittujen case-tapausten väliin. Pienemmillä päämuuntajan kuormitustasoilla case-tapausten välinen kannattavuusjärjestys säilyy samana, mutta moduuleihin toteutettujen ratkaisuiden kannattavuus nousee avolaitteistoihin verrattuna kymmenen ja 30 vuoden tarkastelujaksolla. Yliaaltosuodattimien käytön kannattavuutta tarkasteltiin korvaamalla 8 MVar estokelalla toteutettua kompensointikapasiteettia passiivisuodattimilla. Passiivisuodattimilla toteutetun 63 MVA päämuuntajapiirin kompensoinnin nettonykyarvo (€/MVar) kymmenen vuoden ajalla tarkasteltuna on esitetty kuvassa 7.23.



Kuva 7.23. Case-tapausten investoinnin nettonykyarvo [k€/MVar] passiivisuodattimen lisäyksellä 63 MVA päämuuntajapiirin 58 % kuormitustasolla kymmenen vuoden tarkastelujakson aikana.

Passiivisuodattimien lisäyksellä kannattavuusjärjestys case-tapausten välillä säilyy vastaavana kuin estokela toteutuksissa kuvassa 7.21. Kokonaisuutena nettonykyarvo on matalampana estokeloihin nähden kaikissa tapauksissa isomman investointikustannuksen vuoksi. Case II ja III osalta avolaitteistojen nettonykyarvo muuttuu matalammaksi kuin moduuleilla estokela toteutukseen verrattuna. Vastaavan passiivisuodatuksella toteutetun case-tapauksen nettonykyarvon tarkastelu 30 vuoden ajalta on esitetty kuvassa 7.24.



Kuva 7.24. Case-tapausten investoinnin nettonykyarvo [k€/MVar] passiivisuodattimen lisäyksellä 63 MVA päämuuntajapiirin 58 % kuormitustasolla 30 vuoden tarkastelujakson aikana.

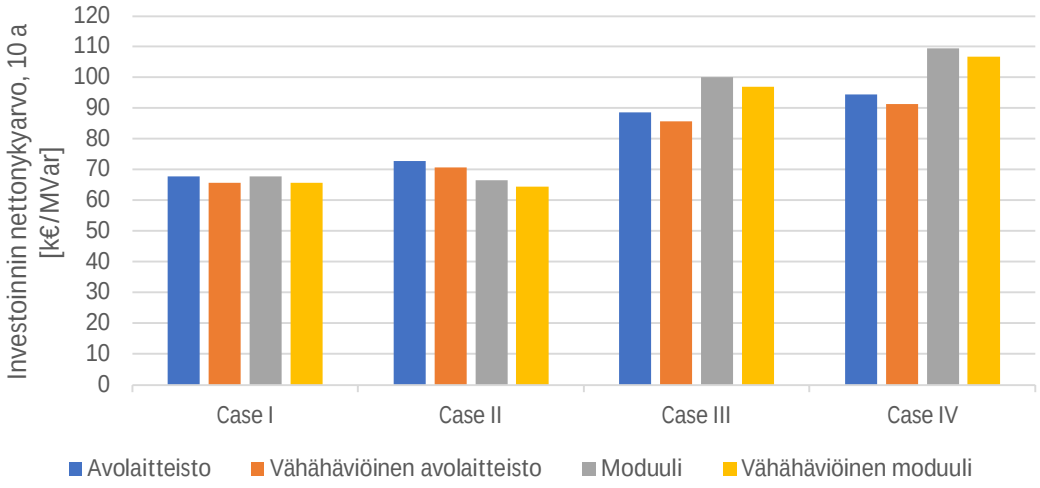
Passiivisuodattimien lisäyksellä kannattavuusjärjestys case-tapausten välillä säilyy vastaavana kuin kymmenen vuoden ajanjaksolla. Avolaitteistojen ja moduulitoteutusten nettonykyarvot case-tapauksittain ovat käytännössä toisiaan vastaavat. Kuvassa 7.22 esitettyyn estokela toteutukseen verrattuna kaikki kuvan 7.24 nettonykyarvot ovat isomman investoinnin takia hieman matalammat. Lisäksi moduulitoteutusten kannattavuus avolaitteistoihin nähden on parempi kuin estokela toteutuksessa. Investointien nettonykyarvot 63 MVA päämuuntajan eri kuormitustasoilla on esitetty tarkemmin liitteessä XI.

Takaisinmaksuajat case-tapauksittain investoinneille generaattori tuotettuun loistehoon verraten olivat parhaimman case IV osalta 2–3 vuotta, case III osalta 3 vuotta, sekä heikoimpien case II ja I osalta 4–5 vuotta. Korkokannan muutokset eivät tuoneet vaikutusta investointien kannattavuusjärjestyksen osalta. Korkeammalla korkokannalla investointien nettonykyarvo laskee, eli investoinnin tuotto on heikompi. Vastaavasti matalammalla korkokannalla investoinnin tuotto on korkeampi. Korkokannan muutosten vaikutukset investoinnin kannattavuuteen on esitetty tarkemmin liitteessä XII.

7.3.2 Investoinnin kannattavuus 31,5 MVA päämuuntajapiirillä

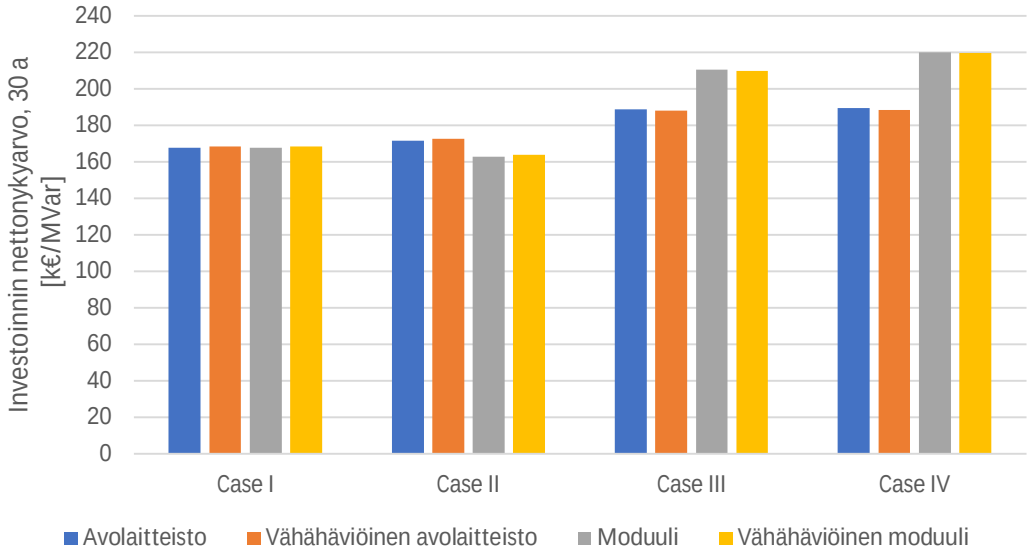
Vastaava nettonykyarvojen case-tarkastelu suoritettiin 31,5 MVA päämuuntajan osalta kymmenen ja 30 vuoden ajanjaksoilla estokeloilla toteutettuna. Näkökulmaa erilaisten kuormitustasojen vaikutusta investoinnin nettonykyarvoon saadaan tarkastelemalla

pienempää päämuuntajaa eri kuormitustasoilla. Estokeloilla toteutetun 31,5 MVA päämuuntaja piirin kompensoinnin nettonykyarvo (€/MVar) kymmenen vuoden ajalla tarkasteltuna on esitetty kuvassa 7.25.



Kuva 7.25. Case-tapausten investoinnin nettonykyarvo [k€/MVar] 31,5 MVA päämuuntajapiirin 52 % kuormitustasolla kymmenen vuoden tarkastelujakson aikana.

Pienemmän 31,5 MVA päämuuntajan osalta case-tapausten kannattavuusjärjestys säilyy samana 63 MVA päämuuntajaan verrattuna. Isoimpana erona 63 MVA päämuuntajaan verraten on moduuliratkaisuiden isompi nettonykyarvo avolaitteistoihin verrattuna case III ja IV osalta. Vastaavan tapauksen nettonykyarvon (€/MVar) tarkastelu 30 vuoden ajalta on esitetty kuvassa 7.26.



Kuva 7.26. Case-tapausten investoinnin nettonykyarvo [k€/MVar] 31,5 MVA päämuuntajapiirin 52 % kuormitustasolla 30 vuoden tarkastelujakson aikana.

Case-tapaukset säilyvät vastaavassa kannattavuusjärjestyksessä nettonykyarvon suhteen kuin kymmenen vuoden tarkastelujaksolla. Kaikkein korkein investoinnin nettonykyarvo saavutetaan kuvan 7.26 mukaisesti case IV osalta moduuleilla toteutettuna. Päämuuntajapiirien välisessä vertailussa normaalin tuotannon tilanteessa 31,5 MVA päämuuntajaan toteutetulla kompensointi-investoinnilla saavutetaan hieman korkeampi nettonykyarvo. Investointien nettonykyarvot 31,5 MVA päämuuntajan eri kuormitustasoilla on esitetty tarkemmin liitteessä XI.

8 JOHTOPÄÄTÖKSET

Tämä luku käsittelee case-tarkastelun tuloksia työn kannalta oleellisimmista näkökulmista. Luvun alussa käsitellään case-tarkasteluun valittujen tyyppiratkaisuiden soveltuvuutta metsäteollisuuden ympäristöön. Tämän jälkeen käsitellään kompensointi investointien kannattavuutta ja teknistä soveltuvuutta erilaisten laajuuksien osalta. Luvun lopuksi arvioidaan tulosten yleistä hyödynnettävyyttä sekä niiden luotettavuutta. Tässä luvussa esitetyt johtopäätökset ovat muodostettu case-tarkastelun tuloksiin, kirjallisuuteen sekä haastatteluihin perustuen.

8.1 Tyyppiratkaisuiden soveltuvuus metsäteollisuuden ympäristössä

Metsäteollisuuden laitoksissa prosessin häiriötön toimivuus on tuotannon kannalta tärkein asia. Häiriötön sähkönjakelu on laitoksen käytön ja ohjauksen kannalta isossa asemassa, joka asettaa laitoksen sähköjärjestelmälle korkeat vaatimukset toimintavarmuudelle. Toimintavarmuus perustuu hyvien käyttökokemusten kautta vakiintuneisiin toimintatapoihin ja teknisiin ratkaisuihin. Käyttämällä hyvällä saatavuudella olevia yksinkertaisia vakiintuneita teknisiä ratkaisuita, on mahdollista lyhentää esimerkiksi laitehäiriöstä johtuvaa tuotannon pysäytystä.

Kompensoinnin tyyppilaitteistojen määrityksessä ohjaavana periaatteena toimi laitoksessa käytössä ollut tekniikka, siihen liittyvät käyttökokemukset, varaosien saatavuus sekä laitteiston hinta. Tyyppilaitteistojen koot määritettiin sopiviksi päämuuntajakohtaisesti tarkasteltavan kompensoinnin toteutusta varten, jonka lisäksi tyyppilaitteistojen koossa otettiin huomioon portaittaisen säädön mahdollisuus. Tyyppilaitteistojen kokoon vaikuttivat myös case-ympäristön olemassa olevat liityntämahdollisuudet PJ-keskusten sekä KJ-kojeistojen osalta. Laitteiston ja varaosien hinnan osalta yksinkertaisista komponenteista koostuva estokelaparisto on kustannustehokas ja toimintavarma ratkaisu metsäteollisuuden laitosten kompensointien toteutukseen. Lisäksi PJ osalta estokelaparisto toimii suoraan keskusten yhteydessä sijaitsevien vanhojen rinnakkaiskondensaattoriparistojen korvaajana, eikä se aiheuta haitallista resonanssi-ilmiötä verkon induktanssin ja kapasitiivisen kondensaattoripariston välille. Metsäteollisuuden laitosten sähköverkossa esiintyvien yliaaltojen takia keskuksiin kytkettyjä rinnakkaiskondensaattoriparistoja ei tulisi enää käyttää.

Tyyppilaitteistoiksi valikoituneiden yliaaltosuodattimien osalta passiivisuodatin vastaa aktiivisuodatinta paremmin metsäteollisuudessa käytetyille tyyppilaitteistolle määritettyjä periaatteita. Yliaaltosuodattimen etuna aktiivisuodattimeen nähden on sen yksinkertaisempi rakenne, pidempi elinkaari, halvemmat hankinta- ja huoltokustannukset sekä varaosien saatavuus. Aktiivisuodattimen osalta eduksi passiivisuodattimeen nähden voidaan katsoa dynaaminen useamman yliaaltotaajuuden suodatus. Aktiivisuodatin voisikin toimia hyvänä vaihtoehtona kohdennettuun yliaaltojen suodatuksen esimerkiksi jonkin isoja kuormitusmuutoksia sisältävän laitteiston yhteydessä. Passiivisuodattimen avulla pystytään hyvinkin vastaamaan metsäteollisuuden laitoksen tavanomaiseen yliaaltosuodatuksen tarpeeseen virittämällä se suodattamaan yleisimpiä yliaaltotaajuuksia, joita ovat viides ja seitsemäs yliaalto. Muut kompensointi- ja yliaaltosuodatuslaitteistot, kuten SVC ja STATCOM eivät ole tällä hetkellä yleisesti käytössä metsäteollisuudessa laitoksissa. Yksinkertaisen rakenteen omaavan ja toimintavarman passiivisuodattimien käyttö on teknistaloudellisesti kannattavaa vakaan kuormituksen omaavissa metsäteollisuuden laitoksissa.

8.2 Kompensointilaitteisto investoinnit päämuuntajatasolla tarkasteltuna

Metsäteollisuuden laitoksen sähköverkon kompensointi ja yliaaltosuodatus tyypillisen kokoisen päämuuntajapiirin osalta on kannattavinta tehdä pääosin, tai kokonaan KJ-tasolla. Isommilla KJ asennettavilla kompensointiparistoyksiköillä saavutetaan paras investoinnin nettonykyarvo kymmenen ja 30 vuoden osalta tarkasteltuna. Case-tapauksiin peilaten case IV, eli täysin KJ toteutettu kompensointi on kannattavin kymmenen vuoden osalta tarkasteltuna edullisimman investointikustannuksensa takia. Tarkasteltaessa 30 vuoden osalta case III nettonykyarvo saavuttaa case IV edullisempien käytönaikaisten kustannustensa takia. Nämä tulokset eivät tue suoraan päähypoteesia, joka oli ”loistehon kompensointi on kannattavaa toteuttaa keskusten yhteydessä pienjännitteellä mahdollisimman lähellä kulutusta”. KJ-tasolla saavutetut investointien kustannushyödyt ovat isommat PJ-tasolla saavutettuihin sähköverkon kustannushyötyihin nähden.

Investoinnin kannattavuudelta molempien tarkastelujaksojen osalta heikoin tapaus on case I, joka on kallein vaihtoehto investointi sekä käytönaikaisilta kustannuksiltaan. Lisäksi case I osalta ongelmallisena asiana teknisen toteutuksen näkökulmasta on PJ-puolella tehtävä ylikompensointi, joka aiheuttaa toimenpiteitä jännitehallinnan suhteen jakelumuuntajilla.

Oletuksena muihin case-tapauksiin verraten case I osalta oli pienimmät verkkohäviöt, sillä loisteho kompensoitiin lähellä kuormitusta. Oletus ei kuitenkaan pitänyt paikkaansa ylikompensoinnin takia, jonka lisäksi kompensointilaitteistoista johtuvat häviöt olivat case-tapauksista isoimmat PJ-yksiköiden runsaan määrän takia. Case I omaa kuitenkin isoimman potentiaalin laitteistosta johtuvien häviöiden pienentämiseen vähähäviöisen kelan avulla.

Case II on kannattavuudelta toisiksi heikoin, pääosin kalliin investointikustannuksensa vuoksi. Case II on kuitenkin häviökustannuksiltaan case-tapauksista edullisin, sillä case I verrattuna sijoittamalla yksi laitteisto KJ-puolelle vähennetään PJ-puolella tapahtuvaa ylikompensointia. Case II olisikin case-tapauksista paras, jos asiaa tarkasteltaisiin sähköverkon häviöiden ja kaapelien mitoituksen optimoinnin kannalta. Case II ei kuitenkaan saavuta nettonykyarvoltaan case III ja IV sen korkeampien huoltokustannusten sekä investointikustannuksen takia.

Case III on käytönaikaisten kustannustensa osalta kokonaisuutena edullisin toiseksi pienimpien verkkohäviöiden sekä huoltokustannusten takia. Sähköverkon häviöiden kannalta case III erottuu case II ohella muista kustannusten pienuuden osalta. Case-tapausten verkkomallinnuksen avulla oli huomattavissa, että häviöiden optimointia tarkastellessa paras vaikutus saadaan hajauttamalla kompensointi PJ- ja KJ-tasoille. Edullisimpien käytönaikaisten kustannusten takia case III on eniten nettonykyarvoaan tarkastelujaksojen välillä nostava case-tapaus. Case III omaa myös toiseksi pienimmät investointikustannukset, jonka takia se nousee varsinkin 30 vuoden nettonykyarvon tarkastelun osalta samalle tasolle case IV kanssa.

Case IV, jossa kompensointi tehdään vain KJ-tasolla on kokonaishäviöiltään heikoin case-tapaus. Suurin yksittäinen häviökustannusten aiheuttaja on jakelumuuntaja, jonka toisio puolella ei ole ollenkaan kompensointia. Lisäksi häviöitä aiheuttavat KJ- ja PJ-kaapelit, joiden kuormituksen puolelle ei ole kompensointia. Kuitenkin kymmenen vuoden tarkastelujaksolla case IV on nettonykyarvoltaan kannattavin investointi pienimpien investointi- ja huoltokustannuksiensa ansiosta. 30 vuoden tarkastelujaksolla case III saavuttaa case IV nettonykyarvon pienempien käytönaikaisten kustannuksiensa ansiosta. Case-tapauksien nettonykyarvoa passiivisuodattimella tarkastellessa case-tapausten välinen kannattavuus säilyy vastaavassa järjestyksessä kuin estokela toteutuksen osalta.

Passiivisuodatuksen isomman investointikustannuksen vuoksi investoinnin kannattavuus jää hieman matalammaksi pelkkään estokela toteutukseen verrattuna.

Case-tapausten erilaisten teknisten toteutusvaihtoehtojen osalta metsäteollisuuden laitoksen ollessa normaalissa tuotannossa avolaitteistona toteutetut kompensointiratkaisut ovat nettonykyarvoltaan kannattavimmat. Pienimmillä kuormituksilla moduuliin asennettujen laitteistojen kannattavuus paranee suhteessa avolaitteistoihin kuormitustasosta johtuvan investointikustannusten kaventuneen eron, sekä moduuliratkaisujen halvempien huoltokustannusten vuoksi. Moduuliratkaisussa pienemmät huoltokustannukset mahdollistetaan paremmalla olosuhteiden hallinnalla lämpö- ja ilmanvaihtotekniikkaa sisältävän moduulikontin avulla. Pienemmällä kuormituksella moduuliin asennetut ratkaisut ovat investoinnin nettonykyarvoltaan kannattavampia kuin avolaitteistot. Valinta kompensointilaitteistojen investoinnin avolaitteiston ja moduulitoteutuksen välillä on kuitenkin suositeltavaa tehdä tehdasympäristön asettamien rajoitusten mukaisesti.

Tehdasympäristön asettamista rajoitteista oleellisimmat asiat valinnan suhteen ovat fyysinen tilan tarve, keskusten ja kojeistojen liityntämahdollisuudet sekä ympäröivät olosuhteet. Ympäröivien olosuhteiden osalta huomioon otettavia asioita ovat mm. kuinka avolaitteistoille mahdollistetaan eläin- ja säänsuojaus. Uutta metsäteollisuuden laitosta suunnitellessa on paremmat mahdollisuudet huomioida avolaitteistojen toteutuksen tila vaatimukset. Olemassa olevan laitoksen osalta mahdollinen kompensointikapasiteetin lisäys käyttäen moduuliratkaisuja voi olla fyysisen tilan käytön osalta helpommin toteutettava vaihtoehto.

Vähähäviöisen kelan käytöllä saadaan pienennettyä kompensointilaitteissa syntyviä häviöitä. Vähähäviöisten kelojen investoinnin nettonykyarvoa tarkastellessa case-tapauksittain ne eivät ole kymmenen vuoden tarkastelujaksolla kannattavia investointeja normaaleihin keloihin verrattuna korkeamman investointikustannuksensa takia. Pidemmällä 30 vuoden tarkastelujaksolla niiden investoinnin nettonykyarvo on pääosin PJ tasolla kompensoitujen case I ja II verkkojen osalta korkeampi kuin normaaleilla keloilla toteutettuna. Vastaavasti pääosin KJ kompensoitujen case III ja IV osalta vähähäviöisten kelojen vaikutuksen ollessa pienempi niiden investointien nettonykyarvo nousee samalle tasolle tai hieman alle normaaleihin keloihin verrattuna. Vähähäviöisen kelojen käytöllä ei

saavuteta huomattavaa investoinnin kannattavuuden parantumista, mutta niitä käyttämällä voidaan vaikuttaa häviöihin, sekä isommassa kuvassa tarkasteltuna verkon mitoitukseen.

Yliaaltosuodattimien määritys olemassa olevaan verkkoon on suositeltavaa tehdä yliaaltomittauksia hyödyntäen, jotta se voidaan kohdentaa vastaamaan tarvetta. Olemassa olevan laitoksen osalta kohdennettua yliaaltojen hallintaa esimerkiksi paljon VSD-kuormaa sisältävien keskuksien yhteydessä on mahdollista tehdä PJ sijoitettavalla passiivisuodatinkaapistolla. Uuden metsäteollisuuden laitoksen sähkönjakelua suunnitellessa tavanomaisten yliaaltotaajuuksien suodatus on kannattavaa toteuttaa KJ-tasolla, sillä passiivisuodattimien hankinnan kustannukset nostavat vain hieman investointikustannuksia estokeloihin verrattuna.

Kompensointilaitteistoihin liittyvien investointien suhteen on tärkeää huomioida niiden liityntätarve sähköverkkoon. Case-tapauksissa tarkasteltujen KJ-laitteistojen osalta oletuksena oli, että kompensointiyksiköille oli olemassa olevat vapaat liitynnät KJ-kojeistossa jo olemassa. Uuden laitoksen suunnittelussa tämä liityntätarve on mahdollista ottaa huomioon kojeistoa määrittäessä, mutta olemassa olevien laitosten osalta uusien lähtöjen lisäys nostaisi investointikustannuksia huomattavasti. PJ-laitteistojen osalta niiden etuna varsinkin olemassa olevien laitosten osalta on paremmat liityntämahdollisuudet keskustasolla. Keskusten suunnitteluvaiheessa jo otetaan huomioon tarve varalähdöille, joten niitä on tarjolla enemmän KJ-lähtöihin verrattuna.

Case-tarkastelun tuloksia voidaan hyödyntää suoraan uuden laitoksen kompensoinnin suunnittelun periaatteena, mutta valitun tekniikan osalta on huomioitava muun suunnitellun sähköverkon rakenne ja toteutusmahdollisuudet. Olemassa olevan laitoksen osalta case-tapausten tuloksia voidaan hyödyntää nykyisen kompensointijärjestelmän kehittämiseen. Vanhojen keskuksiin asennettujen rinnakkaiskondensaattoriparistojen käytöstä suositellaan pyrkimään eroon ajan saatossa resonanssi-ilmiön mahdollisuuden takia. Niiden tuottaman kompensointitehon korvaaminen case-tarkastelun perusteella kannattaa harkita toteutettavaksi KJ-tasolla. Kompensointikapasiteetin muokkaaminen PJ-tasolta KJ-tasolle vaatii isomman kertainvestoinnin, jolloin investoinnissa olisi kannattavaa ottaa huomioon useampi korvattava PJ-kompensointi. Case III mukaisessa kompensointien toteutuksessa keskusten vanhat kompensointiparistot voidaan myös korvata estokelallisilla PJ-yksiköillä,

sillä niillä saatava hyöty varsinkin 30 vuoden tarkastelujaksolla on case IV kanssa lähes vastaava. Case III osalta etuna kohdennetulla PJ-estokela kompensoinnilla on pienemmät investointi- ja häviökustannukset sekä tarkemmin kohdennettu kompensointivaikutus. Case III ja IV mukaisten investoinnin suuntaamisen vaihtoehtojen välillä päätöksen teon kannalta ohjaavina asioina kannattaakin arvioida käytössä olevaa budjettia, investoinnin ajoitusta, sähkön laatua ja häviöiden hallinnan tarvetta sekä teknistä toteutettavuutta.

Loistehon kompensointiin kiinteillä yksiköillä kannattaa investoida, sillä se tuottaa vaihtoehtoisiin loistehon tuotantomuotoihin nähden taloudellista hyötyä. Investoinnin kannattavuuden osalta isoimman vaikutuksen case-tapausten kannattavuusjärjestykseen tekee investointikustannus. Kompensointilaitteistojen huolto- ja häviökustannusten vaikutus case-tapausten väliseen kannattavuusjärjestykseen ovat kokonaisuutta ajatellen vähäiset, sillä case-tapausten vuotuiset käytönaikaiset kustannukset ovat lähellä toisiaan.

8.3 Tulosten luotettavuus ja yleinen hyödynnettävyys

Normaalissa tuotannossa toimivan metsäteollisuuden laitoksen kuormitus on tasaista. Case-tarkastelu toteutettiin kahdelle eri kokoisille päämuuntajapiireille täyden tuotannon aikaisen kuukauden kuormituksen mittausdataan perustuen. Mittausdatan perusteella tarkasteltavat kuormitustasot valikoituivat parhaan, huonoimman ja mittausjakson keskiarvon perusteella. Kuormitustason muutosten tarkastelu kahden eri kokoisen päämuuntajan osalta mahdollisti oleellisten johtopäätösten muodostamisen. Case-tarkastelu edustaa laitoksen tämänhetkistä tilannetta, joten kuormitustasojen ja -tyyppien muuttuessa tulevaisuudessa tulosten hyödynnettävyyttä on arvioitava uudestaan.

Tapauskohtainen kompensointitarve määritettiin laskennallisesti eri kuormitustasojen mukaisesti, jonka paikkaansa pitävyys tarkastettiin verkkomallinnuksen avulla. Laskennalliseen kompensointitehoon verraten asennettua PJ-kompensointia tarvittiin vähemmän, ja asennettua KJ-kompensointia enemmän laskettuun arvoon nähden. Verkkohäviöiden määrityksessä tukeuduttiin verkkomallinnuksessa laitoksen verkkomallissa oleviin tietoihin, joita täydennettiin suunnittelujärjestelmästä täydennetyillä ajantasaisilla asennetun kuormituksen tiedoilla. Verkkomallinnus ei välttämättä tarjonnut absoluuttista tarkkuutta tarkasteltavan verkon kuormituksen jakautumisesta, mutta se toimi

riittävällä tarkkuudella johtopäätösten muodostamiseksi. Verkkomallinnuksen osalta suljettiin pois muusta sähköverkosta johtuvat haitat erottamalla irti tarkastelun laajuudesta laitoksen muu sähköverkko.

Investoinnin kannattavuuden osalta merkittävinä muuttujina ovat korkokanta sekä häviöenergian hinnan arvostus. Tarkastelua varten käytetty korkokanta oli määritetty jo valmiiksi, mutta tulokset tarkasteltiin lisäksi isomman päämuuntajan osalta 4 % ja 10 % korkokannalla. Korkokannan vaihtelulla ei ollut vaikutusta kustannusten kannattavuusjärjestyksen osalta, mutta korkeammalla korkokannalla vuotuinen nettotuotto pienentyi. Nettotuoton pienentyessä investoinnin tuotto heikkeni ja takaisimaksuaika piteni tapauskohtaisesti joitain kuukausia. Matalammalla korkokannalla vastaavasti nettotuotto parani, jolloin takaisinmaksuaika lyheni. Häviöenergian hinnan arvostus tähän tarkasteluun määritettiin Nord Pool -sähköpörssin vuoden 2023 hintadataan perustuen. Häviöenergian hinnan laskiessa isoimmat hyötyjät ovat case I ja case IV, joilla häviöiden määrä on suurin. Hinnan noustessa taas vastaavasti case II ja III kannattavuus paranee pienempien häviöiden takia. Erot häviöissä eivät kuitenkaan olleet isossa osassa investoinnin kokonaiskustannusten osalta, joten esimerkiksi niiden muuttuminen 10 % verran ei aiheuta suuria muutoksia case-tapausten välisen kannattavuuden suhteen.

Case-tarkastelun tulokset ovat ensisijaisesti tarkoitettu sovellettavaksi tasaisella kuormituksella toimivan metsäteollisuuden laitoksen kompensointi ja yliaaltosuodatukseen liittyvien investointien vertailuun. Tulokset voivat soveltua hyödynnettäviksi osaltaan myös tasaisella kuormituksella toimivaan teollisuuteen tai muuhun KJ-tasolla verkkoon liittyneeseen kiinteistöön.

9 YHTEENVETO

Tämän työn tavoitteena oli määrittää teknistaloudellisuuden osalta optimaaliset toteutustavat metsäteollisuuden laitoksen sähköverkon loistehon kompensoinnin ja yliaaltosuodatuksen toteuttamiseen liittyen. Lisäksi työn tavoitteena oli selvittää erilaisten sähkön laatua parantavien teknisten ratkaisuiden soveltuvuutta metsäteollisuudessa käytettäväksi. Työn tuloksena syntyi kokonaisvaltaiset elinkaarikustannukset huomioivat toimenpide-ehdotukset olemassa olevan laitoksen kompensointi- ja yliaaltosuodatuslaitteistojen kehittämiseen, sekä uuden laitoksen suunnitteluun liittyen.

Kompensoinnin ja yliaaltosuodatuksen toteutusta tarkasteltiin verkkomallinnusohjelmaa hyödyntäen erilaisin case-tarkasteluin kahden eri kokoisen päämuuntajan osalta eri kuormitustasoilla. Tarkastelussa käytetyt sähkön laatua parantavat tekniset ratkaisut määritettiin metsäteollisuuden laitoksen erityispiirteet, sekä laitteistojen teknistaloudelliset ominaisuudet huomioiden. Tekniset ratkaisut määriteltiin kirjallisuuden ja haastatteluilla kerättyjen käyttäjäkokemusten perusteella. Case-tarkastelun mukaisille kokonaisuuksille määritettiin kustannukset tarkasteltavan verkon, sekä tarkasteluun valittujen laitteistojen elinkaarikustannukset huomioiden. Erilaisiin kompensointilaitteistojen sijoitteluihin perustuneiden case-tapausten investoinnin kannattavuuden vertailu toteutettiin kymmenen ja 30 vuoden tarkastelujaksolla nettonykyarvomenetelmää käyttäen. Nettonykyarvon osalta case-tapauskohtainen vuotuinen nettotuotto määritettiin vaihtoehtoisiin loistehon tuotantomuotoihin nähden.

Loisteho on kannattavaa tuottaa kiinteillä kompensointiyksiköillä metsäteollisuuden laitoksissa. Case-tarkastelulla tehdyn vertailun perusteella laitosten sähköverkon kompensointi- ja yliaaltosuodatuslaitteistoihin kohdistettu investointi on teknistaloudellisesti tarkasteltuna kannattavinta tehdä keskijännitteellä. Keskijänniteyksiköiden isoimpana etuna pienjänniteyksiköihin on niiden halvempi investointikustannus sillä tuotettua loistehokapasiteettiä kohden. Kompensointi ja yliaaltosuodatuksen investointivaihtoehtojen vertailun kannalta merkittävin osuus kustannuksista muodostuu investoinnista. Käytönaikaisten huolto- ja häviökustannusten osalta päämuuntajan tasolla tarkasteltuna ei synny investoinnin kannattavuutta muuttavaa vaikutusta keski- ja pienjännitelaitteistojen vertailussa. Yksittäisillä pienjännitelaitteistoilla keskijännitelaitteiston ohessa voidaan kuitenkin kohdistetusti vaikuttaa tarkemmin sähkön

laatuun esimerkiksi yliaaltosuodatuksen, tai jakelumuuntajassa sekä pienjännitekaapeleissa esiintyvien häviöiden suhteen.

Yliaaltojen suodatus sekä niiden vahvistumisen estäminen on oleellista ottaa huomioon kompensointi investointien suhteen laitoksen toimintavarmuuden, ja nykyaikana lisääntyvien suuntaajakuormien vuoksi. Metsäteollisuuden sähkönjakelun osalta kompensoinnin toteutukseen parhaiten keski- ja pienjännitetasoilla soveltuu estokelaparisto sen yksinkertaisen rakenteen, sekä edullisten huolto- ja hankintakustannusten takia. Yliaaltojen suodatus on teknistaloudellisesti kannattavinta toteuttaa keskijännitetasolle asennetulla passiivisuodattimella vastaaviin hyötyihin perustuen. Case-tarkastelulla saadut tulokset ovat suoraan sovellettavissa uusien laitosten kompensointi- ja yliaaltosuodatuslaitteistojen suunnittelussa. Lisäksi case-tarkastelun tulokset voivat toimia ohjaavana tekijänä olemassa olevan laitoksen kompensointijärjestelmän kehittämisen suhteen. Olemassa olevan laitoksen osalta kompensointi- ja yliaaltosuodatuslaitteisto investointien kannattavuuden arvioinnin suhteen on kiinnitettävä tämän työn tulosten ohella huomiota sähköverkon liityntämahdollisuuksiin, fyysisen tilan tarpeeseen sekä niistä mahdollisesti koituviin lisäkustannuksiin.

Työssä käsiteltiin laajaa aihealuetta, jossa varsinkin teknisten ratkaisuiden osalta olisi ollut mahdollista syventyä vielä tarkemmin erilaisiin tehoelektroniikkaa hyödyntäviin sähkön laatua parantaviin laitteistoihin. Nämä vaihtoehdot kuitenkin rajattiin pois tarkastelusta kustannusten, toimintavarmuuden ja rakenteen yksinkertaisuuden periaatteiden perusteella. Lisätutkimus suuntaajakäyttöisten kompensointilaitteiden, kuten STATCOM-järjestelmän tarkemmista ominaisuuksista sekä soveltuvuudesta metsäteollisuuden ympäristöön laajentaisi teknisten ratkaisuiden osalta erilaisten vaihtoehtojen vertailtavuutta. Toisena lisätutkimuskohteena tähän työhön liittyen voisi olla tarkempi selvitys pienjännitteellä ja keskijännitteellä toteutettujen yliaaltosuodatusten eroista suodatustehon sekä investoinnin kannattavuuden suhteen.

10 LÄHDELUETTELO

(ABB, 2000) ABB, 2000. Teknisiä tietoja ja taulukoita. 9. painos. Vaasa

(Aura et. Al., 1993) Aura, L., Tonteri, A., 1993. Sähkölaitostekniikka. Porvoo: WSOY

(Eronen et. Al., 2018) Eronen, M., Hietalahti, L., Männistö, M., Pakonen, P., Seesvuori, R., Seesvuori, V. & Wilén, T., 2018. Yliaallot ja kompensointi. Espoo: Sähköinfo Oy

(Fingrid, 2018) Fingrid, 2018. ”Voimalaitosten järjestelmätekniset vaatimukset”. [verkkodokumentti]. [Viitattu: 26.01.2024]. Saatavilla: https://www.fingrid.fi/kantaverkko/liitynta-kantaverkkoon/tekniset-vaatimukset/voimalaitosten-jarjestelmatekniset-vaatimukset/#voimalaitosten-jarjestelmateknisia-vaatimuksia-vjv2018-taydentavat-dokumentit

(Fingrid, 2021a) Fingrid, 2021. ”Loissähkön toimitus ja loistehoreservin ylläpito -sovellusohje”. [verkkodokumentti]. [Viitattu: 29.12.2023]. Saatavilla: https://www.fingrid.fi/globalassets/dokumentit/fi/palvelut/kayttovarma-sahkonsiirto/loissahkon-toimituksen-ja-loistehoreservin-yllapito-2021-id-244241.pdf

(Fingrid, 2021b) Fingrid, 2021. ”Yleiset liittymisehdot”. [verkkodokumentti]. [Viitattu: 28.04.2024]. Saatavilla: https://www.fingrid.fi/globalassets/dokumentit/fi/palvelut/kulutuksen-ja-tuotannon-liittaminen-kantaverkkoon/fingrid_yle2021.pdf

(Fingrid, 2024) Fingrid, 2024. ”Kantaverkkosopimus ja kantaverkkopalvelumaksut”. [verkkodokumentti]. [Viitattu: 29.04.2024]. Saatavilla: https://www.fingrid.fi/kantaverkko/liitynta-

kantaverkkoon/kantaverkkosopimus-ja--palvelumaksut/#kantaverkkopalvelumaksut

(Finlex, 2023) Finlex, 2023. ”Sähkömarkkinalaki” [verkkodokumentti]. [Viitattu: 20.04.2024]. Saatavilla: https://www.finlex.fi/fi/laki/ajantasa/2013/20130588

(GIGRE, 2020) GIGRE, 2020. Flexible AC Transmission Systems -FACTS. Sveitsi: Springer Nature Switzerland AG.

(Gorgiev, 2022) Gorgiev M, sa. ”What is the phase relationship between current and voltage in a purely inductive circuit?”. [verkkodokumentti]. [Viitattu: 10.02.2024]. Saatavilla: https://www.quora.com/How-is-current-maximum-when-voltage-is-zero-in-an-inductive-or-capacitive-circuit

(Hartman, 2014) Hartman, C. ”What is a Variable Frequency Drive?”. [verkkodokumentti]. [Viitattu: 06.05.2024]. Saatavilla: https://vfds.com/blog/what-is-a-vfd/

(IEEE, 2020) IEEE Standards Association, 2020. Analysis of Harmonics Detection and their Filtration by using Active Band Pass Filter for Domestic Appliances. USA: IEEE

(IEEE, 2016a) IEEE Standards Association, 2016. Application of STATCOM to an industrial distribution system connected to weak utility system. USA: IEEE

(IEEE, 2016b) IEEE Standards Association, 2016. Research of harmonic distortion power for harmonic source detection. USA: IEEE

(Kauria, 2019) Kauria, J., 2019. ”Loistehon hallinnan kehittäminen Kaukaan integraatissa”. [Diplomityö]. [Viitattu 29.04.2024]. Saatavissa: https://lutpub.lut.fi/bitstream/handle/10024/159981/Diplomity%c3%b6_Jerry_Kauria.pdf?sequence=1&isAllowed=y

(Korpinen, 1997) Korpinen, L., 1997. ”Sähköverkko”. [verkkodokumentti]. [Viitattu: 09.02.2024]. Saatavilla: http://www.leenakorpinen.fi/archive/sahkoverkko/kertaus_sahkoverkko.pdf

(Korpinen, 1998) Korpinen, L., 1998. ”3. Sähkön siirto- ja jakeluverkot”. [verkkodokumentti]. [Viitattu: 05.01.2024]. Saatavilla: http://www.leenakorpinen.fi/archive/svt_opus/3sahkon_siirto_ja_jakeluverkot.pdf

(Korpinen, 2008) Korpinen, L., 2008. ”Yliaalto-opus”. [verkkodokumentti]. [Viitattu: 02.02.2024]. Saatavilla: http://www.leenakorpinen.fi/archive/opukset/yliaalto-opus.pdf

(Lakervi & Partanen, 2008)

Lakervi, E. & Partanen, J., 2008. Sähkönjakelutekniikka. 1. painos. Helsinki: Otatieto

(SFS-EN, 2022) SESKO ry, 2022. SFS-EN 50160:2022 Yleisestä jakeluverkosta syötetyn sähkön jänniteominaisuudet. 6. painos. Helsinki: SFS ry

(Sähkötieto, 2014) Sähkötieto ry, 2014. ST 52.16 Yliaaltosuodatinlaitteet ja niiden sijoitus alle 1000 V:n pienjänniteverkossa. Espoo: Sähköinfo Oy

(Sähkötieto, 2016) Sähkötieto ry, 2016. ST 52.15 Loistehon kompensointi ja kompensointilaitteet alle 1000 V:n pienjänniteverkossa. Espoo: Sähköinfo Oy

(TKF, 2024) TKF Power Quality Oy, Tampere. 2024. Metsäteollisuuden laitosten kompensointiratkaisut 24.03.2024. Haastattelu. Julkaisematon

(UPM, 2024) UPM-Kymmene Oyj, Pietarsaari. 2024. Käyttäjäkokemukset metsäteollisuuden laitoksen kompensointiratkaisuista 16.05.2024. Haastattelu. Julkaisematon

(UPM, 2022) UPM, 2022. ”Sellutehtaat tasapainottavat energiakriisiä”. [verkkodokumentti]. [Viitattu: 02.01.2024]. Saatavilla: https://www.upmpulp.com/fi/artikkelit/sellu/22/Sellutehtaat-tasapainottavat-energiakriisia/

(UPM, 2017) UPM, 2017. ”UPM Kaukas näyttää mallia kiertotaloudessa”. [verkkodokumentti]. [Viitattu: 22.05.2024]. Saatavilla: https://www.upm.com/fi/ajankohtaista/artikkelit/2017/05/upm-kaukas-nayttaa-mallia-kiertotaloudessa/

LIITE I Kompensointitarpeen tehokulman kertoimen määritys

cos φ 1	cos φ 2							
	1	0,99	0,98	0,97	0,95	0,90	0,85	0,80
0,50	1,73	1,59	1,53	1,48	1,4	1,25	1,11	0,98
0,53	1,60	1,46	1,40	1,35	1,27	1,12	0,98	0,85
0,55	1,52	1,38	1,32	1,27	1,19	1,03	0,90	0,77
0,58	1,40	1,26	1,20	1,15	1,08	0,92	0,78	0,65
0,60	1,33	1,19	1,13	1,08	1,00	0,85	0,71	0,58
0,63	1,23	1,09	1,03	0,98	0,90	0,75	0,61	0,48
0,65	1,17	1,03	0,97	0,92	0,84	0,68	0,55	0,42
0,68	1,08	0,94	0,88	0,83	0,75	0,59	0,46	0,33
0,70	1,02	0,88	0,82	0,77	0,69	0,54	0,40	0,27
0,73	0,94	0,79	0,73	0,69	0,61	0,45	0,32	0,19
0,75	0,88	0,74	0,68	0,63	0,55	0,40	0,26	0,13
0,78	0,80	0,66	0,60	0,55	0,47	0,32	0,18	0,05
0,80	0,75	0,61	0,55	0,50	0,42	0,27	0,13	
0,83	0,67	0,53	0,47	0,42	0,34	0,19	0,05	
0,85	0,62	0,48	0,42	0,37	0,29	0,14		
0,86	0,59	0,45	0,39	0,34	0,26	0,11		
0,87	0,57	0,42	0,36	0,32	0,24	0,08		
0,88	0,54	0,40	0,34	0,29	0,21	0,06		
0,89	0,51	0,37	0,31	0,26	0,18	0,03		
0,90	0,48	0,34	0,28	0,23	0,16			
0,91	0,46	0,31	0,25	0,20	0,13			
0,92	0,43	0,28	0,22	0,18	0,10			
0,93	0,40	0,25	0,19	0,13	0,08			
0,94	0,36	0,22	0,16	0,11	0,03			
0,95	0,33	0,19	0,13	0,08				
0,96	0,29	0,15	0,09	0,04				
0,97	0,25	0,11	0,05					
0,98	0,20	0,06						
0,99	0,14							

UPM

Oletusraportti

vrk tunneista
01.02.2023 00 - 01.03.2023 00

	KAUK_E11(A1 E11), IN MWh	KAUK_E11(A1 E11), OUT MWh	KAUK_K01(AB10 18), IN MWh	KAUK_K01(AB10 18), OUT MWh	KAUK_K02(AB10 39), IN MWh	KAUK_K02(AB10 39), OUT MWh	A1 E06, PÄTÖTEHO (laskettu) MWh
01.02.2023 00-01	8,091	0,000	24,700	0,000	14,662	0,000	39,627
01.02.2023 01-02	7,767	0,000	24,711	0,000	14,644	0,000	39,665
01.02.2023 02-03	7,727	0,000	24,745	0,000	14,621	0,000	39,719
01.02.2023 03-04	7,688	0,000	24,464	0,000	14,555	0,000	39,330
01.02.2023 04-05	7,572	0,000	24,293	0,000	14,524	0,000	39,130
01.02.2023 05-06	7,484	0,000	24,171	0,000	14,536	0,000	39,044
01.02.2023 06-07	7,854	0,000	23,925	0,000	14,503	0,000	38,710
01.02.2023 07-08	8,000	0,000	23,654	0,000	14,325	0,000	38,221
01.02.2023 08-09	8,164	0,000	23,612	0,000	14,322	0,000	38,206
01.02.2023 09-10	8,062	0,000	23,571	0,000	14,312	0,000	38,158
01.02.2023 10-11	7,721	0,000	23,547	0,000	14,326	0,000	38,103
01.02.2023 11-12	7,703	0,000	23,475	0,000	14,315	0,000	38,054
01.02.2023 12-13	7,636	0,000	23,408	0,000	14,296	0,000	37,959
01.02.2023 13-14	7,551	0,000	23,304	0,000	14,178	0,000	37,767
01.02.2023 14-15	7,729	0,000	23,760	0,000	14,303	0,000	38,336
01.02.2023 15-16	7,779	0,000	23,530	0,000	14,188	0,000	37,948
01.02.2023 16-17	7,714	0,000	23,638	0,000	14,291	0,000	38,177
01.02.2023 17-18	7,773	0,000	23,569	0,000	14,233	0,000	38,057
01.02.2023 18-19	7,520	0,000	23,403	0,000	14,205	0,000	37,864
01.02.2023 19-20	7,599	0,000	23,435	0,000	14,235	0,000	37,942
01.02.2023 20-21	7,598	0,000	23,600	0,000	14,307	0,000	38,160
01.02.2023 21-22	7,412	0,000	23,557	0,000	14,248	0,000	38,034
01.02.2023 22-23	7,364	0,000	23,888	0,000	14,294	0,000	38,435
01.02.2023 23-00	7,660	0,000	24,225	0,000	14,419	0,000	38,923
02.02.2023 00-01	7,544	0,000	24,083	0,000	14,381	0,000	38,703
02.02.2023 01-02	7,428	0,000	24,035	0,000	14,411	0,000	38,798
02.02.2023 02-03	7,678	0,000	24,120	0,000	14,423	0,000	38,817
02.02.2023 03-04	7,918	0,000	24,246	0,000	14,520	0,000	39,110
02.02.2023 04-05	7,646	0,000	24,152	0,000	14,462	0,000	38,934
02.02.2023 05-06	8,252	0,000	23,992	0,000	14,464	0,000	38,770
02.02.2023 06-07	8,051	0,000	24,248	0,000	14,515	0,000	39,049
02.02.2023 07-08	8,429	0,000	24,373	0,000	14,548	0,000	39,248
02.02.2023 08-09	8,644	0,000	24,451	0,000	14,550	0,000	39,300
02.02.2023 09-10	7,840	0,000	24,418	0,000	14,514	0,000	39,272
02.02.2023 10-11	6,954	0,000	24,479	0,000	14,601	0,000	39,382
02.02.2023 11-12	7,674	0,000	24,299	0,000	14,447	0,000	39,068
02.02.2023 12-13	7,607	0,000	24,462	0,000	14,637	0,000	39,409
02.02.2023 13-14	7,741	0,000	24,400	0,000	14,552	0,000	39,294
02.02.2023 14-15	8,221	0,000	24,399	0,000	14,569	0,000	39,257
02.02.2023 15-16	8,976	0,000	24,483	0,000	14,460	0,000	39,244

UPM

Oletusraportti

vrk tunneista
01.02.2023 00 - 01.03.2023 00

	KAUK_E11(A1 E11), IN MWh	KAUK_E11(A1 E11), OUT MWh	KAUK_K01(AB10 18), IN MWh	KAUK_K01(AB10 18), OUT MWh	KAUK_K02(AB10 39), IN MWh	KAUK_K02(AB10 39), OUT MWh	A1 E06, PÄTÖTEHO (laskettu) MWh
02.02.2023 16-17	9,158	0,000	24,538	0,000	14,564	0,000	39,406
02.02.2023 17-18	9,040	0,000	24,437	0,000	14,573	0,000	39,325
02.02.2023 18-19	9,163	0,000	24,555	0,000	14,664	0,000	39,526
02.02.2023 19-20	9,230	0,000	24,652	0,000	14,684	0,000	39,636
02.02.2023 20-21	9,385	0,000	24,542	0,000	14,636	0,000	39,525
02.02.2023 21-22	8,715	0,000	24,540	0,000	14,609	0,000	39,455
02.02.2023 22-23	8,684	0,000	24,558	0,000	14,676	0,000	39,531
02.02.2023 23-00	8,768	0,000	24,543	0,000	14,633	0,000	39,490
03.02.2023 00-01	8,290	0,000	24,405	0,000	14,649	0,000	39,380
03.02.2023 01-02	8,244	0,000	24,426	0,000	14,655	0,000	39,407
03.02.2023 02-03	7,861	0,000	24,596	0,000	14,693	0,000	39,642
03.02.2023 03-04	8,234	0,000	24,424	0,000	14,619	0,000	39,384
03.02.2023 04-05	8,142	0,000	24,482	0,000	14,653	0,000	39,468
03.02.2023 05-06	8,565	0,000	24,549	0,000	14,677	0,000	39,587
03.02.2023 06-07	8,956	0,000	24,463	0,000	14,707	0,000	39,542
03.02.2023 07-08	9,749	0,000	24,177	0,000	14,687	0,000	39,184
03.02.2023 08-09	10,041	0,000	23,215	0,000	14,256	0,000	37,790
03.02.2023 09-10	10,165	0,000	23,376	0,000	14,349	0,000	38,084
03.02.2023 10-11	10,153	0,000	23,140	0,000	14,196	0,000	37,626
03.02.2023 11-12	10,001	0,000	23,064	0,000	14,097	0,000	37,440
03.02.2023 12-13	9,793	0,000	23,600	0,000	14,357	0,000	38,310
03.02.2023 13-14	8,517	0,000	24,063	0,000	14,455	0,000	38,822
03.02.2023 14-15	8,748	0,000	24,331	0,000	14,530	0,000	39,157
03.02.2023 15-16	8,776	0,000	24,522	0,000	14,724	0,000	39,558
03.02.2023 16-17	9,013	0,000	24,490	0,000	14,706	0,000	39,525
03.02.2023 17-18	8,993	0,000	24,293	0,000	14,597	0,000	39,228
03.02.2023 18-19	8,500	0,000	24,521	0,000	14,652	0,000	39,527
03.02.2023 19-20	8,671	0,000	24,631	0,000	14,674	0,000	39,629
03.02.2023 20-21	8,304	0,000	24,671	0,000	14,763	0,000	39,766
03.02.2023 21-22	8,368	0,000	24,666	0,000	14,719	0,000	39,740
03.02.2023 22-23	8,665	0,000	24,535	0,000	14,665	0,000	39,562
03.02.2023 23-00	8,675	0,000	24,530	0,000	14,656	0,000	39,496
04.02.2023 00-01	8,534	0,000	24,506	0,000	14,688	0,000	39,529
04.02.2023 01-02	8,369	0,000	24,747	0,000	14,900	0,000	40,015
04.02.2023 02-03	8,130	0,000	24,503	0,000	14,590	0,000	39,438
04.02.2023 03-04	8,131	0,000	24,567	0,000	14,606	0,000	39,509
04.02.2023 04-05	8,162	0,000	24,603	0,000	14,665	0,000	39,629
04.02.2023 05-06	8,162	0,000	24,651	0,000	14,760	0,000	39,785
04.02.2023 06-07	8,672	0,000	24,661	0,000	14,762	0,000	39,766
04.02.2023 07-08	8,623	0,000	24,774	0,000	14,924	0,000	40,088

UPM

Oletusraportti

vrk tunneista
01.02.2023 00 - 01.03.2023 00

	KAUK_E11(A1 E11), IN MWh	KAUK_E11(A1 E11), OUT MWh	KAUK_K01(AB10 18), IN MWh	KAUK_K01(AB10 18), OUT MWh	KAUK_K02(AB10 39), IN MWh	KAUK_K02(AB10 39), OUT MWh	A1 E06, PÄTÖTEHO (laskettu) MWh
04.02.2023 08-09	8,724	0,000	24,524	0,000	14,721	0,000	39,626
04.02.2023 09-10	8,549	0,000	24,370	0,000	14,574	0,000	39,289
04.02.2023 10-11	8,859	0,000	24,702	0,000	14,829	0,000	39,887
04.02.2023 11-12	8,859	0,000	24,640	0,000	14,757	0,000	39,735
04.02.2023 12-13	8,443	0,000	24,727	0,000	14,904	0,000	39,974
04.02.2023 13-14	8,465	0,000	24,697	0,000	14,945	0,000	39,969
04.02.2023 14-15	8,537	0,000	24,672	0,000	14,788	0,000	39,773
04.02.2023 15-16	8,426	0,000	24,550	0,000	14,704	0,000	39,633
04.02.2023 16-17	8,987	0,000	24,807	0,000	15,064	0,000	40,224
04.02.2023 17-18	9,169	0,000	24,716	0,000	14,928	0,000	39,998
04.02.2023 18-19	9,272	0,000	24,726	0,000	14,874	0,000	39,890
04.02.2023 19-20	8,980	0,000	24,713	0,000	14,820	0,000	39,840
04.02.2023 20-21	9,541	0,000	24,772	0,000	14,849	0,000	39,982
04.02.2023 21-22	9,035	0,000	24,677	0,000	14,878	0,000	39,912
04.02.2023 22-23	8,572	0,000	24,492	0,000	14,671	0,000	39,475
04.02.2023 23-00	8,961	0,000	24,407	0,000	14,611	0,000	39,327
05.02.2023 00-01	9,327	0,000	24,382	0,000	14,596	0,000	39,324
05.02.2023 01-02	9,267	0,000	24,536	0,000	14,668	0,000	39,558
05.02.2023 02-03	8,982	0,000	24,574	0,000	14,772	0,000	39,680
05.02.2023 03-04	9,600	0,000	24,573	0,000	14,757	0,000	39,661
05.02.2023 04-05	9,346	0,000	24,571	0,000	14,801	0,000	39,695
05.02.2023 05-06	9,068	0,000	24,500	0,000	14,709	0,000	39,525
05.02.2023 06-07	8,530	0,000	24,553	0,000	14,800	0,000	39,728
05.02.2023 07-08	8,422	0,000	24,428	0,000	14,690	0,000	39,438
05.02.2023 08-09	8,859	0,000	24,423	0,000	14,656	0,000	39,462
05.02.2023 09-10	9,146	0,000	24,676	0,000	14,770	0,000	39,792
05.02.2023 10-11	9,068	0,000	24,708	0,000	14,798	0,000	39,831
05.02.2023 11-12	10,354	0,000	24,678	0,000	14,718	0,000	39,731
05.02.2023 12-13	8,670	0,000	24,763	0,000	14,812	0,000	39,895
05.02.2023 13-14	8,160	0,000	24,812	0,000	14,858	0,000	40,019
05.02.2023 14-15	7,790	0,000	24,697	0,000	14,796	0,000	39,870
05.02.2023 15-16	7,531	0,000	24,708	0,000	14,811	0,000	39,822
05.02.2023 16-17	8,001	0,000	24,744	0,000	14,910	0,000	39,976
05.02.2023 17-18	8,088	0,000	24,711	0,000	14,800	0,000	39,868
05.02.2023 18-19	8,234	0,000	24,730	0,000	14,805	0,000	39,868
05.02.2023 19-20	8,601	0,000	24,801	0,000	14,805	0,000	39,984
05.02.2023 20-21	8,401	0,000	24,726	0,000	14,757	0,000	39,802
05.02.2023 21-22	8,287	0,000	24,772	0,000	14,742	0,000	39,823
05.02.2023 22-23	8,543	0,000	24,658	0,000	14,776	0,000	39,764
05.02.2023 23-00	8,734	0,000	24,670	0,000	14,800	0,000	39,794

UPM

Oletusraportti

vrk tunneista
01.02.2023 00 - 01.03.2023 00

	KAUK_E11(A1 E11), IN MWh	KAUK_E11(A1 E11), OUT MWh	KAUK_K01(AB10 18), IN MWh	KAUK_K01(AB10 18), OUT MWh	KAUK_K02(AB10 39), IN MWh	KAUK_K02(AB10 39), OUT MWh	A1 E06, PÄTÖTEHO (laskettu) MWh
06.02.2023 00-01	8,426	0,000	24,636	0,000	14,790	0,000	39,805
06.02.2023 01-02	7,913	0,000	24,751	0,000	14,829	0,000	39,958
06.02.2023 02-03	8,212	0,000	24,716	0,000	14,782	0,000	39,837
06.02.2023 03-04	8,597	0,000	24,746	0,000	14,870	0,000	39,974
06.02.2023 04-05	9,302	0,000	24,660	0,000	14,777	0,000	39,741
06.02.2023 05-06	9,032	0,000	24,721	0,000	14,781	0,000	39,797
06.02.2023 06-07	9,584	0,000	24,810	0,000	14,909	0,000	40,065
06.02.2023 07-08	9,801	0,000	24,773	0,000	14,869	0,000	39,964
06.02.2023 08-09	11,517	0,000	24,809	0,000	14,878	0,000	40,044
06.02.2023 09-10	11,062	0,000	24,804	0,000	14,830	0,000	39,977
06.02.2023 10-11	11,036	0,000	24,710	0,000	14,710	0,000	39,710
06.02.2023 11-12	9,970	0,000	24,755	0,000	14,846	0,000	39,918
06.02.2023 12-13	9,143	0,000	24,645	0,000	14,620	0,000	39,582
06.02.2023 13-14	8,417	0,000	24,148	0,000	13,894	0,000	38,332
06.02.2023 14-15	8,585	0,000	24,725	0,000	14,650	0,000	39,740
06.02.2023 15-16	9,634	0,000	24,901	0,000	14,876	0,000	40,134
06.02.2023 16-17	9,708	0,000	24,740	0,000	14,705	0,000	39,776
06.02.2023 17-18	9,643	0,000	24,864	0,000	14,896	0,000	40,078
06.02.2023 18-19	9,122	0,000	24,864	0,000	14,911	0,000	40,140
06.02.2023 19-20	8,981	0,000	24,916	0,000	14,907	0,000	40,134
06.02.2023 20-21	9,150	0,000	24,794	0,000	14,825	0,000	39,936
06.02.2023 21-22	9,229	0,000	24,889	0,000	14,838	0,000	40,045
06.02.2023 22-23	8,485	0,000	24,884	0,000	14,837	0,000	40,042
06.02.2023 23-00	9,103	0,000	24,951	0,000	14,848	0,000	40,138
07.02.2023 00-01	9,297	0,000	25,206	0,000	14,964	0,000	40,495
07.02.2023 01-02	9,250	0,000	25,160	0,000	14,978	0,000	40,481
07.02.2023 02-03	9,034	0,000	25,214	0,000	15,048	0,000	40,624
07.02.2023 03-04	9,235	0,000	25,282	0,000	15,137	0,000	40,767
07.02.2023 04-05	9,119	0,000	25,305	0,000	15,184	0,000	40,825
07.02.2023 05-06	9,000	0,000	25,180	0,000	15,040	0,000	40,586
07.02.2023 06-07	9,237	0,000	24,942	0,000	14,893	0,000	40,176
07.02.2023 07-08	9,701	0,000	25,010	0,000	14,908	0,000	40,226
07.02.2023 08-09	10,096	0,000	25,038	0,000	14,923	0,000	40,275
07.02.2023 09-10	9,154	0,000	25,114	0,000	14,950	0,000	40,374
07.02.2023 10-11	8,741	0,000	25,083	0,000	14,907	0,000	40,324
07.02.2023 11-12	8,679	0,000	24,940	0,000	14,821	0,000	40,057
07.02.2023 12-13	8,137	0,000	24,904	0,000	14,734	0,000	39,975
07.02.2023 13-14	8,136	0,000	24,763	0,000	14,669	0,000	39,760
07.02.2023 14-15	7,806	0,000	24,851	0,000	14,739	0,000	39,918
07.02.2023 15-16	8,150	0,000	24,628	0,000	14,605	0,000	39,570

UPM

Oletusraportti

vrk tunneista
01.02.2023 00 - 01.03.2023 00

	KAUK_E11(A1 E11), IN MWh	KAUK_E11(A1 E11), OUT MWh	KAUK_K01(AB10 18), IN MWh	KAUK_K01(AB10 18), OUT MWh	KAUK_K02(AB10 39), IN MWh	KAUK_K02(AB10 39), OUT MWh	A1 E06, PÄTÖTEHO (laskettu) MWh
07.02.2023 16-17	8,058	0,000	24,639	0,000	14,602	0,000	39,600
07.02.2023 17-18	8,550	0,000	24,902	0,000	14,737	0,000	39,976
07.02.2023 18-19	8,014	0,000	24,781	0,000	14,545	0,000	39,661
07.02.2023 19-20	7,990	0,000	24,869	0,000	14,673	0,000	39,912
07.02.2023 20-21	8,557	0,000	24,838	0,000	14,590	0,000	39,738
07.02.2023 21-22	8,629	0,000	24,647	0,000	14,486	0,000	39,443
07.02.2023 22-23	8,061	0,000	24,664	0,000	14,498	0,000	39,476
07.02.2023 23-00	8,192	0,000	24,775	0,000	14,584	0,000	39,682
08.02.2023 00-01	8,343	0,000	24,606	0,000	14,506	0,000	39,440
08.02.2023 01-02	7,925	0,000	24,657	0,000	14,465	0,000	39,428
08.02.2023 02-03	8,462	0,000	24,595	0,000	14,515	0,000	39,422
08.02.2023 03-04	8,031	0,000	24,911	0,000	14,621	0,000	39,843
08.02.2023 04-05	7,733	0,000	23,351	0,000	12,514	0,000	36,150
08.02.2023 05-06	7,378	0,000	22,505	0,000	11,527	0,000	34,286
08.02.2023 06-07	8,357	0,000	22,347	0,000	11,345	0,000	33,930
08.02.2023 07-08	8,560	0,000	22,330	0,000	11,432	0,000	34,009
08.02.2023 08-09	7,625	0,000	22,202	0,000	11,391	0,000	33,830
08.02.2023 09-10	7,884	0,000	22,158	0,000	11,317	0,000	33,729
08.02.2023 10-11	7,542	0,000	22,441	0,000	11,404	0,000	34,044
08.02.2023 11-12	7,425	0,000	22,484	0,000	11,440	0,000	34,163
08.02.2023 12-13	7,433	0,000	22,306	0,000	11,314	0,000	33,830
08.02.2023 13-14	7,470	0,000	22,323	0,000	11,391	0,000	33,935
08.02.2023 14-15	7,565	0,000	22,314	0,000	11,314	0,000	33,874
08.02.2023 15-16	7,475	0,000	22,451	0,000	11,421	0,000	34,060
08.02.2023 16-17	7,581	0,000	22,347	0,000	11,247	0,000	33,772
08.02.2023 17-18	7,541	0,000	22,532	0,000	11,405	0,000	34,166
08.02.2023 18-19	7,462	0,000	22,641	0,000	11,473	0,000	34,317
08.02.2023 19-20	7,824	0,000	23,036	0,000	11,931	0,000	35,214
08.02.2023 20-21	8,687	0,000	24,773	0,000	14,305	0,000	39,381
08.02.2023 21-22	8,739	0,000	25,498	0,000	15,180	0,000	40,979
08.02.2023 22-23	7,661	0,000	25,180	0,000	14,904	0,000	40,413
08.02.2023 23-00	7,822	0,000	24,967	0,000	14,853	0,000	40,139
09.02.2023 00-01	7,844	0,000	25,028	0,000	14,871	0,000	40,247
09.02.2023 01-02	8,299	0,000	24,840	0,000	14,701	0,000	39,850
09.02.2023 02-03	7,982	0,000	25,014	0,000	14,872	0,000	40,219
09.02.2023 03-04	7,784	0,000	24,697	0,000	14,848	0,000	39,854
09.02.2023 04-05	8,600	0,000	24,769	0,000	14,850	0,000	39,954
09.02.2023 05-06	8,915	0,000	24,567	0,000	14,706	0,000	39,564
09.02.2023 06-07	9,066	0,000	24,768	0,000	14,810	0,000	39,913
09.02.2023 07-08	8,801	0,000	24,689	0,000	14,754	0,000	39,788

UPM

Oletusraportti

vrk tunneista
01.02.2023 00 - 01.03.2023 00

	KAUK_E11(A1 E11), IN MWh	KAUK_E11(A1 E11), OUT MWh	KAUK_K01(AB10 18), IN MWh	KAUK_K01(AB10 18), OUT MWh	KAUK_K02(AB10 39), IN MWh	KAUK_K02(AB10 39), OUT MWh	A1 E06, PÄTÖTEHO (laskettu) MWh
09.02.2023 08-09	9,180	0,000	24,460	0,000	14,729	0,000	39,501
09.02.2023 09-10	9,078	0,000	24,318	0,000	14,679	0,000	39,290
09.02.2023 10-11	8,666	0,000	24,308	0,000	14,639	0,000	39,237
09.02.2023 11-12	8,687	0,000	24,198	0,000	14,674	0,000	39,187
09.02.2023 12-13	8,870	0,000	23,889	0,000	14,595	0,000	38,796
09.02.2023 13-14	8,836	0,000	23,912	0,000	14,571	0,000	38,772
09.02.2023 14-15	7,889	0,000	24,568	0,000	14,695	0,000	39,581
09.02.2023 15-16	7,828	0,000	24,939	0,000	15,039	0,000	40,289
09.02.2023 16-17	8,184	0,000	24,994	0,000	14,827	0,000	40,118
09.02.2023 17-18	8,852	0,000	24,892	0,000	14,845	0,000	40,039
09.02.2023 18-19	7,900	0,000	24,981	0,000	14,835	0,000	40,126
09.02.2023 19-20	8,103	0,000	25,122	0,000	14,885	0,000	40,343
09.02.2023 20-21	8,360	0,000	25,130	0,000	14,890	0,000	40,358
09.02.2023 21-22	8,939	0,000	25,132	0,000	14,827	0,000	40,285
09.02.2023 22-23	8,757	0,000	24,892	0,000	14,774	0,000	40,029
09.02.2023 23-00	8,383	0,000	25,059	0,000	14,880	0,000	40,231
10.02.2023 00-01	8,455	0,000	24,759	0,000	14,808	0,000	39,833
10.02.2023 01-02	8,547	0,000	24,199	0,000	14,610	0,000	39,069
10.02.2023 02-03	8,405	0,000	24,286	0,000	14,614	0,000	39,230
10.02.2023 03-04	8,552	0,000	24,057	0,000	14,578	0,000	38,905
10.02.2023 04-05	8,706	0,000	22,284	0,000	12,166	0,000	34,736
10.02.2023 05-06	9,394	0,000	21,625	0,000	11,612	0,000	33,430
10.02.2023 06-07	10,174	0,000	21,523	0,000	11,514	0,000	33,136
10.02.2023 07-08	10,849	0,000	21,184	0,000	11,403	0,000	32,934
10.02.2023 08-09	11,760	0,000	20,504	0,000	11,057	0,000	31,872
10.02.2023 09-10	12,876	0,000	20,044	0,000	10,619	0,000	30,694
10.02.2023 10-11	11,935	0,000	19,284	0,000	10,507	0,000	29,890
10.02.2023 11-12	12,812	0,000	17,145	0,000	9,640	0,000	26,935
10.02.2023 12-13	12,453	0,000	17,010	0,000	10,056	0,000	27,188
10.02.2023 13-14	12,981	0,000	16,850	0,000	9,897	0,000	26,917
10.02.2023 14-15	12,176	0,000	16,753	0,000	9,892	0,000	26,814
10.02.2023 15-16	12,696	0,000	17,046	0,000	10,149	0,000	27,361
10.02.2023 16-17	14,011	0,000	17,378	0,000	10,115	0,000	27,744
10.02.2023 17-18	13,677	0,000	17,348	0,000	10,065	0,000	27,563
10.02.2023 18-19	11,739	0,000	15,441	0,000	8,921	0,000	24,325
10.02.2023 19-20	11,752	0,000	14,869	0,000	8,367	0,000	23,295
10.02.2023 20-21	9,238	0,000	15,622	0,000	8,435	0,000	24,105
10.02.2023 21-22	9,166	0,000	15,839	0,000	8,386	0,000	24,321
10.02.2023 22-23	9,706	0,000	15,963	0,000	8,597	0,000	24,710
10.02.2023 23-00	9,376	0,000	18,231	0,000	11,140	0,000	29,571

UPM

Oletusraportti

vrk tunneista
01.02.2023 00 - 01.03.2023 00

	KAUK_E11(A1 E11), IN MWh	KAUK_E11(A1 E11), OUT MWh	KAUK_K01(AB10 18), IN MWh	KAUK_K01(AB10 18), OUT MWh	KAUK_K02(AB10 39), IN MWh	KAUK_K02(AB10 39), OUT MWh	A1 E06, PÄTÖTEHO (laskettu) MWh
11.02.2023 00-01	8,292	0,000	18,956	0,000	11,197	0,000	30,347
11.02.2023 01-02	8,435	0,000	19,001	0,000	11,177	0,000	30,366
11.02.2023 02-03	7,672	0,000	19,491	0,000	11,395	0,000	31,079
11.02.2023 03-04	7,366	0,000	19,690	0,000	11,677	0,000	31,552
11.02.2023 04-05	7,361	0,000	19,871	0,000	11,925	0,000	32,010
11.02.2023 05-06	7,903	0,000	19,837	0,000	11,827	0,000	31,848
11.02.2023 06-07	7,328	0,000	19,731	0,000	11,660	0,000	31,593
11.02.2023 07-08	7,845	0,000	19,973	0,000	11,811	0,000	31,991
11.02.2023 08-09	7,916	0,000	19,876	0,000	11,700	0,000	31,761
11.02.2023 09-10	8,740	0,000	20,080	0,000	11,900	0,000	32,155
11.02.2023 10-11	8,076	0,000	20,604	0,000	12,140	0,000	32,989
11.02.2023 11-12	9,193	0,000	21,532	0,000	12,831	0,000	34,474
11.02.2023 12-13	8,468	0,000	22,044	0,000	13,296	0,000	35,620
11.02.2023 13-14	9,065	0,000	23,255	0,000	13,880	0,000	37,389
11.02.2023 14-15	10,051	0,000	23,130	0,000	13,944	0,000	37,366
11.02.2023 15-16	10,514	0,000	23,062	0,000	14,018	0,000	37,364
11.02.2023 16-17	10,209	0,000	23,180	0,000	14,078	0,000	37,508
11.02.2023 17-18	10,853	0,000	23,274	0,000	14,165	0,000	37,708
11.02.2023 18-19	11,238	0,000	23,297	0,000	14,194	0,000	37,779
11.02.2023 19-20	11,053	0,000	23,404	0,000	14,332	0,000	38,025
11.02.2023 20-21	9,820	0,000	23,490	0,000	14,310	0,000	38,094
11.02.2023 21-22	10,263	0,000	23,583	0,000	14,360	0,000	38,219
11.02.2023 22-23	9,973	0,000	23,842	0,000	14,497	0,000	38,650
11.02.2023 23-00	10,473	0,000	24,159	0,000	14,620	0,000	39,080
12.02.2023 00-01	9,771	0,000	24,401	0,000	14,789	0,000	39,498
12.02.2023 01-02	9,984	0,000	24,375	0,000	14,742	0,000	39,421
12.02.2023 02-03	9,744	0,000	24,352	0,000	14,715	0,000	39,369
12.02.2023 03-04	9,403	0,000	24,436	0,000	14,769	0,000	39,545
12.02.2023 04-05	9,432	0,000	24,507	0,000	14,769	0,000	39,622
12.02.2023 05-06	9,789	0,000	24,524	0,000	14,809	0,000	39,649
12.02.2023 06-07	10,133	0,000	24,378	0,000	14,642	0,000	39,341
12.02.2023 07-08	10,055	0,000	24,389	0,000	14,652	0,000	39,313
12.02.2023 08-09	10,110	0,000	24,248	0,000	14,572	0,000	39,105
12.02.2023 09-10	9,467	0,000	24,311	0,000	14,574	0,000	39,199
12.02.2023 10-11	9,156	0,000	24,206	0,000	14,494	0,000	39,012
12.02.2023 11-12	9,028	0,000	24,455	0,000	14,642	0,000	39,419
12.02.2023 12-13	8,981	0,000	24,475	0,000	14,610	0,000	39,387
12.02.2023 13-14	8,312	0,000	24,554	0,000	14,700	0,000	39,544
12.02.2023 14-15	8,538	0,000	24,494	0,000	14,619	0,000	39,439
12.02.2023 15-16	8,802	0,000	24,561	0,000	14,723	0,000	39,632

UPM

Oletusraportti

vrk tunneista
01.02.2023 00 - 01.03.2023 00

	KAUK_E11(A1 E11), IN MWh	KAUK_E11(A1 E11), OUT MWh	KAUK_K01(AB10 18), IN MWh	KAUK_K01(AB10 18), OUT MWh	KAUK_K02(AB10 39), IN MWh	KAUK_K02(AB10 39), OUT MWh	A1 E06, PÄTÖTEHO (laskettu) MWh
12.02.2023 16-17	8,845	0,000	24,489	0,000	14,620	0,000	39,414
12.02.2023 17-18	8,589	0,000	24,485	0,000	14,654	0,000	39,455
12.02.2023 18-19	8,787	0,000	24,408	0,000	14,645	0,000	39,372
12.02.2023 19-20	8,674	0,000	24,326	0,000	14,562	0,000	39,170
12.02.2023 20-21	8,442	0,000	24,309	0,000	14,532	0,000	39,145
12.02.2023 21-22	8,327	0,000	24,258	0,000	14,577	0,000	39,114
12.02.2023 22-23	8,622	0,000	24,221	0,000	14,589	0,000	39,096
12.02.2023 23-00	8,771	0,000	24,111	0,000	14,471	0,000	38,878
13.02.2023 00-01	9,031	0,000	24,206	0,000	14,538	0,000	39,056
13.02.2023 01-02	8,839	0,000	24,419	0,000	14,681	0,000	39,421
13.02.2023 02-03	9,094	0,000	24,429	0,000	14,750	0,000	39,470
13.02.2023 03-04	8,445	0,000	24,237	0,000	14,518	0,000	39,104
13.02.2023 04-05	8,167	0,000	24,129	0,000	14,381	0,000	38,824
13.02.2023 05-06	8,870	0,000	23,914	0,000	14,226	0,000	38,447
13.02.2023 06-07	8,040	0,000	23,750	0,000	14,078	0,000	38,153
13.02.2023 07-08	8,992	0,000	23,685	0,000	14,053	0,000	37,977
13.02.2023 08-09	9,332	0,000	23,634	0,000	13,987	0,000	37,900
13.02.2023 09-10	8,217	0,000	23,546	0,000	13,908	0,000	37,849
13.02.2023 10-11	7,876	0,000	23,493	0,000	13,949	0,000	37,826
13.02.2023 11-12	7,550	0,000	23,451	0,000	13,801	0,000	37,552
13.02.2023 12-13	7,176	0,000	23,149	0,000	13,301	0,000	36,582
13.02.2023 13-14	7,164	0,000	23,101	0,000	13,335	0,000	36,673
13.02.2023 14-15	7,251	0,000	23,416	0,000	13,604	0,000	37,152
13.02.2023 15-16	7,576	0,000	23,207	0,000	13,291	0,000	36,778
13.02.2023 16-17	7,609	0,000	23,134	0,000	13,320	0,000	36,981
13.02.2023 17-18	7,941	0,000	23,422	0,000	13,589	0,000	37,261
13.02.2023 18-19	7,707	0,000	23,608	0,000	13,841	0,000	37,758
13.02.2023 19-20	8,333	0,000	23,632	0,000	13,839	0,000	37,678
13.02.2023 20-21	8,440	0,000	23,641	0,000	13,994	0,000	37,944
13.02.2023 21-22	7,915	0,000	23,575	0,000	13,973	0,000	37,775
13.02.2023 22-23	8,620	0,000	23,421	0,000	14,032	0,000	37,575
13.02.2023 23-00	8,227	0,000	23,788	0,000	14,367	0,000	38,480
14.02.2023 00-01	8,745	0,000	23,683	0,000	14,277	0,000	38,247
14.02.2023 01-02	9,189	0,000	23,827	0,000	14,450	0,000	38,567
14.02.2023 02-03	8,941	0,000	23,731	0,000	14,377	0,000	38,397
14.02.2023 03-04	8,922	0,000	23,536	0,000	14,239	0,000	38,073
14.02.2023 04-05	9,327	0,000	23,751	0,000	14,428	0,000	38,500
14.02.2023 05-06	8,788	0,000	23,691	0,000	14,417	0,000	38,404
14.02.2023 06-07	9,177	0,000	23,785	0,000	14,555	0,000	38,655
14.02.2023 07-08	9,632	0,000	23,815	0,000	14,511	0,000	38,630

UPM

Oletusraportti

vrk tunneista
01.02.2023 00 - 01.03.2023 00

	KAUK_E11(A1 E11), IN MWh	KAUK_E11(A1 E11), OUT MWh	KAUK_K01(AB10 18), IN MWh	KAUK_K01(AB10 18), OUT MWh	KAUK_K02(AB10 39), IN MWh	KAUK_K02(AB10 39), OUT MWh	A1 E06, PÄTÖTEHO (laskettu) MWh
14.02.2023 08-09	9,309	0,000	23,418	0,000	14,035	0,000	37,733
14.02.2023 09-10	9,463	0,000	23,039	0,000	13,837	0,000	37,152
14.02.2023 10-11	9,821	0,000	22,644	0,000	13,388	0,000	36,290
14.02.2023 11-12	9,540	0,000	22,530	0,000	13,311	0,000	36,058
14.02.2023 12-13	9,096	0,000	21,859	0,000	12,367	0,000	34,439
14.02.2023 13-14	7,468	0,000	20,242	0,000	10,294	0,000	30,627#
14.02.2023 14-15	7,577	0,000	20,364	0,000	10,391	0,000	30,926
14.02.2023 15-16	7,699	0,000	19,947	0,000	9,998	0,000	30,147
14.02.2023 16-17	7,976	0,000	19,496	0,000	9,908	0,000	29,607
14.02.2023 17-18	8,503	0,000	19,502	0,000	9,949	0,000	29,650
14.02.2023 18-19	8,423	0,000	19,430	0,000	9,907	0,000	29,517
14.02.2023 19-20	8,294	0,000	19,211	0,000	9,818	0,000	29,216
14.02.2023 20-21	8,349	0,000	19,275	0,000	9,848	0,000	29,320
14.02.2023 21-22	8,700	0,000	19,355	0,000	9,903	0,000	29,444
14.02.2023 22-23	8,824	0,000	19,142	0,000	9,808	0,000	29,140
14.02.2023 23-00	8,427	0,000	19,715	0,000	10,598	0,000	30,456
15.02.2023 00-01	8,813	0,000	20,366	0,000	11,921	0,000	32,477
15.02.2023 01-02	8,489	0,000	21,107	0,000	12,280	0,000	33,596
15.02.2023 02-03	8,851	0,000	21,179	0,000	12,540	0,000	33,971
15.02.2023 03-04	8,730	0,000	20,542	0,000	12,253	0,000	33,030
15.02.2023 04-05	8,614	0,000	20,324	0,000	12,138	0,000	32,673
15.02.2023 05-06	9,301	0,000	20,154	0,000	12,048	0,000	32,394
15.02.2023 06-07	10,760	0,000	20,261	0,000	12,121	0,000	32,618
15.02.2023 07-08	10,652	0,000	19,363	0,000	11,465	0,000	31,048
15.02.2023 08-09	9,639	0,000	19,052	0,000	11,529	0,000	30,774
15.02.2023 09-10	9,423	0,000	19,015	0,000	11,274	0,000	30,506
15.02.2023 10-11	8,699	0,000	19,301	0,000	11,553	0,000	31,045
15.02.2023 11-12	9,553	0,000	20,035	0,000	12,045	0,000	32,309
15.02.2023 12-13	8,676	0,000	19,332	0,000	11,257	0,000	30,781
15.02.2023 13-14	8,263	0,000	19,819	0,000	11,934	0,000	31,957
15.02.2023 14-15	8,278	0,000	19,888	0,000	11,880	0,000	32,013
15.02.2023 15-16	8,678	0,000	19,914	0,000	11,958	0,000	32,066
15.02.2023 16-17	8,720	0,000	20,362	0,000	12,490	0,000	33,108
15.02.2023 17-18	10,039	0,000	20,462	0,000	12,381	0,000	33,085
15.02.2023 18-19	10,358	0,000	21,144	0,000	12,818	0,000	34,199
15.02.2023 19-20	11,426	0,000	21,376	0,000	12,982	0,000	34,579
15.02.2023 20-21	11,690	0,000	21,306	0,000	12,673	0,000	34,266
15.02.2023 21-22	10,220	0,000	19,355	0,000	10,108	0,000	29,682
15.02.2023 22-23	9,162	0,000	19,144	0,000	9,928	0,000	29,297
15.02.2023 23-00	9,179	0,000	18,925	0,000	9,647	0,000	28,771

UPM

Oletusraportti

vrk tunneista
01.02.2023 00 - 01.03.2023 00

	KAUK_E11(A1 E11), IN MWh	KAUK_E11(A1 E11), OUT MWh	KAUK_K01(AB10 18), IN MWh	KAUK_K01(AB10 18), OUT MWh	KAUK_K02(AB10 39), IN MWh	KAUK_K02(AB10 39), OUT MWh	A1 E06, PÄTÖTEHO (laskettu) MWh
16.02.2023 00-01	9,330	0,000	18,827	0,000	9,571	0,000	28,578
16.02.2023 01-02	9,015	0,000	18,827	0,000	9,608	0,000	28,621
16.02.2023 02-03	8,729	0,000	18,938	0,000	9,625	0,000	28,768
16.02.2023 03-04	9,431	0,000	18,960	0,000	9,658	0,000	28,806
16.02.2023 04-05	9,543	0,000	19,132	0,000	9,750	0,000	29,046
16.02.2023 05-06	9,123	0,000	18,998	0,000	9,695	0,000	28,913
16.02.2023 06-07	9,170	0,000	18,899	0,000	9,633	0,000	28,730
16.02.2023 07-08	9,134	0,000	19,018	0,000	9,709	0,000	28,902
16.02.2023 08-09	9,470	0,000	19,022	0,000	9,761	0,000	28,989
16.02.2023 09-10	9,115	0,000	19,409	0,000	9,951	0,000	29,557
16.02.2023 10-11	9,016	0,000	19,572	0,000	10,075	0,000	29,839
16.02.2023 11-12	8,482	0,000	19,676	0,000	10,116	0,000	30,007
16.02.2023 12-13	8,376	0,000	19,858	0,000	10,178	0,000	30,237
16.02.2023 13-14	8,509	0,000	19,736	0,000	10,040	0,000	29,962
16.02.2023 14-15	8,224	0,000	19,658	0,000	9,999	0,000	29,855
16.02.2023 15-16	8,562	0,000	19,695	0,000	10,089	0,000	29,995
16.02.2023 16-17	8,922	0,000	19,781	0,000	10,271	0,000	30,235
16.02.2023 17-18	8,565	0,000	19,817	0,000	10,279	0,000	30,311
16.02.2023 18-19	8,378	0,000	19,889	0,000	10,357	0,000	30,374
16.02.2023 19-20	8,766	0,000	19,885	0,000	10,321	0,000	30,381
16.02.2023 20-21	8,473	0,000	19,860	0,000	10,289	0,000	30,336
16.02.2023 21-22	8,327	0,000	19,666	0,000	10,159	0,000	30,026
16.02.2023 22-23	9,168	0,000	19,090	0,000	10,012	0,000	29,309
16.02.2023 23-00	8,818	0,000	18,990	0,000	9,986	0,000	29,144
17.02.2023 00-01	8,589	0,000	19,092	0,000	9,993	0,000	29,260
17.02.2023 01-02	8,615	0,000	19,200	0,000	10,036	0,000	29,413
17.02.2023 02-03	8,641	0,000	19,270	0,000	10,071	0,000	29,544
17.02.2023 03-04	8,689	0,000	19,142	0,000	9,960	0,000	29,301
17.02.2023 04-05	8,513	0,000	19,142	0,000	10,002	0,000	29,335
17.02.2023 05-06	8,699	0,000	19,077	0,000	9,990	0,000	29,250
17.02.2023 06-07	9,005	0,000	19,151	0,000	10,130	0,000	29,460
17.02.2023 07-08	9,801	0,000	19,299	0,000	10,067	0,000	29,574
17.02.2023 08-09	10,570	0,000	19,436	0,000	10,036	0,000	29,672
17.02.2023 09-10	9,344	0,000	19,450	0,000	10,064	0,000	29,677
17.02.2023 10-11	8,966	0,000	19,269	0,000	9,746	0,000	29,233
17.02.2023 11-12	10,120	0,000	18,992	0,000	9,488	0,000	28,658
17.02.2023 12-13	10,063	0,000	18,891	0,000	9,434	0,000	28,509
17.02.2023 13-14	9,603	0,000	19,057	0,000	9,501	0,000	28,743
17.02.2023 14-15	9,537	0,000	19,305	0,000	9,733	0,000	29,223
17.02.2023 15-16	9,795	0,000	19,562	0,000	10,038	0,000	29,796

UPM

Oletusraportti

vrk tunneista
01.02.2023 00 - 01.03.2023 00

	KAUK_E11(A1 E11), IN MWh	KAUK_E11(A1 E11), OUT MWh	KAUK_K01(AB10 18), IN MWh	KAUK_K01(AB10 18), OUT MWh	KAUK_K02(AB10 39), IN MWh	KAUK_K02(AB10 39), OUT MWh	A1 E06, PÄTÖTEHO (laskettu) MWh
17.02.2023 16-17	9,867	0,000	19,582	0,000	10,142	0,000	29,907
17.02.2023 17-18	10,517	0,000	20,267	0,000	10,666	0,000	31,105
17.02.2023 18-19	11,296	0,000	20,547	0,000	10,822	0,000	31,572
17.02.2023 19-20	11,551	0,000	20,917	0,000	11,140	0,000	32,292
17.02.2023 20-21	11,061	0,000	20,647	0,000	10,970	0,000	31,833
17.02.2023 21-22	11,345	0,000	20,682	0,000	11,006	0,000	31,895
17.02.2023 22-23	10,058	0,000	20,592	0,000	10,931	0,000	31,711
17.02.2023 23-00	10,156	0,000	20,451	0,000	10,884	0,000	31,583
18.02.2023 00-01	8,880	0,000	20,754	0,000	11,030	0,000	32,039
18.02.2023 01-02	8,395	0,000	20,731	0,000	11,044	0,000	31,997
18.02.2023 02-03	8,685	0,000	20,652	0,000	10,885	0,000	31,772
18.02.2023 03-04	9,135	0,000	20,535	0,000	10,894	0,000	31,606
18.02.2023 04-05	8,641	0,000	20,448	0,000	10,843	0,000	31,506
18.02.2023 05-06	8,549	0,000	20,104	0,000	10,558	0,000	30,862
18.02.2023 06-07	8,613	0,000	20,100	0,000	10,654	0,000	30,936
18.02.2023 07-08	9,616	0,000	20,317	0,000	10,765	0,000	31,291
18.02.2023 08-09	10,160	0,000	21,522	0,000	12,349	0,000	34,103
18.02.2023 09-10	11,159	0,000	22,677	0,000	13,732	0,000	36,757
18.02.2023 10-11	11,179	0,000	22,690	0,000	13,591	0,000	36,545
18.02.2023 11-12	10,130	0,000	23,287	0,000	14,276	0,000	37,828
18.02.2023 12-13	11,359	0,000	23,389	0,000	14,432	0,000	38,184
18.02.2023 13-14	10,915	0,000	23,021	0,000	13,952	0,000	37,484
18.02.2023 14-15	11,036	0,000	23,308	0,000	14,175	0,000	37,796
18.02.2023 15-16	11,707	0,000	23,591	0,000	14,455	0,000	38,378
18.02.2023 16-17	11,368	0,000	23,614	0,000	14,320	0,000	38,049
18.02.2023 17-18	10,999	0,000	23,986	0,000	14,437	0,000	38,717
18.02.2023 18-19	11,104	0,000	23,829	0,000	14,353	0,000	38,525
18.02.2023 19-20	11,264	0,000	24,109	0,000	14,401	0,000	38,670
18.02.2023 20-21	10,456	0,000	24,332	0,000	14,545	0,000	39,255
18.02.2023 21-22	10,092	0,000	24,256	0,000	14,535	0,000	39,099
18.02.2023 22-23	10,120	0,000	24,156	0,000	14,454	0,000	38,944
18.02.2023 23-00	9,665	0,000	24,031	0,000	14,355	0,000	38,726
19.02.2023 00-01	10,232	0,000	24,110	0,000	14,485	0,000	38,908
19.02.2023 01-02	10,008	0,000	24,174	0,000	14,512	0,000	39,010
19.02.2023 02-03	9,912	0,000	24,217	0,000	14,554	0,000	39,096
19.02.2023 03-04	10,205	0,000	24,312	0,000	14,687	0,000	39,344
19.02.2023 04-05	9,985	0,000	24,223	0,000	14,629	0,000	39,204
19.02.2023 05-06	9,783	0,000	24,316	0,000	14,728	0,000	39,386
19.02.2023 06-07	10,130	0,000	24,318	0,000	14,710	0,000	39,350
19.02.2023 07-08	10,019	0,000	24,362	0,000	14,713	0,000	39,387

UPM

Oletusraportti

vrk tunneista
01.02.2023 00 - 01.03.2023 00

	KAUK_E11(A1 E11), IN MWh	KAUK_E11(A1 E11), OUT MWh	KAUK_K01(AB10 18), IN MWh	KAUK_K01(AB10 18), OUT MWh	KAUK_K02(AB10 39), IN MWh	KAUK_K02(AB10 39), OUT MWh	A1 E06, PÄTÖTEHO (laskettu) MWh
19.02.2023 08-09	9,745	0,000	24,227	0,000	14,581	0,000	39,191
19.02.2023 09-10	9,505	0,000	24,062	0,000	14,401	0,000	38,894
19.02.2023 10-11	9,271	0,000	23,228	0,000	13,879	0,000	37,692
19.02.2023 11-12	9,110	0,000	23,075	0,000	13,832	0,000	37,238
19.02.2023 12-13	9,192	0,000	22,959	0,000	13,901	0,000	37,103
19.02.2023 13-14	10,389	0,000	22,851	0,000	13,857	0,000	36,979
19.02.2023 14-15	9,485	0,000	22,886	0,000	13,889	0,000	37,060
19.02.2023 15-16	10,010	0,000	23,139	0,000	14,157	0,000	37,593
19.02.2023 16-17	9,895	0,000	23,071	0,000	13,989	0,000	37,262
19.02.2023 17-18	10,267	0,000	23,353	0,000	14,177	0,000	37,742
19.02.2023 18-19	10,211	0,000	23,713	0,000	14,435	0,000	38,350
19.02.2023 19-20	9,820	0,000	23,644	0,000	14,333	0,000	38,279
19.02.2023 20-21	11,361	0,000	23,686	0,000	14,397	0,000	38,382
19.02.2023 21-22	11,103	0,000	23,633	0,000	14,384	0,000	38,320
19.02.2023 22-23	11,104	0,000	23,869	0,000	14,554	0,000	38,721
19.02.2023 23-00	10,324	0,000	24,148	0,000	14,611	0,000	39,107
20.02.2023 00-01	9,548	0,000	24,231	0,000	14,614	0,000	39,160
20.02.2023 01-02	9,148	0,000	24,336	0,000	14,584	0,000	39,237
20.02.2023 02-03	8,852	0,000	24,405	0,000	14,774	0,000	39,492
20.02.2023 03-04	9,033	0,000	24,305	0,000	14,619	0,000	39,236
20.02.2023 04-05	8,823	0,000	24,391	0,000	14,691	0,000	39,366
20.02.2023 05-06	8,818	0,000	24,436	0,000	14,731	0,000	39,489
20.02.2023 06-07	9,859	0,000	24,412	0,000	14,670	0,000	39,403
20.02.2023 07-08	10,120	0,000	24,430	0,000	14,714	0,000	39,523
20.02.2023 08-09	10,539	0,000	24,348	0,000	14,709	0,000	39,382
20.02.2023 09-10	10,008	0,000	24,458	0,000	14,795	0,000	39,601
20.02.2023 10-11	9,300	0,000	24,506	0,000	14,859	0,000	39,695
20.02.2023 11-12	9,439	0,000	24,535	0,000	14,849	0,000	39,730
20.02.2023 12-13	9,872	0,000	24,429	0,000	14,775	0,000	39,533
20.02.2023 13-14	9,604	0,000	24,491	0,000	14,807	0,000	39,652
20.02.2023 14-15	9,946	0,000	24,544	0,000	14,839	0,000	39,723
20.02.2023 15-16	10,486	0,000	24,409	0,000	14,797	0,000	39,522
20.02.2023 16-17	10,387	0,000	24,405	0,000	14,754	0,000	39,506
20.02.2023 17-18	10,675	0,000	24,142	0,000	14,660	0,000	39,087
20.02.2023 18-19	10,185	0,000	23,991	0,000	14,626	0,000	38,863
20.02.2023 19-20	10,597	0,000	23,913	0,000	14,579	0,000	38,765
20.02.2023 20-21	10,554	0,000	23,854	0,000	14,581	0,000	38,749
20.02.2023 21-22	10,224	0,000	23,821	0,000	14,518	0,000	38,621
20.02.2023 22-23	10,013	0,000	23,575	0,000	14,359	0,000	38,258
20.02.2023 23-00	9,342	0,000	23,561	0,000	14,412	0,000	38,242

UPM

Oletusraportti

vrk tunneista
01.02.2023 00 - 01.03.2023 00

	KAUK_E11(A1 E11), IN MWh	KAUK_E11(A1 E11), OUT MWh	KAUK_K01(AB10 18), IN MWh	KAUK_K01(AB10 18), OUT MWh	KAUK_K02(AB10 39), IN MWh	KAUK_K02(AB10 39), OUT MWh	A1 E06, PÄTÖTEHO (laskettu) MWh
21.02.2023 00-01	9,045	0,000	23,325	0,000	14,251	0,000	37,828
21.02.2023 01-02	9,164	0,000	23,286	0,000	14,180	0,000	37,744
21.02.2023 02-03	9,094	0,000	23,294	0,000	14,216	0,000	37,754
21.02.2023 03-04	9,870	0,000	23,217	0,000	14,215	0,000	37,681
21.02.2023 04-05	8,987	0,000	23,238	0,000	14,210	0,000	37,747
21.02.2023 05-06	9,950	0,000	23,140	0,000	14,120	0,000	37,549
21.02.2023 06-07	10,044	0,000	23,006	0,000	14,028	0,000	37,306
21.02.2023 07-08	9,999	0,000	22,936	0,000	14,080	0,000	37,255
21.02.2023 08-09	10,419	0,000	22,780	0,000	13,997	0,000	37,108
21.02.2023 09-10	10,090	0,000	22,677	0,000	13,958	0,000	36,813
21.02.2023 10-11	10,756	0,000	22,718	0,000	14,042	0,000	37,017
21.02.2023 11-12	11,018	0,000	22,688	0,000	13,978	0,000	36,884
21.02.2023 12-13	10,579	0,000	22,575	0,000	13,870	0,000	37,181
21.02.2023 13-14	10,570	0,000	22,653	0,000	13,946	0,000	36,867
21.02.2023 14-15	10,899	0,000	23,014	0,000	14,085	0,000	37,336
21.02.2023 15-16	11,767	0,000	23,152	0,000	14,147	0,000	37,550
21.02.2023 16-17	11,488	0,000	22,911	0,000	13,801	0,000	36,912
21.02.2023 17-18	11,454	0,000	23,107	0,000	14,020	0,000	37,384
21.02.2023 18-19	10,442	0,000	23,242	0,000	14,141	0,000	37,646
21.02.2023 19-20	10,386	0,000	23,099	0,000	14,069	0,000	37,443
21.02.2023 20-21	10,946	0,000	23,226	0,000	14,261	0,000	37,773
21.02.2023 21-22	11,266	0,000	23,246	0,000	14,117	0,000	37,580
21.02.2023 22-23	10,642	0,000	23,155	0,000	14,063	0,000	37,533
21.02.2023 23-00	10,408	0,000	23,353	0,000	14,310	0,000	37,925
22.02.2023 00-01	10,795	0,000	23,330	0,000	14,231	0,000	37,844
22.02.2023 01-02	10,604	0,000	23,255	0,000	14,107	0,000	37,621
22.02.2023 02-03	10,534	0,000	23,167	0,000	14,004	0,000	37,412
22.02.2023 03-04	10,362	0,000	23,521	0,000	14,425	0,000	38,226
22.02.2023 04-05	10,076	0,000	23,257	0,000	14,110	0,000	37,653
22.02.2023 05-06	10,430	0,000	23,292	0,000	14,146	0,000	37,683
22.02.2023 06-07	10,447	0,000	23,132	0,000	14,098	0,000	37,552
22.02.2023 07-08	11,641	0,000	23,320	0,000	14,225	0,000	37,855
22.02.2023 08-09	11,761	0,000	23,226	0,000	14,076	0,000	37,533
22.02.2023 09-10	11,003	0,000	23,210	0,000	14,021	0,000	37,450
22.02.2023 10-11	10,186	0,000	23,307	0,000	14,158	0,000	37,684
22.02.2023 11-12	10,870	0,000	23,252	0,000	14,037	0,000	37,560
22.02.2023 12-13	10,101	0,000	23,420	0,000	14,308	0,000	37,959
22.02.2023 13-14	10,767	0,000	23,255	0,000	14,084	0,000	37,593
22.02.2023 14-15	10,312	0,000	23,212	0,000	14,141	0,000	37,605
22.02.2023 15-16	10,721	0,000	23,170	0,000	14,111	0,000	37,526

UPM

Oletusraportti

vrk tunneista
01.02.2023 00 - 01.03.2023 00

	KAUK_E11(A1 E11), IN MWh	KAUK_E11(A1 E11), OUT MWh	KAUK_K01(AB10 18), IN MWh	KAUK_K01(AB10 18), OUT MWh	KAUK_K02(AB10 39), IN MWh	KAUK_K02(AB10 39), OUT MWh	A1 E06, PÄTÖTEHO (laskettu) MWh
22.02.2023 16-17	10,606	0,000	22,951	0,000	13,973	0,000	37,161
22.02.2023 17-18	10,523	0,000	22,955	0,000	14,037	0,000	37,224
22.02.2023 18-19	11,020	0,000	22,628	0,000	13,664	0,000	36,505
22.02.2023 19-20	10,476	0,000	22,565	0,000	13,628	0,000	36,448
22.02.2023 20-21	9,895	0,000	22,194	0,000	13,409	0,000	35,796
22.02.2023 21-22	10,046	0,000	22,006	0,000	13,333	0,000	35,561
22.02.2023 22-23	9,696	0,000	21,856	0,000	13,339	0,000	35,428
22.02.2023 23-00	10,824	0,000	21,714	0,000	13,118	0,000	35,114
23.02.2023 00-01	10,686	0,000	21,308	0,000	12,951	0,000	34,472
23.02.2023 01-02	10,836	0,000	21,368	0,000	13,053	0,000	34,640
23.02.2023 02-03	11,146	0,000	20,953	0,000	12,878	0,000	34,060
23.02.2023 03-04	11,006	0,000	20,833	0,000	12,758	0,000	33,770
23.02.2023 04-05	10,622	0,000	20,847	0,000	12,798	0,000	33,920
23.02.2023 05-06	10,519	0,000	20,207	0,000	12,594	0,000	32,996
23.02.2023 06-07	10,793	0,000	19,995	0,000	12,335	0,000	32,512
23.02.2023 07-08	10,229	0,000	19,897	0,000	12,298	0,000	32,490
23.02.2023 08-09	10,112	0,000	19,533	0,000	11,946	0,000	31,654
23.02.2023 09-10	10,375	0,000	19,580	0,000	12,120	0,000	31,836
23.02.2023 10-11	10,479	0,000	19,671	0,000	12,281	0,000	32,142
23.02.2023 11-12	10,580	0,000	19,638	0,000	12,173	0,000	32,069
23.02.2023 12-13	9,897	0,000	19,391	0,000	12,039	0,000	31,597
23.02.2023 13-14	10,161	0,000	19,116	0,000	11,841	0,000	31,052
23.02.2023 14-15	10,154	0,000	19,279	0,000	12,002	0,000	31,434
23.02.2023 15-16	10,716	0,000	18,955	0,000	11,816	0,000	30,968
23.02.2023 16-17	11,010	0,000	18,967	0,000	11,801	0,000	30,965
23.02.2023 17-18	10,969	0,000	18,832	0,000	11,767	0,000	30,752
23.02.2023 18-19	10,809	0,000	18,883	0,000	11,801	0,000	30,607
23.02.2023 19-20	11,205	0,000	18,901	0,000	11,800	0,000	30,855
23.02.2023 20-21	11,290	0,000	18,970	0,000	11,931	0,000	31,008
23.02.2023 21-22	11,010	0,000	18,975	0,000	11,927	0,000	30,886
23.02.2023 22-23	10,672	0,000	18,916	0,000	11,853	0,000	30,706
23.02.2023 23-00	10,185	0,000	18,927	0,000	11,806	0,000	30,895
24.02.2023 00-01	10,033	0,000	18,695	0,000	11,651	0,000	30,466
24.02.2023 01-02	9,509	0,000	18,356	0,000	11,466	0,000	30,015
24.02.2023 02-03	9,270	0,000	18,098	0,000	11,495	0,000	29,714
24.02.2023 03-04	8,783	0,000	17,994	0,000	11,458	0,000	29,606
24.02.2023 04-05	8,546	0,000	17,669	0,000	11,167	0,000	29,238
24.02.2023 05-06	9,025	0,000	17,563	0,000	10,842	0,000	28,688
24.02.2023 06-07	10,225	0,000	17,713	0,000	11,016	0,000	28,880
24.02.2023 07-08	10,229	0,000	17,343	0,000	10,710	0,000	28,245

UPM

Oletusraportti

vrk tunneista
01.02.2023 00 - 01.03.2023 00

	KAUK_E11(A1 E11), IN MWh	KAUK_E11(A1 E11), OUT MWh	KAUK_K01(AB10 18), IN MWh	KAUK_K01(AB10 18), OUT MWh	KAUK_K02(AB10 39), IN MWh	KAUK_K02(AB10 39), OUT MWh	A1 E06, PÄTÖTEHO (laskettu) MWh
24.02.2023 08-09	9,911	0,000	17,389	0,000	10,747	0,000	28,268
24.02.2023 09-10	9,621	0,000	17,338	0,000	10,683	0,000	28,116
24.02.2023 10-11	9,243	0,000	17,289	0,000	10,719	0,000	28,113
24.02.2023 11-12	8,956	0,000	17,308	0,000	10,697	0,000	28,246
24.02.2023 12-13	8,223	0,000	17,341	0,000	10,707	0,000	28,287
24.02.2023 13-14	8,664	0,000	17,434	0,000	10,807	0,000	28,423
24.02.2023 14-15	9,275	0,000	17,415	0,000	10,837	0,000	28,296
24.02.2023 15-16	9,595	0,000	17,495	0,000	11,127	0,000	28,913
24.02.2023 16-17	10,301	0,000	17,683	0,000	11,426	0,000	29,308
24.02.2023 17-18	10,356	0,000	17,605	0,000	11,297	0,000	29,061
24.02.2023 18-19	9,698	0,000	17,619	0,000	11,298	0,000	28,940
24.02.2023 19-20	9,411	0,000	17,720	0,000	11,386	0,000	29,454
24.02.2023 20-21	8,973	0,000	17,682	0,000	11,397	0,000	29,121
24.02.2023 21-22	9,037	0,000	17,674	0,000	11,399	0,000	29,344
24.02.2023 22-23	9,269	0,000	17,691	0,000	11,440	0,000	29,528
24.02.2023 23-00	9,537	0,000	17,662	0,000	11,372	0,000	29,027
25.02.2023 00-01	9,593	0,000	17,793	0,000	11,521	0,000	29,467
25.02.2023 01-02	9,479	0,000	17,832	0,000	11,562	0,000	29,769
25.02.2023 02-03	8,997	0,000	17,805	0,000	11,554	0,000	29,422
25.02.2023 03-04	9,092	0,000	17,845	0,000	11,569	0,000	29,583
25.02.2023 04-05	9,321	0,000	17,724	0,000	11,422	0,000	29,378
25.02.2023 05-06	8,880	0,000	17,830	0,000	11,566	0,000	29,545
25.02.2023 06-07	9,986	0,000	17,912	0,000	11,689	0,000	29,712
25.02.2023 07-08	10,250	0,000	17,859	0,000	11,562	0,000	29,606
25.02.2023 08-09	9,834	0,000	17,954	0,000	11,591	0,000	29,631
25.02.2023 09-10	9,508	0,000	17,853	0,000	11,465	0,000	29,435
25.02.2023 10-11	9,649	0,000	17,958	0,000	11,566	0,000	29,759
25.02.2023 11-12	9,625	0,000	17,983	0,000	11,609	0,000	29,784
25.02.2023 12-13	8,934	0,000	17,931	0,000	11,558	0,000	29,639
25.02.2023 13-14	9,363	0,000	17,931	0,000	11,522	0,000	29,594
25.02.2023 14-15	9,423	0,000	17,879	0,000	11,490	0,000	29,551
25.02.2023 15-16	9,336	0,000	17,934	0,000	11,581	0,000	29,575
25.02.2023 16-17	9,938	0,000	17,912	0,000	11,567	0,000	29,216
25.02.2023 17-18	10,023	0,000	17,904	0,000	11,580	0,000	29,267
25.02.2023 18-19	10,400	0,000	17,894	0,000	11,555	0,000	29,547
25.02.2023 19-20	10,115	0,000	17,920	0,000	11,551	0,000	29,673
25.02.2023 20-21	10,107	0,000	17,998	0,000	11,623	0,000	29,633
25.02.2023 21-22	9,934	0,000	17,908	0,000	11,561	0,000	29,340
25.02.2023 22-23	9,686	0,000	17,895	0,000	11,527	0,000	29,501
25.02.2023 23-00	10,025	0,000	17,817	0,000	11,475	0,000	29,491

UPM

Oletusraportti

vrk tunneista
01.02.2023 00 - 01.03.2023 00

	KAUK_E11(A1 E11), IN MWh	KAUK_E11(A1 E11), OUT MWh	KAUK_K01(AB10 18), IN MWh	KAUK_K01(AB10 18), OUT MWh	KAUK_K02(AB10 39), IN MWh	KAUK_K02(AB10 39), OUT MWh	A1 E06, PÄTÖTEHO (laskettu) MWh
26.02.2023 00-01	9,931	0,000	17,880	0,000	11,598	0,000	29,407
26.02.2023 01-02	10,250	0,000	17,900	0,000	11,620	0,000	29,798
26.02.2023 02-03	9,825	0,000	17,880	0,000	11,589	0,000	29,709
26.02.2023 03-04	10,555	0,000	17,861	0,000	11,524	0,000	29,643
26.02.2023 04-05	10,521	0,000	17,839	0,000	11,532	0,000	29,453
26.02.2023 05-06	9,695	0,000	17,939	0,000	11,611	0,000	29,664
26.02.2023 06-07	9,946	0,000	17,912	0,000	11,565	0,000	29,681
26.02.2023 07-08	9,484	0,000	17,944	0,000	11,412	0,000	29,472
26.02.2023 08-09	9,393	0,000	17,895	0,000	11,285	0,000	29,647
26.02.2023 09-10	9,803	0,000	17,912	0,000	11,296	0,000	29,486
26.02.2023 10-11	9,837	0,000	17,917	0,000	11,307	0,000	29,381
26.02.2023 11-12	10,123	0,000	17,885	0,000	11,265	0,000	29,128
26.02.2023 12-13	9,334	0,000	17,938	0,000	11,306	0,000	29,525
26.02.2023 13-14	9,270	0,000	17,910	0,000	11,228	0,000	29,041
26.02.2023 14-15	9,523	0,000	17,867	0,000	11,239	0,000	29,325
26.02.2023 15-16	9,423	0,000	17,907	0,000	11,289	0,000	29,118
26.02.2023 16-17	8,862	0,000	17,437	0,000	10,683	0,000	28,401
26.02.2023 17-18	9,295	0,000	18,132	0,000	11,516	0,000	29,944
26.02.2023 18-19	9,584	0,000	17,875	0,000	11,167	0,000	29,294
26.02.2023 19-20	10,297	0,000	17,931	0,000	11,274	0,000	29,502
26.02.2023 20-21	10,257	0,000	17,875	0,000	11,271	0,000	29,484
26.02.2023 21-22	10,467	0,000	17,991	0,000	11,361	0,000	29,613
26.02.2023 22-23	9,877	0,000	17,897	0,000	11,268	0,000	29,452
26.02.2023 23-00	9,498	0,000	17,962	0,000	11,289	0,000	29,475
27.02.2023 00-01	9,661	0,000	17,938	0,000	11,291	0,000	29,518
27.02.2023 01-02	9,719	0,000	17,988	0,000	11,352	0,000	29,597
27.02.2023 02-03	9,229	0,000	17,929	0,000	11,291	0,000	29,466
27.02.2023 03-04	9,559	0,000	17,967	0,000	11,337	0,000	29,547
27.02.2023 04-05	9,163	0,000	17,964	0,000	11,324	0,000	29,597
27.02.2023 05-06	9,658	0,000	18,025	0,000	11,392	0,000	29,659
27.02.2023 06-07	11,769	0,000	18,140	0,000	11,485	0,000	29,864
27.02.2023 07-08	12,027	0,000	18,028	0,000	11,358	0,000	29,701
27.02.2023 08-09	10,431	0,000	17,723	0,000	11,119	0,000	29,044
27.02.2023 09-10	10,109	0,000	17,763	0,000	11,177	0,000	29,108
27.02.2023 10-11	10,096	0,000	17,738	0,000	11,213	0,000	29,219
27.02.2023 11-12	9,627	0,000	17,829	0,000	11,327	0,000	29,401
27.02.2023 12-13	8,961	0,000	17,868	0,000	11,339	0,000	29,446
27.02.2023 13-14	8,807	0,000	17,771	0,000	11,238	0,000	29,326
27.02.2023 14-15	8,792	0,000	17,848	0,000	11,342	0,000	29,495
27.02.2023 15-16	8,757	0,000	17,937	0,000	11,432	0,000	29,627

UPM

Oletusraportti

vrk tunneista
01.02.2023 00 - 01.03.2023 00

	KAUK_E11(A1 E11), IN MWh	KAUK_E11(A1 E11), OUT MWh	KAUK_K01(AB10 18), IN MWh	KAUK_K01(AB10 18), OUT MWh	KAUK_K02(AB10 39), IN MWh	KAUK_K02(AB10 39), OUT MWh	A1 E06, PÄTÖTEHO (laskettu) MWh
27.02.2023 16-17	9,203	0,000	17,752	0,000	11,236	0,000	29,246
27.02.2023 17-18	8,934	0,000	17,810	0,000	11,253	0,000	29,337
27.02.2023 18-19	9,010	0,000	17,705	0,000	11,155	0,000	29,151
27.02.2023 19-20	8,877	0,000	17,823	0,000	11,255	0,000	29,339
27.02.2023 20-21	8,762	0,000	17,773	0,000	11,220	0,000	29,297
27.02.2023 21-22	8,403	0,000	17,788	0,000	11,203	0,000	29,212
27.02.2023 22-23	8,192	0,000	17,847	0,000	11,279	0,000	29,304
27.02.2023 23-00	8,290	0,000	17,739	0,000	11,149	0,000	29,301
28.02.2023 00-01	8,087	0,000	17,928	0,000	11,362	0,000	29,417
28.02.2023 01-02	8,133	0,000	17,930	0,000	11,340	0,000	29,563
28.02.2023 02-03	8,300	0,000	17,815	0,000	11,259	0,000	29,391
28.02.2023 03-04	8,201	0,000	17,839	0,000	11,263	0,000	29,405
28.02.2023 04-05	7,994	0,000	17,868	0,000	11,254	0,000	29,409
28.02.2023 05-06	8,296	0,000	17,811	0,000	11,258	0,000	29,314
28.02.2023 06-07	8,806	0,000	17,855	0,000	11,336	0,000	29,428
28.02.2023 07-08	9,018	0,000	17,840	0,000	11,277	0,000	29,365
28.02.2023 08-09	9,647	0,000	17,730	0,000	11,199	0,000	29,152
28.02.2023 09-10	9,236	0,000	17,700	0,000	11,135	0,000	29,169
28.02.2023 10-11	8,780	0,000	17,410	0,000	10,711	0,000	28,428
28.02.2023 11-12	8,498	0,000	15,871	0,000	8,433	0,000	24,474
28.02.2023 12-13	8,419	0,000	15,837	0,000	8,375	0,000	24,401
28.02.2023 13-14	8,918	0,000	15,764	0,000	8,347	0,000	24,429
28.02.2023 14-15	8,925	0,000	17,737	0,000	11,087	0,000	29,079
28.02.2023 15-16	9,830	0,000	18,021	0,000	11,425	0,000	29,792
28.02.2023 16-17	9,758	0,000	17,974	0,000	11,349	0,000	29,642
28.02.2023 17-18	10,103	0,000	18,184	0,000	11,531	0,000	29,949
28.02.2023 18-19	10,568	0,000	17,958	0,000	11,207	0,000	29,449
28.02.2023 19-20	10,132	0,000	18,159	0,000	11,417	0,000	29,839
28.02.2023 20-21	10,072	0,000	18,120	0,000	11,407	0,000	29,789
28.02.2023 21-22	9,521	0,000	18,084	0,000	11,364	0,000	29,738
28.02.2023 22-23	9,841	0,000	17,909	0,000	11,276	0,000	29,489
28.02.2023 23-00	9,731	0,000	17,828	0,000	11,165	0,000	29,252
Keskiarvo	9,3	0,0	21,9	0,0	13,0	0,0	35,2
Summa	6233,7	0,0	14735,3	0,0	8762,2	0,0	23672,5

Käyttäjä:
Hakuaika: 11.4.2024 20:58

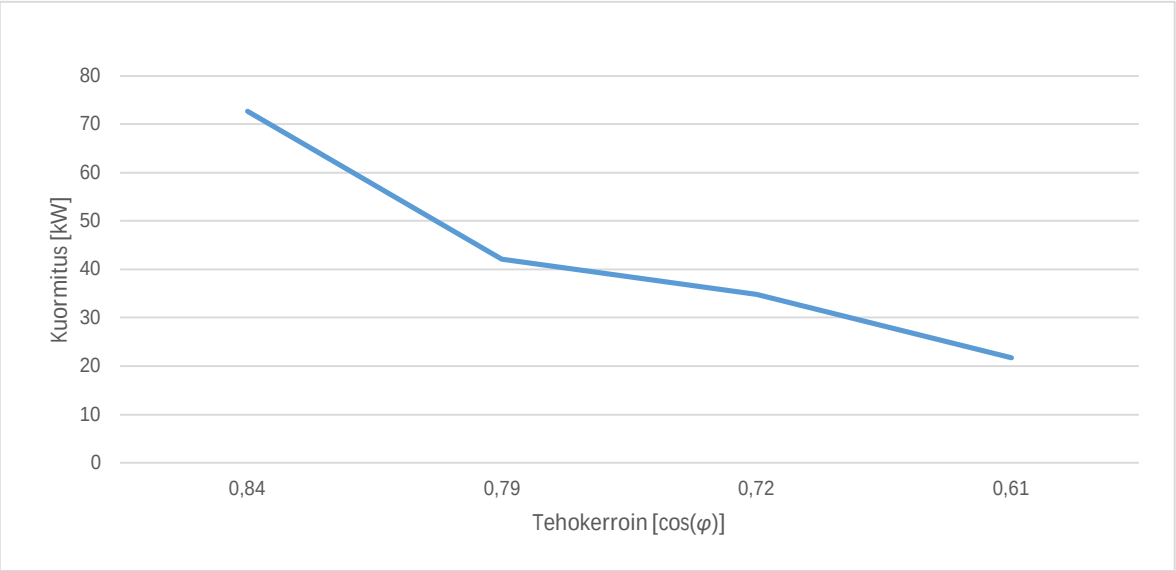
63 MVA päämuuntaja

YHTEENSÄ	DOL (kW)	VSD (kW)	Asennettu yhteensä (kW)			
P asennettu	62777	9880	72657	kW		
S=P/cosphi	76557	10185	86742	kVA		
Q=sqrt(S^2-P^2)	43819	2476	46295	kVAr		Laskennallinen
Cosphi	0,82	0,97	0,843		0,84	cosphi=P/sqrt(p^2-q^2)
						cosphi=P/S

Kuormitustaso	58 %					
YHTEENSÄ	DOL (kW)	VSD (kW)	Asennettu yhteensä (kW)	(42,9 MW)		
P	36411	5730	42141	kW		
S=P/cosphi	47909	5907	53816	kVA		
Q=sqrt(S^2-P^2)	31137	1436	32573	kVAr		Laskennallinen
Cosphi	0,76	0,97	0,791		0,79	cosphi=P/sqrt(p^2-q^2)

Kuormitustaso	48 %					
YHTEENSÄ	DOL (kW)	VSD (kW)	Asennettu yhteensä (kW)	(35,8 MW)		
P	30133	4742	34875	kW		
S=P/cosphi	44313	4889	49202	kVA		
Q=sqrt(S^2-P^2)	32491	1189	33679	kVAr		Laskennallinen
Cosphi	0,68	0,97	0,719		0,72	cosphi=P/sqrt(p^2-q^2)

Kuormitustaso	30 %					
YHTEENSÄ	DOL (kW)	VSD (kW)	Asennettu yhteensä (kW)	(22,2 MW)		
P	18833	2964	21797	kW		
S=P/cosphi	33631	3056	36686	kVA		
Q=sqrt(S^2-P^2)	27863	743	28605	kVAr		Laskennallinen
Cosphi	0,56	0,97	0,606		0,61	cosphi=P/sqrt(p^2-q^2)



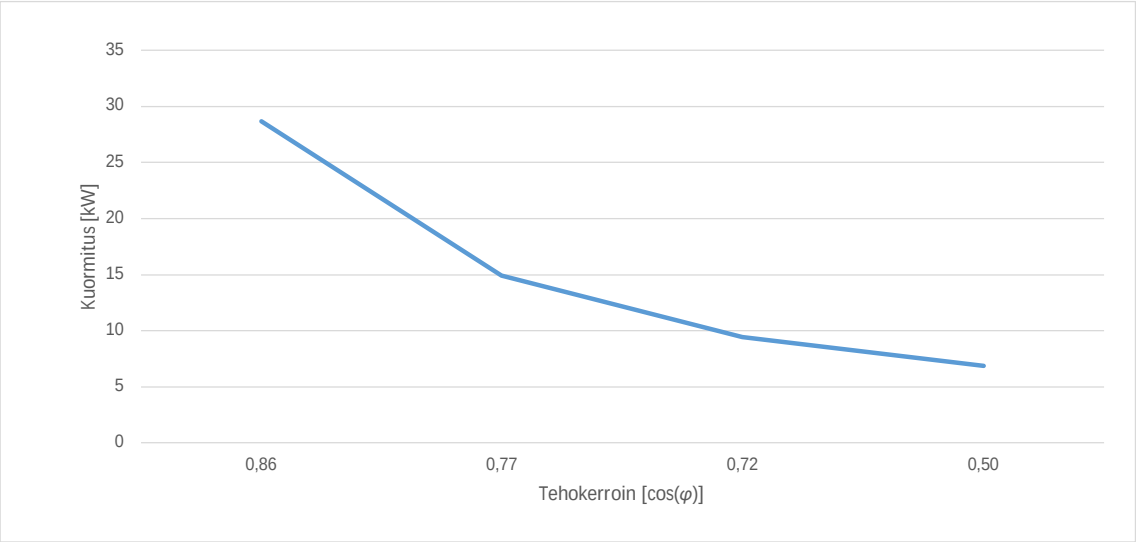
31,5 MVA päämuuntaja

YHTEENSÄ	DOL (kW)	VSD (kW)	Asennettu yhteensä (kW)			
P asennettu	21677	7000	28677	kW		
S=P/cosphi	26435	7216	33652	kVA		
Q=sqrt(S^2-P^2)	15131	1754	16885	kVar		Laskennallinen
Cosphi	0,82	0,97	0,862		0,86	cosphi=P/sqrt(p^2-q^2)

Skaalattuna	52 %					
YHTEENSÄ	DOL (kW)	VSD (kW)	Asennettu yhteensä (kW)	(15,2 MW)		
P	11272	3640	14912	kW		
S=P/cosphi	16103	3753	19855	kVA		
Q=sqrt(S^2-P^2)	11500	912	12412	kVar		Laskennallinen
Cosphi	0,7	0,97	0,769		0,77	cosphi=P/sqrt(p^2-q^2)

Skaalattuna	33 %					
YHTEENSÄ	DOL (kW)	VSD (kW)	Asennettu yhteensä (kW)	(9,6 MW)		
P	7153	2310	9463	kW		
S=P/cosphi	11177	2381	13559	kVA		
Q=sqrt(S^2-P^2)	8588	579	9167	kVar		Laskennallinen
Cosphi	0,64	0,97	0,718		0,72	cosphi=P/sqrt(p^2-q^2)

Skaalattuna	24 %					
YHTEENSÄ	DOL (kW)	VSD (kW)	Asennettu yhteensä (kW)	(7 MW)		
P	5202	1680	6882	kW		
S=P/cosphi	12689	1732	14421	kVA		
Q=sqrt(S^2-P^2)	11573	421	11994	kVar		Laskennallinen
Cosphi	0,41	0,97	0,498		0,50	cosphi=P/sqrt(p^2-q^2)



LIITE IV Verkkomallinnuksen tulokset

Mallinnus 63 MVA

Case I

	Kuormitustaso (%)		
	30	48	58
laskennallinen (MVar)	29,7	34,2	33,5
asennettu kapasiteetti (MVar)	28,8	32,1	31,8
simulointi (MVar)	31,8	36,2	35,7
yli (ali -) kompensointi (MVar)	-0,12	-0,09	-0,14
verkkohäviöt (MW)	0,14	0,27	0,36
kompensointilaitehäviöt (MW)	0,11	0,14	0,14
verkon loistehohäviöt (MVar)	1,19	3,84	5,79

Case II

	Kuormitustaso (%)		
	30	48	58
laskennallinen (MVar)	29,7	34,2	33,5
asennettu kapasiteetti (MVar)	28,4	33,8	33,8
simulointi (MVar)	30,1	36	35,7
yli (ali -) kompensointi (MVar)	0,070	-0,07	0,02
verkkohäviöt (MW)	0,12	0,25	0,34
kompensointilaitehäviöt (MW)	0,10	0,13	0,12
verkon loistehohäviöt (MVar)	1,01	3,64	5,56

Case III

	Kuormitustaso (%)		
	30	48	58
laskennallinen (MVar)	29,7	34,2	33,5
asennettu kapasiteetti (MVar)	31,3	36,7	36,1
simulointi (MVar)	30,4	36,4	35,9
yli (ali -) kompensointi (MVar)	-0,06	0,04	-0,1
verkkohäviöt (MW)	0,16	0,29	0,37
kompensointilaitehäviöt (MW)	0,08	0,10	0,10
verkon loistehohäviöt (MVar)	1,43	3,96	5,9

Case IV

	Kuormitustaso (%)		
	30	48	58
laskennallinen (MVar)	29,7	34,2	33,5
asennettu kapasiteetti (MVar)	32	38	38
simulointi (MVar)	31,3	36,8	36,6
yli (ali -) kompensointi (MVar)	0,69	-0,04	0,23
verkkohäviöt (MW)	0,17	0,33	0,42
kompensointilaitehäviöt (MW)	0,08	0,10	0,10
verkon loistehohäviöt (MVar)	1,54	4,4	6,33

Mallinnus 31,5 MVA

Case I

	Kuormitustaso (%)		
	24	33	52
laskennallinen (MVar)	11,2	8,6	11,6
asennettu kapasiteetti (MVar)	11,4	8,7	11,4
simulointi (MVar)	11,8	8,9	12
yli (ali -) kompensointi (MVar)	0,15	-0,14	-0,07
verkkohäviöt (MW)	0,04	0,06	0,11
kompensointilaitehäviöt (MW)	0,05	0,05	0,05
verkon loistehohäviöt (MVar)	0,16	0,40	1,19

Case II

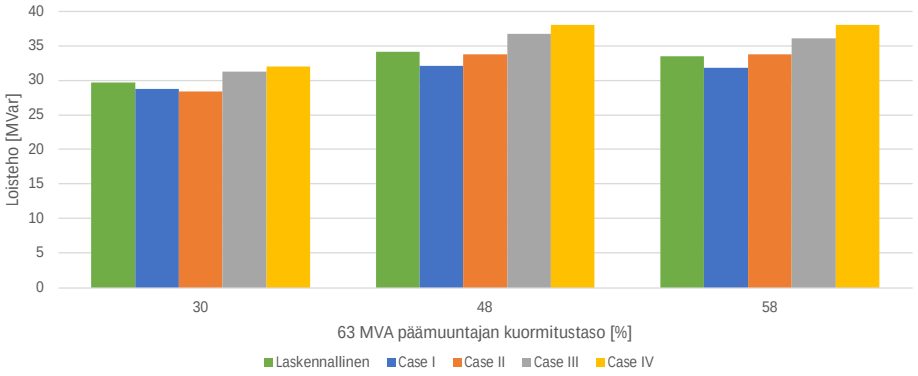
	Kuormitustaso (%)		
	24	33	52
laskennallinen (MVar)	11,2	8,6	11,6
asennettu kapasiteetti (MVar)	11,8	9,4	12,1
simulointi (MVar)	11,5	9,1	12,1
yli (ali -) kompensointi (MVar)	-0,16	0,03	-0,05
verkkohäviöt (MW)	0,04	0,06	0,11
kompensointilaitehäviöt (MW)	0,04	0,03	0,05
verkon loistehohäviöt (MVar)	0,13	0,41	1,21

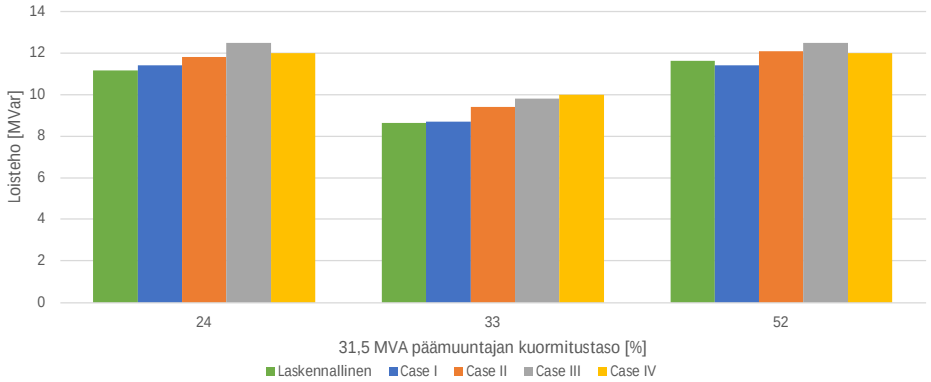
Case III

	Kuormitustaso (%)		
	24	33	52
laskennallinen (MVar)	11,2	8,6	11,6
asennettu kapasiteetti (MVar)	12,5	9,8	12,5
simulointi (MVar)	11,8	9,1	12
yli (ali -) kompensointi (MVar)	-0,01	-0,07	-0,22
verkkohäviöt (MW)	0,06	0,07	0,12
kompensointilaitehäviöt (MW)	0,04	0,03	0,04
verkon loistehohäviöt (MVar)	0,28	0,49	1,29

Case IV

	Kuormitustaso (%)		
	24	33	52
laskennallinen (MVar)	11,2	8,6	11,6
asennettu kapasiteetti (MVar)	12	10	12
simulointi (MVar)	12,1	9,2	11,2
yli (ali -) kompensointi (MVar)	0,13	-0,08	1,32
verkkohäviöt (MW)	0,08	0,08	0,15
kompensointilaitehäviöt (MW)	0,03	0,02	0,03
verkon loistehohäviöt (MVar)	0,49	0,58	1,55





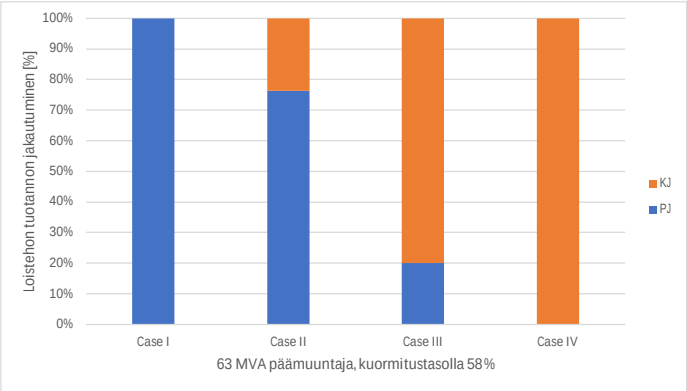
LIITE V Kompensointiyksiköiden määrät ja loistehon tuotto eri case-tapauksissa

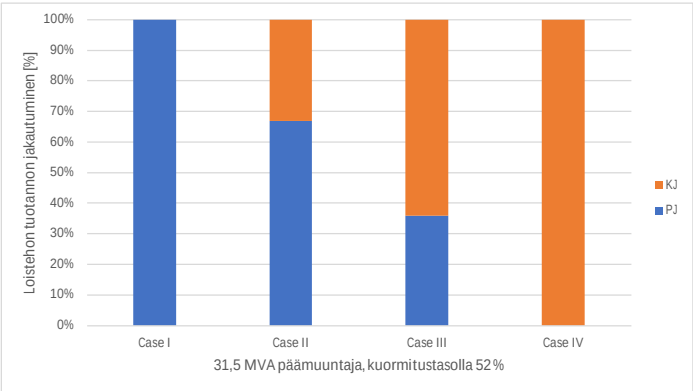
63 MVA																
KPL	Case I				Case II				Case III				Case IV			
	Yksikkö	Kuormitustaso			Yksikkö	Kuormitustaso			Yksikkö	Kuormitustaso			Yksikkö	Kuormitustaso		
	(MVar)	30 %	48 %	58 %	(MVar)	30	48	58	(MVar)	30	48	58	(MVar)	30	48	58
PJ	0,3	96	107	106	0,3	68	86	86	0,3	11	29	27	0,3	0	0	0
KJ	4	0	0	0	4	0	0	0	4	1	1	1	4	4	1	1
KJ	8	0	0	0	8	1	1	1	8	3	3	3	8	2	3	3
KJ *		0	0	0		0	0	0		0	0	0	10	0	1	1
Asennettu loisteho (MVar)					Asennettu loisteho (MVar)				Asennettu loisteho (MVar)				Asennettu loisteho (MVar)			
PJ		28,8	32,1	31,8	PJ	20,4	25,8	25,8	PJ	3,3	8,7	8,1	PJ	0	0	0
KJ 4					KJ 4	0	0	0	KJ 4	4	4	4	KJ 4	16	4	4
KJ 8					KJ 8	8	8	8	KJ 8	24	24	24	KJ 8	16	24	24
KJ *					KJ *	0	0	0	KJ *	0	0	0	KJ *	0	10	10
Q YHT.		28,8	32,1	31,8	Q YHT.	28,4	33,8	33,8	Q YHT.	31,3	36,7	36,1	Q YHT.	32	38	38

Osuudet kapasiteetistä														
	Case I			Case II			Case III			Case IV		
	Kuormitustaso			Kuormitustaso			Kuormitustaso			Kuormitustaso		
100	30 %	48 %	58 %	30 %	48 %	58 %	30 %	48 %	58 %	30 %	48 %	58 %
PJ	100	100	100	72	76	76	11	24	22	0	0	0
KJ	0	0	0	28	24	24	89	89	89	100	100	100

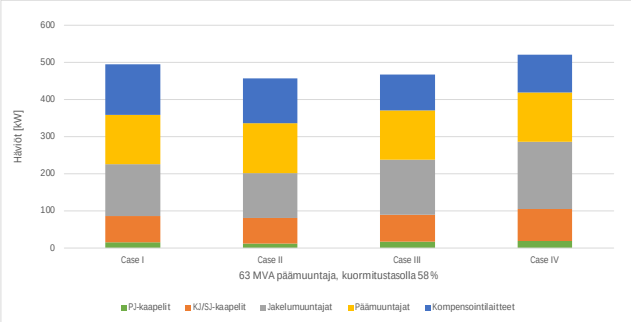
31,5 MVA																
KPL	Case I				Case II				Case III				Case IV			
	Yksikkö	Kuormitustaso			Yksikkö	Kuormitustaso			Yksikkö	Kuormitustaso			Yksikkö	Kuormitustaso		
	(MVar)	24	33	52	(MVar)	24	33	52	(MVar)	24	33	52	(MVar)	24	33	52
PJ	0,3	38	29	38	0,3	26	18	27	0,3	15	6	15	0,3	0	0	0
KJ	4	0	0	0	4	1	1	1	4	0	0	0	4	1	1	1
KJ	8	0	0	0	8	0	0	0	8	1	1	1	8	1	0	1
KJ *													6	0	1	0
Asennettu loisteho (MVar)					Asennettu loisteho (MVar)				Asennettu loisteho (MVar)				Asennettu loisteho (MVar)			
PJ		11,4	8,7	11,4	PJ	7,8	5,4	8,1	PJ	4,5	1,8	4,5	PJ	0	0	0
KJ 4		0	0	0	KJ 4	4	4	4	KJ 4	0	0	0	KJ 4	4	4	4
KJ 8		0	0	0	KJ 8	0	0	0	KJ 8	8	8	8	KJ 8	8	0	8
KJ *		0	0	0	KJ *	0	0	0	KJ *	0	0	0	KJ *	0	6	0
Q YHT.		11,4	8,7	11,4	Q YHT.	11,8	9,4	12,1	Q YHT.	12,5	9,8	12,5	Q YHT.	12	10	12

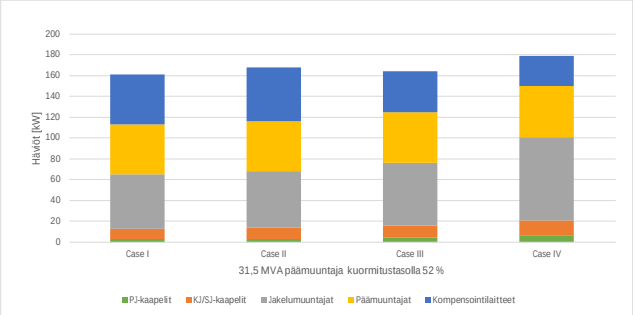
Osuudet kapasiteetistä														
	Case I			Case II			Case III			Case IV		
	Kuormitustaso			Kuormitustaso			Kuormitustaso			Kuormitustaso		
	30 %	48 %	58 %	30 %	48 %	58 %	30 %	48 %	58 %	30 %	48 %	58 %
PJ	100 %	100 %	100 %	66 %	57 %	67 %	36 %	18 %	36 %	0 %	0 %	0 %
KJ	0 %	0 %	0 %	34 %	43 %	33 %	64 %	82 %	64 %	100 %	100 %	100 %

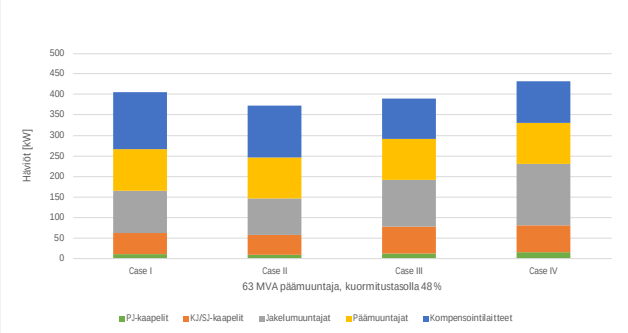


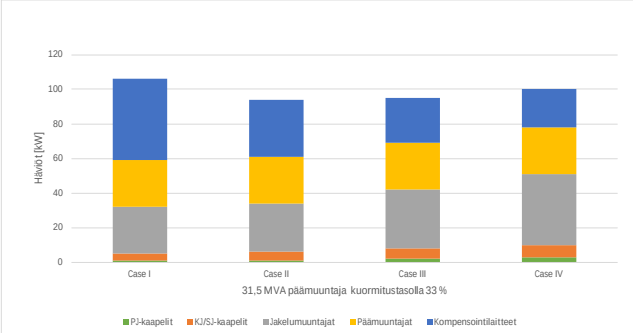


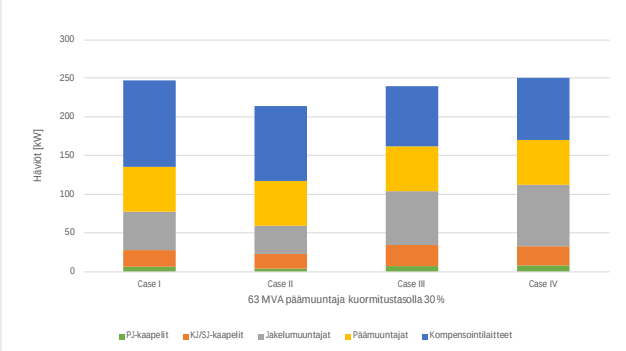
LIITE VI Häviöiden jakautuminen case-tapauksissa

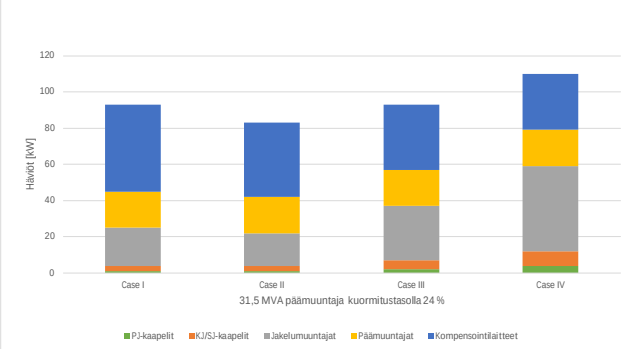




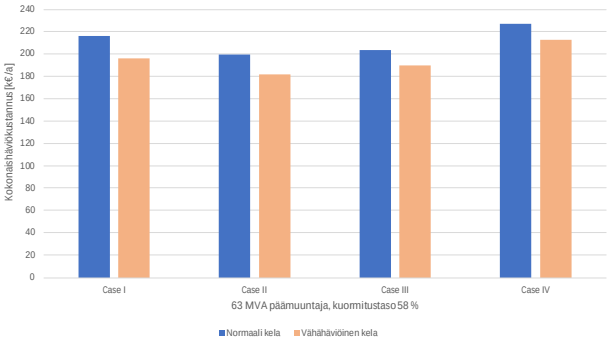


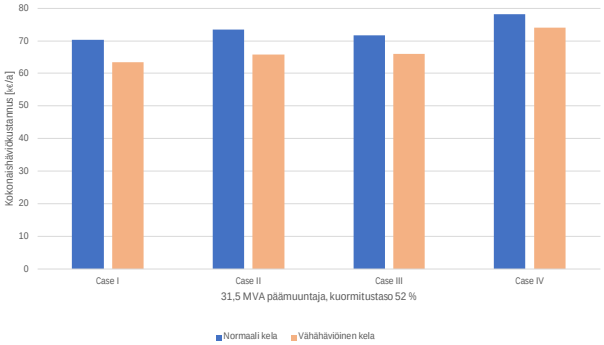


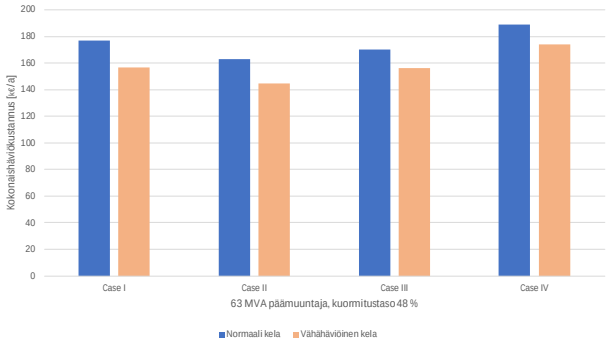


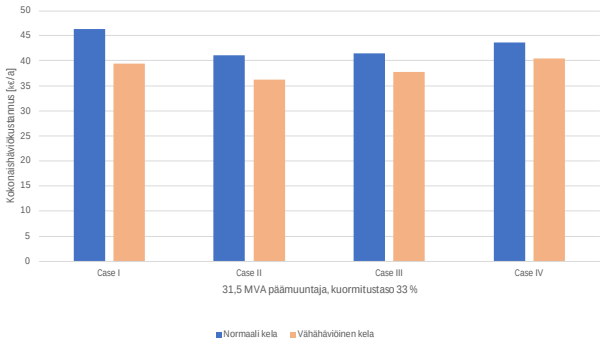


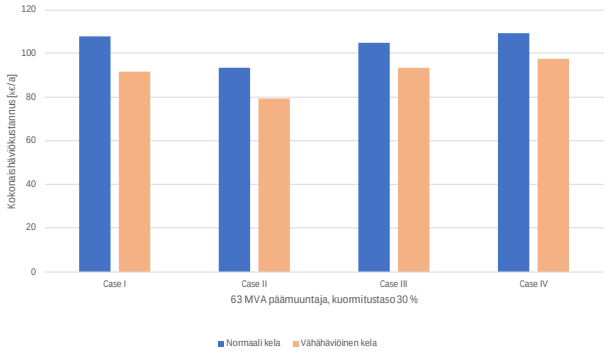
LIITE VII Vuotuiset häviökustannukset sekä vähähäviöisen kelan käytön vaikutus

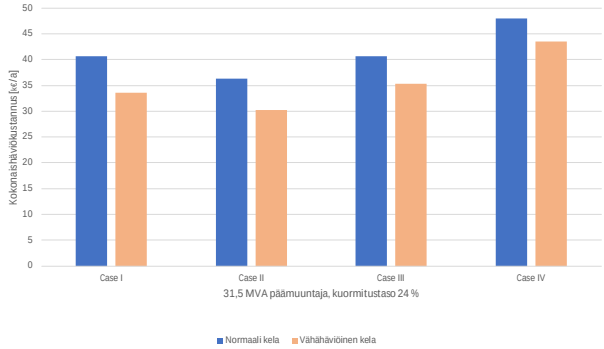






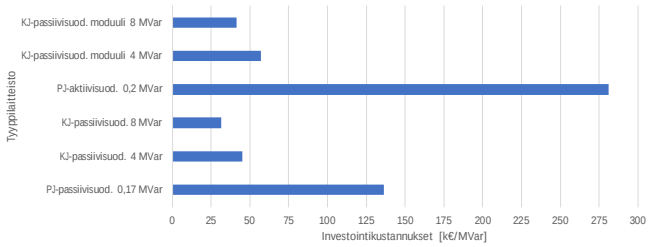


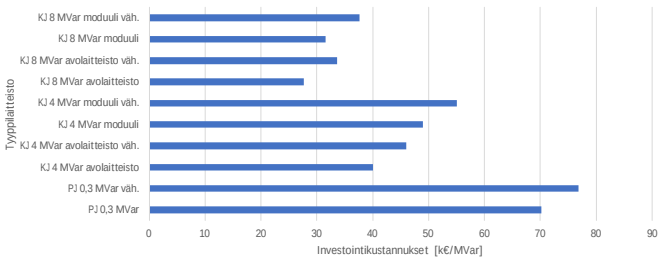




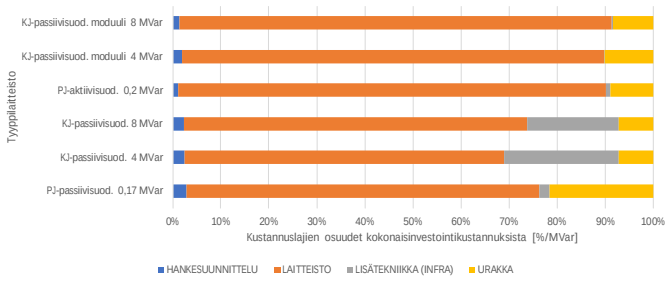
LIITE VIII Tyyppilaitteistojen elinkaarikustannukset

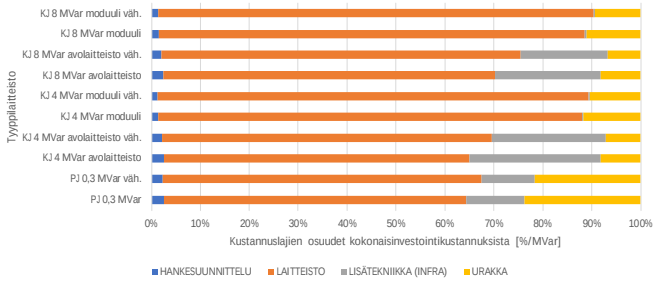
Investointikustannukset



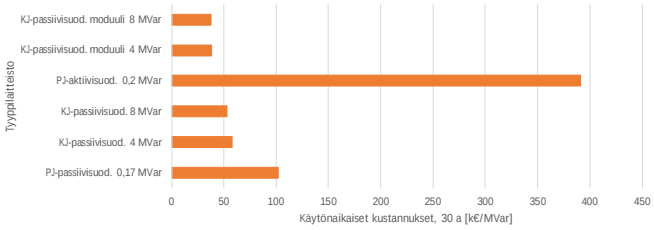


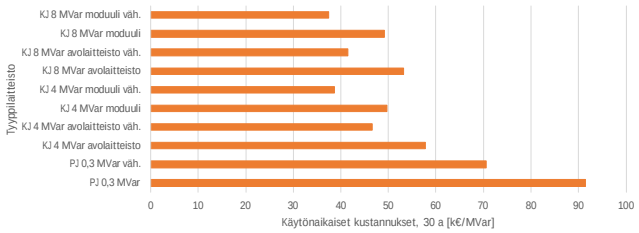
Investointikustannusten muodostuminen



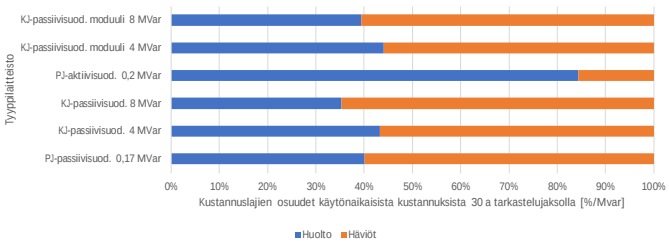


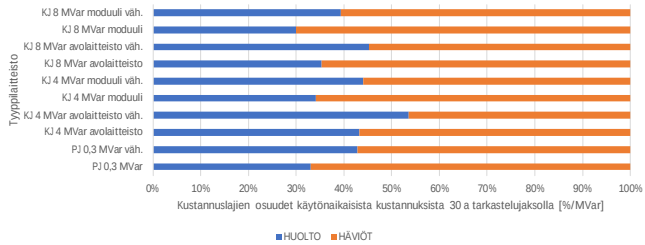
Käytönaikaiset kustannukset 30 vuoden elinkaaren ajalta



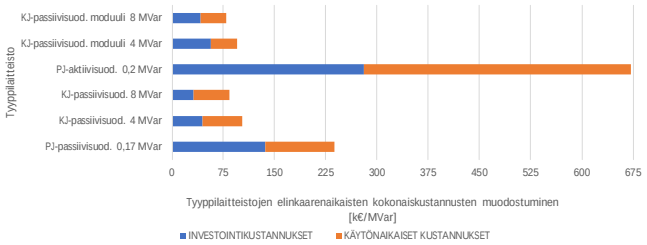


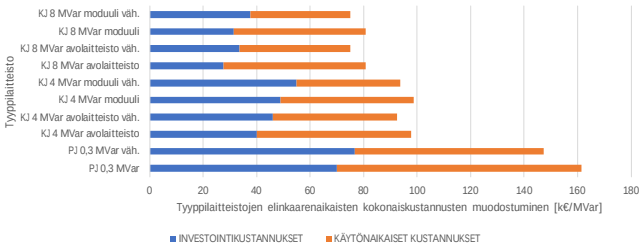
Käytönaikaisten kustannusten muodostuminen





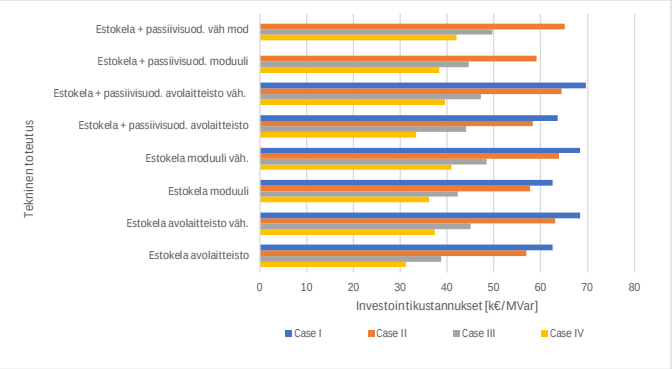
Laitteistojen kokonaiskustannusten jakautuminen elinkaaren aikana





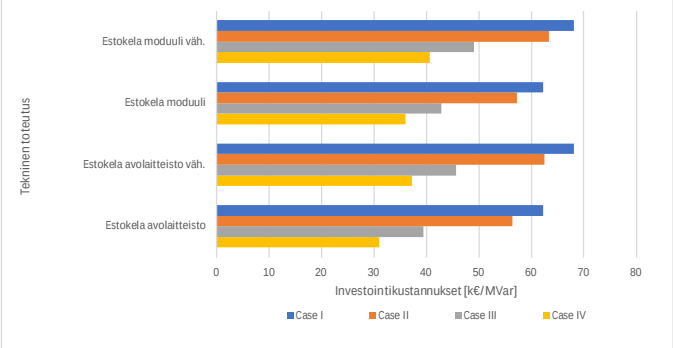
63 MVA päämuuntaja	Investointi	€ / MVar		
Kuormitustaso 58 %	Case I	Case II	Case III	Case IV
Estokela avolaitteisto	62 484 €	56 897 €	38 791 €	31 211 €
Estokela avolaitteisto väh.	68 422 €	63 059 €	44 975 €	37 441 €
Estokela moduuli	62 484 €	57 755 €	42 344 €	36 206 €
Estokela moduuli väh.	68 422 €	63 918 €	48 528 €	40 926 €
Estokela + passiivisuod. avolaitteisto	63 660 €	58 326 €	44 140 €	33 397 €
Estokela + passiivisuod. avolaitteisto väh.	69 598 €	64 488 €	47 203 €	39 627 €
Estokela + passiivisuod. moduuli	- €	59 184 €	44 572 €	38 391 €
Estokela + passiivisuod. väh mod	- €	65 094 €	49 698 €	42 074 €

63 MVA päämuuntaja kuormitustaso 58 %



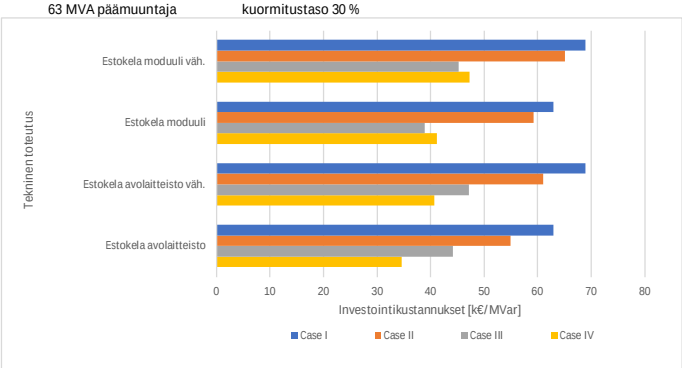
63 MVA päämuuntaja	Investointi	€ / MVar		
Kuormitustaso 48 %	Case I	Case II	Case III	Case IV
Estokela avolaitteisto	62 202 €	56 423 €	39 414 €	31 042 €
Estokela avolaitteisto väh.	68 113 €	62 534 €	45 623 €	37 237 €
Estokela moduuli	62 202 €	57 274 €	42 919 €	36 009 €
Estokela moduuli väh.	68 113 €	63 385 €	49 127 €	40 704 €
Passiivisuod. avolaitteisto	- €	- €	- €	- €
Passiivisuod. avolaitteisto väh.	- €	- €	- €	- €
Passiivisuod. moduuli	- €	- €	- €	- €
Passiivisuod. väh mod	- €	- €	- €	- €

63 MVA päämuuntaja kuormitustaso 48 %



63 MVA päämuuntaja	Investointi	€ / MVar		
Kuormitustaso 30 %	Case I	Case II	Case III	Case IV
Estokela avolaitteisto	62 935 €	54 898 €	44 140 €	34 607 €
Estokela avolaitteisto väh.	68 917 €	61 011 €	47 203 €	40 741 €
Estokela moduuli	62 935 €	59 184 €	38 929 €	41 119 €
Estokela moduuli väh.	68 917 €	65 094 €	45 179 €	47 254 €
Passiivisuod. avolaitteisto	- €	- €	- €	- €
Passiivisuod. avolaitteisto väh.	- €	- €	- €	- €
Passiivisuod. moduuli	- €	- €	- €	- €
Passiivisuod. väh mod	- €	- €	- €	- €

63 MVA päämuuntaja kuormitustaso 30 %

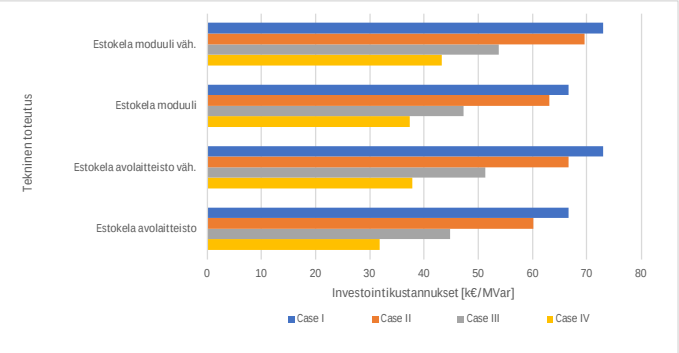


* EI TARKASTELUN LAAJUUDESSA

31,5 MVA päämuuntaja Investointi € / MVar

Kuormitustaso 52 %	Case I	Case II	Case III	Case IV
Estokela avolaitteisto	66 639 €	60 187 €	44 758 €	31 793 €
Estokela avolaitteisto väh.	72 973 €	66 634 €	51 258 €	37 793 €
Estokela moduuli	66 639 €	63 133 €	47 312 €	37 317 €
Estokela moduuli väh.	72 973 €	69 579 €	53 812 €	43 317 €
Passiivisuod. avolaitteisto	- €	- €	- €	- €
Passiivisuod. avolaitteisto väh.	- €	- €	- €	- €
Passiivisuod. moduuli	- €	- €	- €	- €
Passiivisuod. väh mod	- €	- €	- €	- €

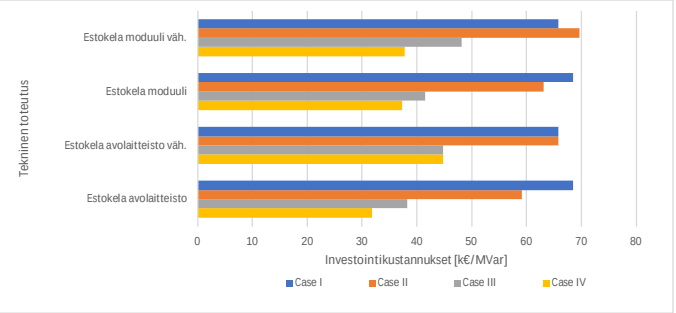
31,5 MVA päämuuntaja kuormitustaso 52 %



31,5 MVA päämuuntaja Investointi € / MVar

Kuormitustaso 33 %	Case I	Case II	Case III	Case IV
Estokela avolaitteisto	68 570 €	59 217 €	38 209 €	31 793 €
Estokela avolaitteisto väh.	65 810 €	65 810 €	44 803 €	44 803 €
Estokela moduuli	68 570 €	63 133 €	41 576 €	37 317 €
Estokela moduuli väh.	65 810 €	69 727 €	48 170 €	37 793 €
Passiivisuod. avolaitteisto	- €	- €	- €	- €
Passiivisuod. avolaitteisto väh.	- €	- €	- €	- €
Passiivisuod. moduuli	- €	- €	- €	- €
Passiivisuod. väh mod	- €	- €	- €	- €

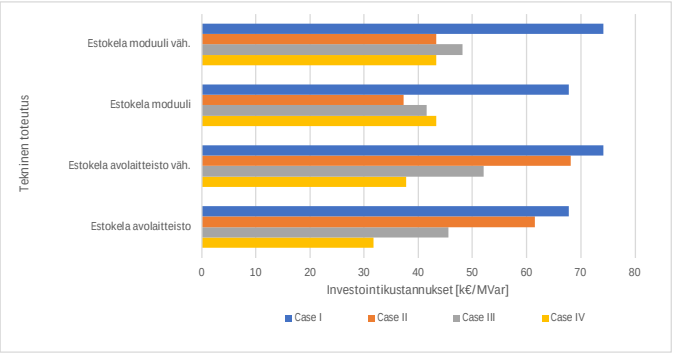
31,5 MVA päämuuntaja kuormitustaso 33 %



31,5 MVA päämuuntaja Investointi € / MVar

Kuormitustaso 24 %	Case I	Case II	Case III	Case IV
Estokela avolaitteisto	67 769 €	61 498 €	45 517 €	31 793 €
Estokela avolaitteisto väh.	74 209 €	68 106 €	52 127 €	37 793 €
Estokela moduuli	67 769 €	37 317 €	41 576 €	43 317 €
Estokela moduuli väh.	74 209 €	43 317 €	48 170 €	43 317 €
Passiivisuod. avolaitteisto	- €	- €	- €	- €
Passiivisuod. avolaitteisto väh.	- €	- €	- €	- €
Passiivisuod. moduuli	- €	- €	- €	- €
Passiivisuod. väh mod	- €	- €	- €	- €

31,5 MVA päämuuntaja kuormitustaso 24 %



* EI TARKASTELUN LAAJUUDESSA

LIITE X

Vuotuisen nettotuoton määritys

VUOTUINEN NETTOTUOTTO (€/MVar)		63 MVA 58 % kuormitustaso
Case I	Verkko	Generaattori
Normaali	37 222 €	19 077 €
Vähähäviöinen	37 781 €	19 636 €
isoin vs heikoin ero	1,4 %	
Case II	Verkko	Generaattori
Normaali	37 716 €	19 571 €
Vähähäviöinen	38 214 €	20 069 €
vähä isoin vs heikoin	1,4 %	
Case III	Verkko	Generaattori
Normaali	37 769 €	19 624 €
Vähähäviöinen	38 154 €	20 009 €
Case IV	Verkko	Generaattori
Normaali	37 281 €	19 136 €
Vähähäviöinen	37 682 €	19 537 €

VUOTUINEN NETTOTUOTTO (€/MVar)		63 MVA 48 % kuormitustaso
Case I	Verkko	Generaattori
Normaali	36 971 €	19 229 €
Vähähäviöinen	37 530 €	19 788 €
Case II	Verkko	Generaattori
Normaali	37 279 €	19 623 €
Vähähäviöinen	37 789 €	20 132 €
Case III	Verkko	Generaattori
Normaali	37 420 €	19 585 €
Vähähäviöinen	37 634 €	19 977 €
Case IV	Verkko	Generaattori
Normaali	37 179 €	19 196 €
Vähähäviöinen	37 252 €	19 595 €

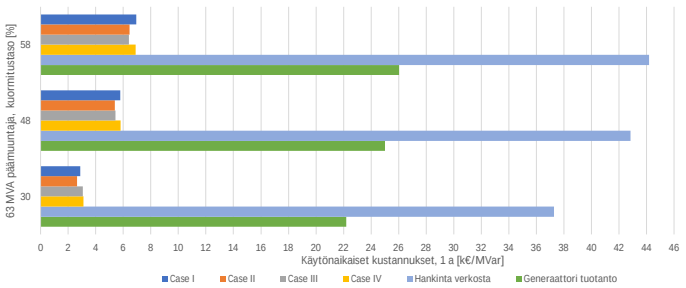
VUOTUINEN NETTOTUOTTO (€/MVar)		63 MVA 30 % kuormitustaso
Case I	Verkko	Generaattori
Normaali	34 740 €	19 124 €
Vähähäviöinen	35 253 €	19 637 €
Case II	Verkko	Generaattori
Normaali	34 103 €	19 475 €
Vähähäviöinen	34 572 €	19 945 €
Case III	Verkko	Generaattori
Normaali	34 080 €	19 270 €
Vähähäviöinen	34 453 €	19 643 €
Case IV	Verkko	Generaattori
Normaali	34 526 €	19 197 €
Vähähäviöinen	34 898 €	19 569 €

VUOTUINEN NETTOTUOTTO (€/MVar)		31,5 MVA 52 % kuormitustaso
Case I	Verkko	Generaattori
Normaali	32 896 €	19 809 €
Vähähäviöinen	- €	20 391 €
Case II	Verkko	Generaattori
Normaali	- €	19 634 €
Vähähäviöinen	- €	20 260 €
Case III	Verkko	Generaattori
Normaali	- €	19 860 €
Vähähäviöinen	- €	20 333 €
Case IV	Verkko	Generaattori
Normaali	- €	18 896 €
Vähähäviöinen	- €	19 273 €

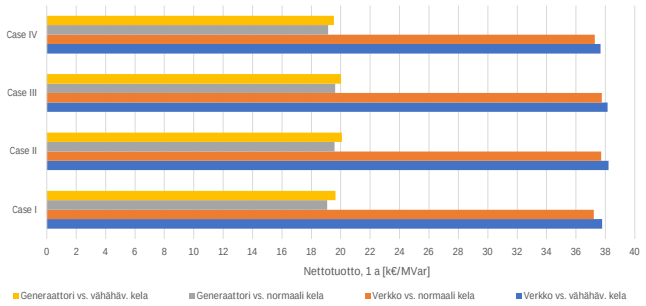
VUOTUINEN NETTOTUOTTO (€/MVar)		31,5 MVA 33 % kuormitustaso
Case I	Verkko	Generaattori
Normaali	- €	18 245 €
Vähähäviöinen	- €	19 013 €
Case II	Verkko	Generaattori
Normaali	- €	18 964 €
Vähähäviöinen	- €	19 482 €
Case III	Verkko	Generaattori
Normaali	- €	19 047 €
Vähähäviöinen	- €	19 463 €
Case IV	Verkko	Generaattori
Normaali	- €	18 907 €
Vähähäviöinen	- €	19 255 €

VUOTUINEN NETTOTUOTTO (€/MVar)		31,5 MVA 24 % kuormitustaso
Case I	Verkko	Generaattori
Normaali	- €	19 334 €
Vähähäviöinen	- €	19 842 €
Case II	Verkko	Generaattori
Normaali	- €	19 645 €
Vähähäviöinen	- €	20 173 €
Case III	Verkko	Generaattori
Normaali	- €	19 495 €
Vähähäviöinen	- €	19 939 €
Case IV	Verkko	Generaattori
Normaali	- €	19 014 €
Vähähäviöinen	- €	19 387 €

Case-tapausten sekä vaihtoehtoisten loistehon tuotantovaihtoehtojen vuotuiset kustannukset



Case-tapausten nettotuotto 63 MVA 58 % kuormitustasolla

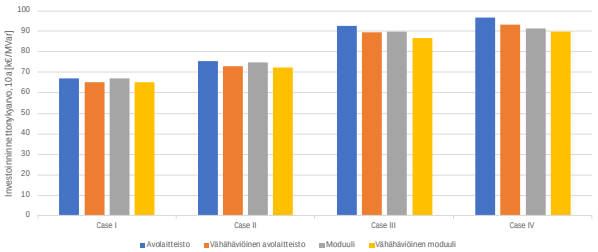


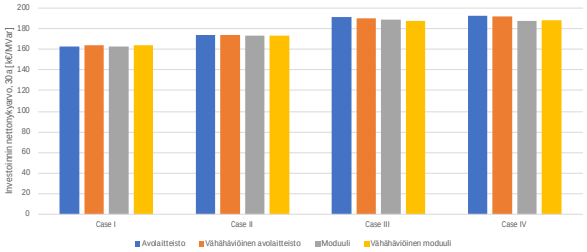
*EI TARKASTELUN LAAJUUDESSA

63 MVA	Nettonykyarvo, 10 vuotta / MVar															
%	30 %				48 %				58 %				58 % + yliaaltosuodatus			
	Avolaitteisto	Vähähäviöinen avolaitteisto	Moduuli	Vähähäviöinen moduuli	Avolaitteisto	Vähähäviöinen avolaitteisto	Moduuli	Vähähäviöinen moduuli	Avolaitteisto	Vähähäviöinen avolaitteisto	Moduuli	Vähähäviöinen moduuli	Avolaitteisto	Vähähäviöinen avolaitteisto	Moduuli	Vähähäviöine n moduuli
Case I	67 136 €	64 953 €	67 136 €	64 953 €	70 070 €	67 789 €	70 070 €	67 789 €	66 827 €	64 947 €	66 827 €	64 947 €	62 754 €	60 874 €	62 754 €	60 874 €
Case II	76 529 €	73 901 €	96 924 €	93 811 €	76 076 €	73 705 €	81 884 €	79 546 €	75 291 €	72 801 €	74 686 €	72 196 €	72 564 €	70 074 €	73 351 €	71 096 €
Case III	94 029 €	90 637 €	112 019 €	108 265 €	91 722 €	88 493 €	95 241 €	92 064 €	92 561 €	89 309 €	89 791 €	86 552 €	87 561 €	87 226 €	87 709 €	85 459 €
Case IV	93 668 €	90 377 €	109 256 €	105 663 €	96 993 €	93 822 €	98 666 €	96 983 €	96 441 €	93 251 €	91 412 €	89 705 €	94 398 €	91 209 €	89 370 €	88 633 €

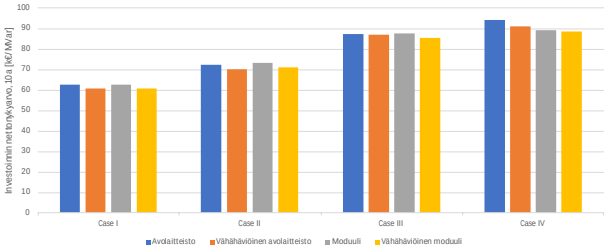
63 MVA	Nettonykyarvo, 30 vuotta / MVar															
%	30 %				48 %				58 %				58 % + yliaaltosuodatus			
	Avolaitteisto	Vähähäviöinen avolaitteisto	Moduuli	Vähähäviöinen moduuli	Avolaitteisto	Vähähäviöinen avolaitteisto	Moduuli	Vähähäviöinen moduuli	Avolaitteisto	Vähähäviöinen avolaitteisto	Moduuli	Vähähäviöinen moduuli	Avolaitteisto	Vähähäviöinen avolaitteisto	Moduuli	Vähähäviöine n moduuli
Case I	163 390 €	163 789 €	163 390 €	163 789 €	168 574 €	168 799 €	168 574 €	168 799 €	162 845 €	163 778 €	162 845 €	163 778 €	156 492 €	157 424 €	156 492 €	157 424 €
Case II	174 550 €	174 287 €	211 312 €	210 192 €	174 841 €	175 033 €	185 712 €	185 962 €	173 795 €	173 811 €	173 340 €	173 357 €	170 001 €	170 017 €	172 005 €	172 257 €
Case III	191 018 €	189 503 €	225 808 €	223 655 €	190 296 €	189 040 €	199 024 €	197 860 €	191 331 €	190 017 €	188 985 €	187 693 €	186 332 €	187 934 €	186 902 €	186 600 €
Case IV	190 289 €	188 870 €	222 497 €	220 545 €	193 610 €	192 447 €	200 124 €	200 514 €	192 755 €	191 584 €	187 450 €	187 816 €	190 712 €	189 541 €	185 407 €	186 744 €

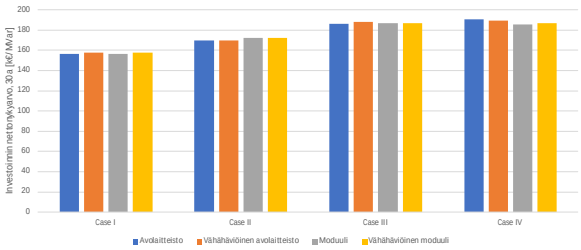
Kuormitustaso 58 %, estokela



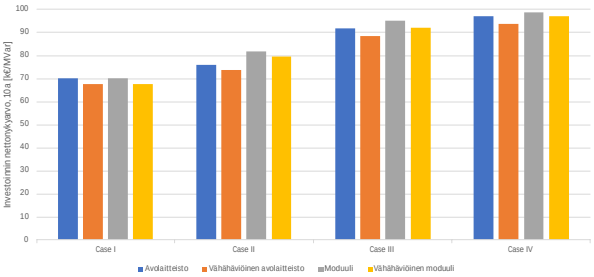


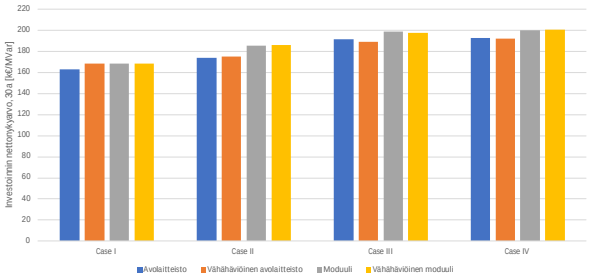
Kuormitustaso 58 % + yliaaltosuodatus



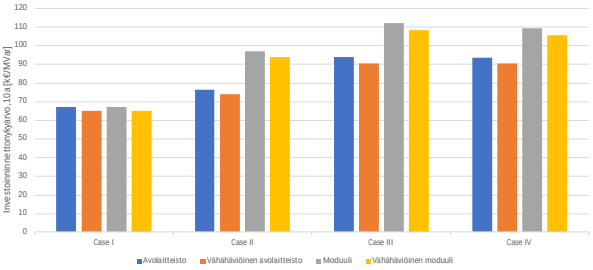


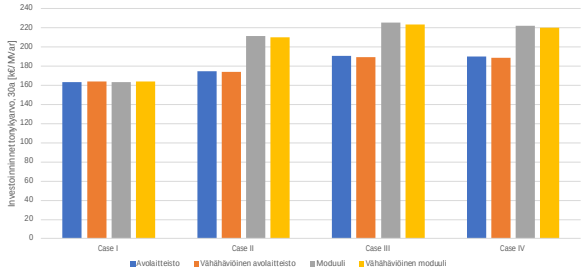
Kuormitustaso 48 %, estokela





Kuormitustaso 30 %, estokela

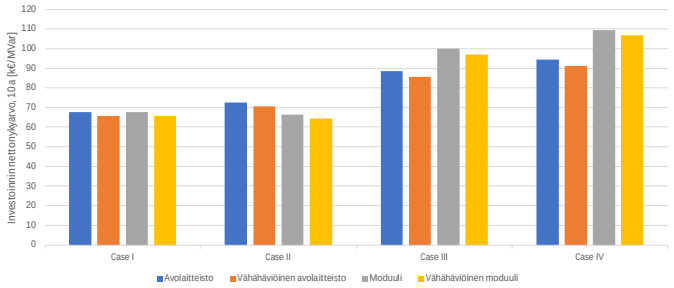


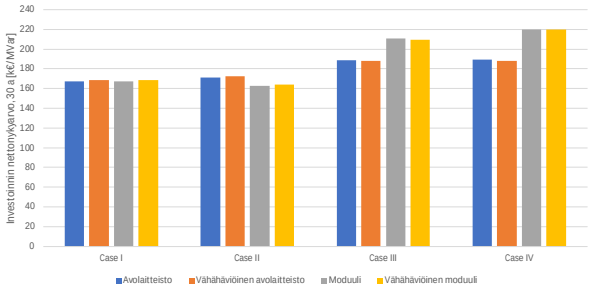


31,5 MVA	Nettonykyarvo, 10 vuotta /MVar											
%	24 %				33 %				52 %			
	Avolaitteisto	Vähähäviöinen avolaitteisto	Moduuli	Vähähäviöinen moduuli	Avolaitteisto	Vähähäviöinen avolaitteisto	Moduuli	Vähähäviöinen moduuli	Avolaitteisto	Vähähäviöinen avolaitteisto	Moduuli	Vähähäviöinen moduuli
Case I	63 575 €	60 890 €	63 575 €	60 890 €	55 677 €	54 628 €	55 677 €	54 628 €	67 748 €	65 650 €	67 748 €	65 650 €
Case II	71 477 €	68 767 €	62 588 €	58 742 €	69 139 €	66 377 €	54 090 €	52 024 €	72 629 €	70 714 €	66 404 €	64 482 €
Case III	85 428 €	82 165 €	97 751 €	93 352 €	89 317 €	85 885 €	97 939 €	94 508 €	88 533 €	85 563 €	99 984 €	96 895 €
Case IV	95 096 €	91 937 €	107 841 €	104 013 €	94 394 €	91 071 €	101 920 €	104 206 €	94 322 €	91 189 €	109 325 €	106 704 €

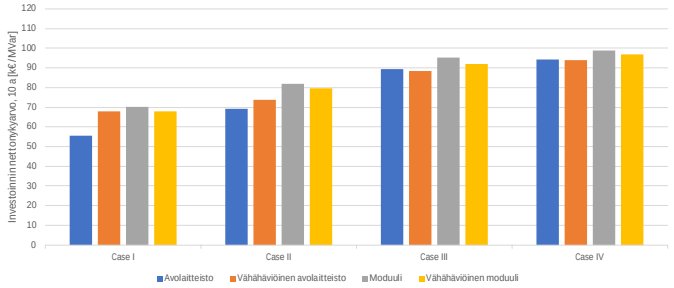
31,5 MVA	Nettonykyarvo, 30 vuotta / MVar											
%	24 %				33 %				52 %			
	Avolaitteisto	Vähähäviöinen avolaitteisto	Moduuli	Vähähäviöinen moduuli	Avolaitteisto	Vähähäviöinen avolaitteisto	Moduuli	Vähähäviöinen moduuli	Avolaitteisto	Vähähäviöinen avolaitteisto	Moduuli	Vähähäviöinen moduuli
Case I	160 886 €	160 758 €	160 886 €	160 758 €	147 507 €	150 323 €	147 507 €	150 323 €	167 450 €	168 280 €	167 450 €	168 280 €
Case II	170 353 €	170 300 €	156 868 €	154 809 €	164 587 €	164 433 €	140 806 €	141 880 €	171 450 €	172 685 €	162 562 €	163 786 €
Case III	183 549 €	182 520 €	207 181 €	204 146 €	185 183 €	183 845 €	202 830 €	201 492 €	188 491 €	187 902 €	210 552 €	209 754 €
Case IV	190 796 €	189 515 €	217 272 €	214 807 €	189 556 €	187 984 €	206 811 €	211 190 €	189 428 €	188 193 €	219 893 €	219 562 €

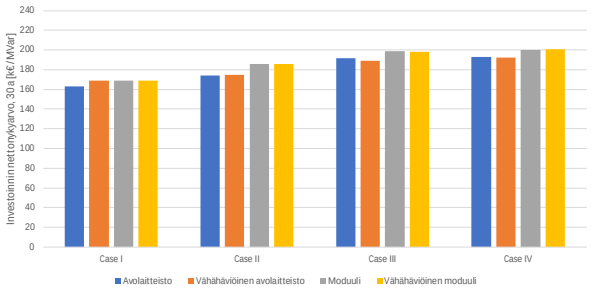
Kuormitustaso 52 %, estokela



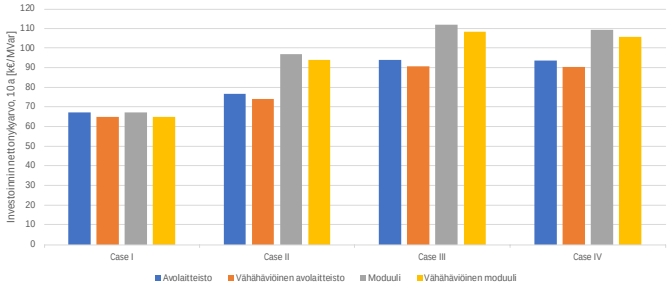


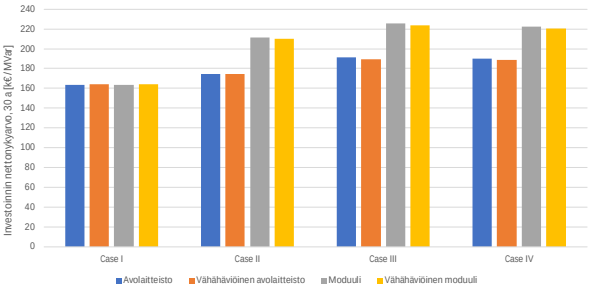
Kuormitustaso 33 %, estokela





Kuormitustaso 24 %, estokela

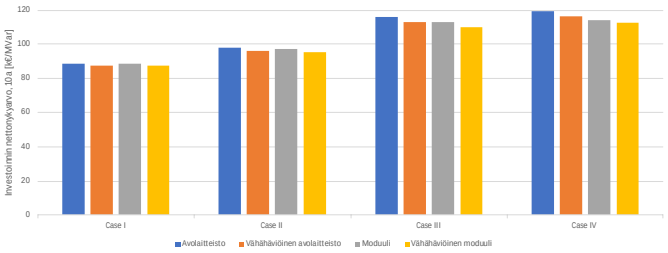


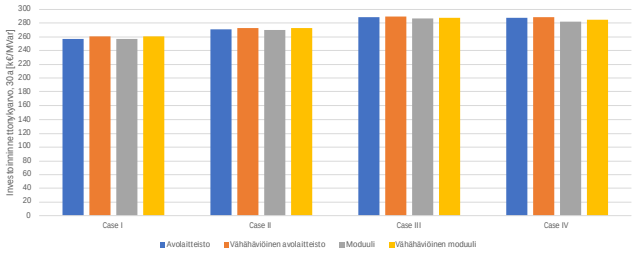


63 MVA	Nettonykyarvo, 10 vuotta / MVar															
%	30 %				48 %				58 %				58 % + yliaaltosuodatus			
	Avolaitteisto	Vähähäviöinen avolaitteisto	Moduuli	Vähähäviöinen moduuli	Avolaitteisto	Vähähäviöinen avolaitteisto	Moduuli	Vähähäviöinen moduuli	Avolaitteisto	Vähähäviöinen avolaitteisto	Moduuli	Vähähäviöinen moduuli	Avolaitteisto	Vähähäviöinen avolaitteisto	Moduuli	Vähähäviöinen moduuli
Case I	89 067 €	87 357 €	89 067 €	87 357 €	92 553 €	90 727 €	92 553 €	90 727 €	88 700 €	87 350 €	88 700 €	87 350 €	84 036 €	82 685 €	84 036 €	82 685 €
Case II	99 098 €	96 885 €	123 481 €	120 692 €	98 786 €	96 879 €	105 813 €	103 946 €	97 924 €	95 883 €	97 333 €	95 291 €	94 897 €	92 856 €	95 959 €	94 160 €
Case III	116 888 €	113 788 €	138 887 €	135 357 €	114 844 €	111 931 €	119 546 €	116 696 €	115 748 €	112 804 €	112 986 €	110 058 €	110 604 €	110 661 €	110 843 €	108 933 €
Case IV	116 440 €	113 443 €	135 930 €	132 575 €	119 861 €	117 015 €	122 587 €	121 286 €	119 230 €	116 367 €	113 998 €	112 673 €	117 128 €	114 265 €	111 897 €	111 569 €

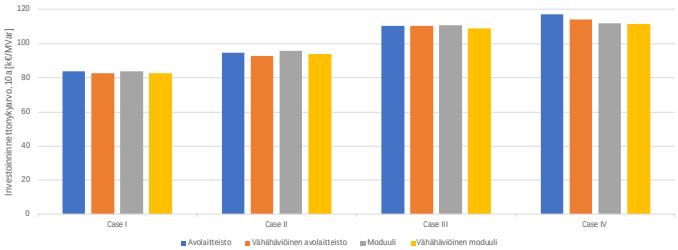
63 MVA	Nettonykyarvo, 30 vuotta / MVar															
%	30 %				48 %				58 %				58 % + yliaaltosuodatus			
	Avolaitteisto	Vähähäviöinen avolaitteisto	Moduuli	Vähähäviöinen moduuli	Avolaitteisto	Vähähäviöinen avolaitteisto	Moduuli	Vähähäviöinen moduuli	Avolaitteisto	Vähähäviöinen avolaitteisto	Moduuli	Vähähäviöinen moduuli	Avolaitteisto	Vähähäviöinen avolaitteisto	Moduuli	Vähähäviöinen moduuli
Case I	257 894 €	260 713 €	257 894 €	260 713 €	265 326 €	267 896 €	265 326 €	267 896 €	257 112 €	260 697 €	257 112 €	260 697 €	248 449 €	252 033 €	248 449 €	252 033 €
Case II	271 023 €	272 960 €	324 115 €	324 822 €	272 018 €	274 605 €	287 926 €	290 596 €	270 697 €	273 052 €	270 371 €	272 726 €	265 799 €	268 154 €	268 997 €	271 595 €
Case III	287 004 €	287 197 €	338 470 €	337 748 €	287 741 €	288 288 €	301 580 €	302 261 €	288 989 €	289 444 €	286 969 €	287 457 €	283 845 €	287 301 €	284 826 €	286 332 €
Case IV	285 912 €	286 199 €	334 552 €	334 074 €	289 323 €	290 000 €	300 542 €	302 878 €	288 163 €	288 840 €	282 446 €	284 757 €	286 061 €	286 738 €	280 344 €	283 654 €

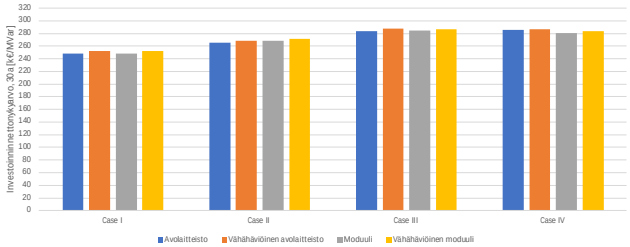
Kuormitustaso 58 %, estokela



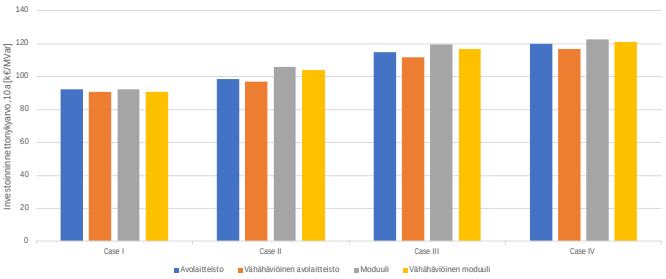


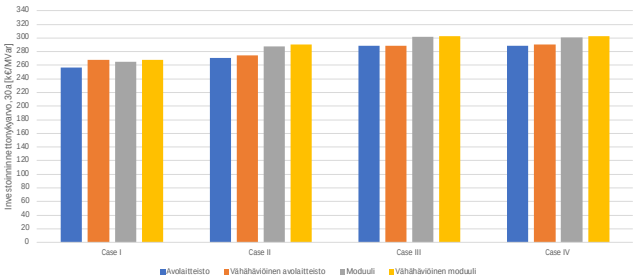
Kuormitustaso 58 % + yliaaltosuodatus



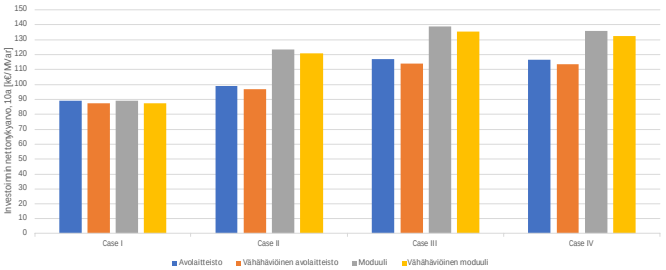


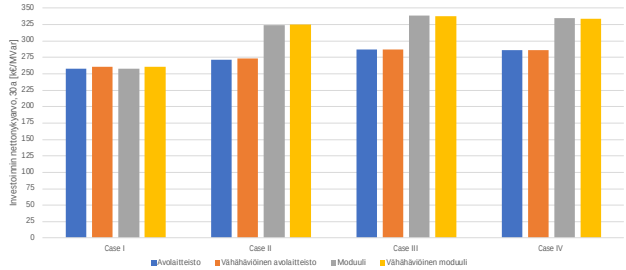
Kuormitustaso 48 %, estokela





Kuormitustaso 30 %, estokela

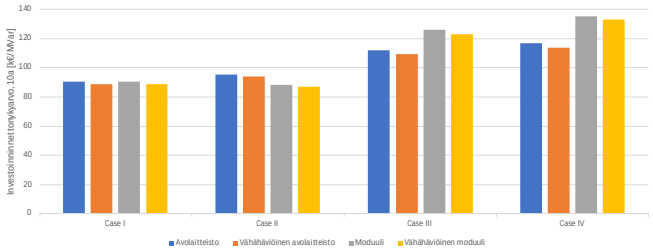


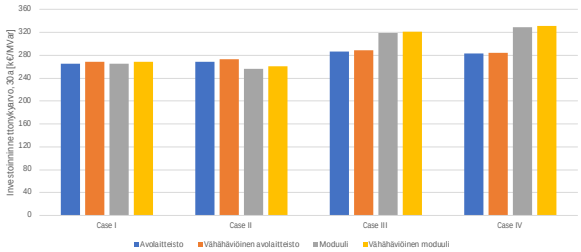


31,5 MVA	Nettonykyarvo, 10 vuotta /MVar											
%	24 %				33 %				52 %			
	Avolaitteisto	Vähähäviöinen avolaitteisto	Moduuli	Vähähäviöinen moduuli	Avolaitteisto	Vähähäviöinen avolaitteisto	Moduuli	Vähähäviöinen moduuli	Avolaitteisto	Vähähäviöinen avolaitteisto	Moduuli	Vähähäviöinen moduuli
Case I	85 622 €	83 391 €	85 622 €	83 391 €	76 359 €	76 082 €	76 359 €	76 082 €	90 413 €	88 862 €	90 413 €	88 862 €
Case II	94 078 €	91 841 €	83 977 €	80 391 €	90 960 €	88 660 €	73 663 €	72 190 €	95 252 €	93 936 €	88 294 €	86 970 €
Case III	108 274 €	105 381 €	123 301 €	119 059 €	111 807 €	108 711 €	122 553 €	119 457 €	111 850 €	109 289 €	125 835 €	123 134 €
Case IV	117 718 €	114 858 €	133 683 €	130 027 €	116 884 €	113 829 €	126 648 €	129 434 €	116 798 €	113 969 €	135 446 €	133 225 €

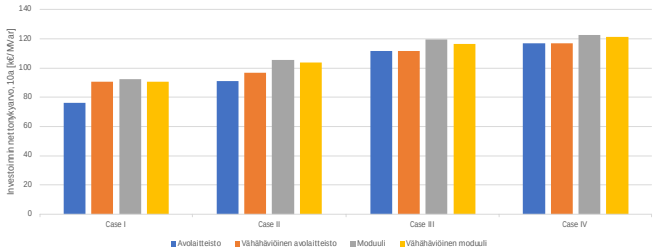
31,5 MVA	Nettonykyarvo, 30 vuotta / MVar											
%	24 %				33 %				52 %			
	Avolaitteisto	Vähähäviöinen avolaitteisto	Moduuli	Vähähäviöinen moduuli	Avolaitteisto	Vähähäviöinen avolaitteisto	Moduuli	Vähähäviöinen moduuli	Avolaitteisto	Vähähäviöinen avolaitteisto	Moduuli	Vähähäviöinen moduuli
Case I	256 303 €	258 557 €	256 303 €	258 557 €	237 426 €	243 929 €	237 426 €	243 929 €	265 287 €	268 874 €	265 287 €	268 874 €
Case II	267 504 €	269 929 €	249 344 €	248 892 €	258 374 €	260 647 €	225 761 €	229 796 €	268 581 €	272 791 €	256 953 €	261 147 €
Case III	280 376 €	281 403 €	315 240 €	313 390 €	279 954 €	280 531 €	306 529 €	307 106 €	287 174 €	288 789 €	319 769 €	321 084 €
Case IV	285 574 €	286 007 €	325 622 €	324 359 €	283 795 €	283 812 €	310 624 €	317 083 €	283 612 €	284 112 €	329 380 €	331 176 €

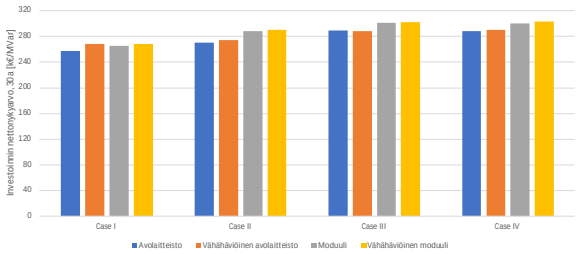
Kuormitustaso 52 %, estokela



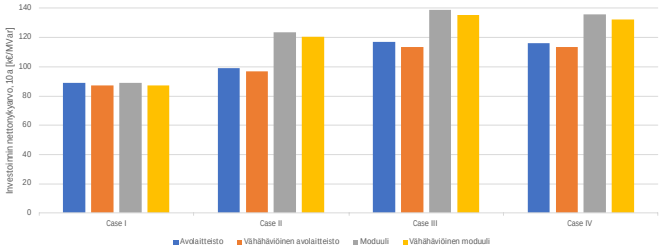


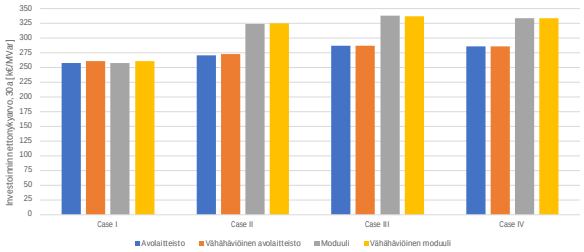
Kuormitustaso 33 %, estokela





Kuormitustaso 24 %, estokela

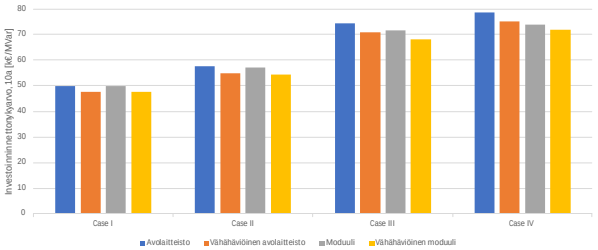


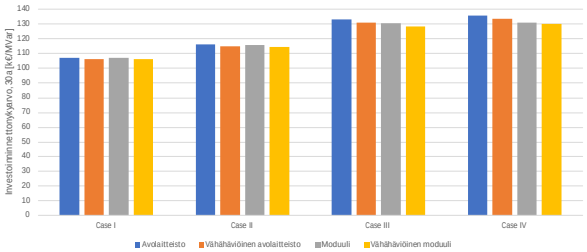


63 MVA	Nettonykyarvo, 10 vuotta / MVar															
%	30 %				48 %				58 %				58 % + yliaaltosuodatus			
	Avolaitteisto	Vähähäviöinen avolaitteisto	Moduuli	Vähähäviöinen moduuli	Avolaitteisto	Vähähäviöinen avolaitteisto	Moduuli	Vähähäviöinen moduuli	Avolaitteisto	Vähähäviöinen avolaitteisto	Moduuli	Vähähäviöinen moduuli	Avolaitteisto	Vähähäviöinen avolaitteisto	Moduuli	Vähähäviöine n moduuli
Case I	50 023 €	47 490 €	50 023 €	47 490 €	52 520 €	49 903 €	52 520 €	49 903 €	49 760 €	47 484 €	49 760 €	47 484 €	46 160 €	43 884 €	46 160 €	43 884 €
Case II	58 879 €	55 948 €	76 120 €	72 774 €	58 320 €	55 608 €	63 166 €	60 481 €	57 598 €	54 778 €	56 986 €	54 165 €	55 116 €	52 295 €	55 687 €	53 096 €
Case III	76 066 €	72 468 €	90 898 €	86 992 €	73 570 €	70 116 €	76 166 €	72 756 €	74 355 €	70 884 €	71 594 €	68 134 €	69 492 €	68 858 €	69 568 €	67 070 €
Case IV	75 773 €	72 274 €	88 297 €	84 542 €	79 009 €	75 605 €	79 867 €	77 900 €	78 519 €	75 096 €	73 672 €	71 682 €	76 532 €	73 109 €	71 685 €	70 639 €

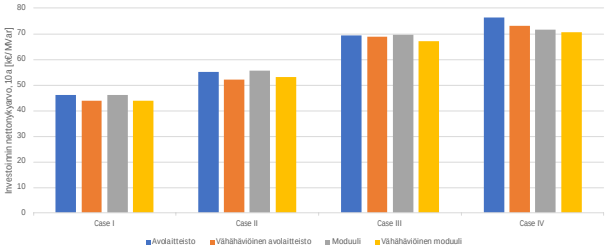
63 MVA	Nettonykyarvo, 30 vuotta / MVar															
%	30 %				48 %				58 %				58 % + yliaaltosuodatus			
	Avolaitteisto	Vähähäviöinen avolaitteisto	Moduuli	Vähähäviöinen moduuli	Avolaitteisto	Vähähäviöinen avolaitteisto	Moduuli	Vähähäviöinen moduuli	Avolaitteisto	Vähähäviöinen avolaitteisto	Moduuli	Vähähäviöinen moduuli	Avolaitteisto	Vähähäviöinen avolaitteisto	Moduuli	Vähähäviöine n moduuli
Case I	107 088 €	106 086 €	107 088 €	106 086 €	110 919 €	109 788 €	110 919 €	109 788 €	106 685 €	106 077 €	106 685 €	106 077 €	101 733 €	101 126 €	101 733 €	101 126 €
Case II	116 992 €	115 463 €	143 936 €	141 772 €	116 874 €	115 681 €	124 722 €	123 571 €	115 997 €	114 663 €	115 474 €	114 140 €	112 882 €	111 547 €	114 176 €	113 070 €
Case III	133 567 €	131 082 €	158 359 €	155 402 €	132 011 €	129 726 €	137 695 €	135 479 €	132 912 €	130 590 €	130 402 €	128 096 €	128 049 €	128 564 €	128 376 €	127 033 €
Case IV	133 056 €	130 667 €	155 433 €	152 651 €	136 289 €	134 076 €	140 017 €	139 280 €	135 620 €	133 393 €	130 608 €	129 848 €	133 633 €	131 406 €	128 621 €	128 805 €

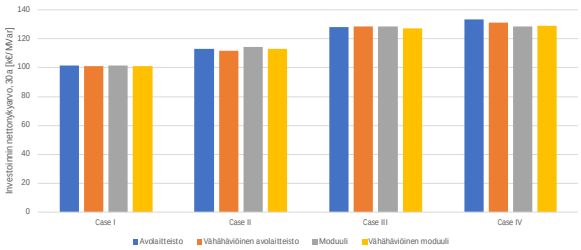
Kuormitustaso 58 %, estokela



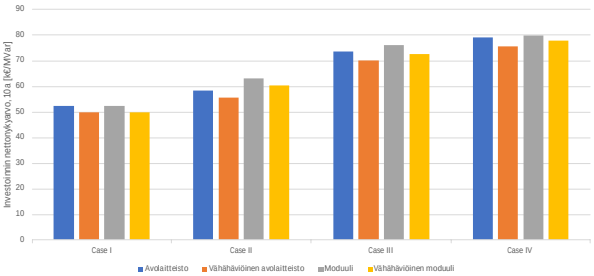


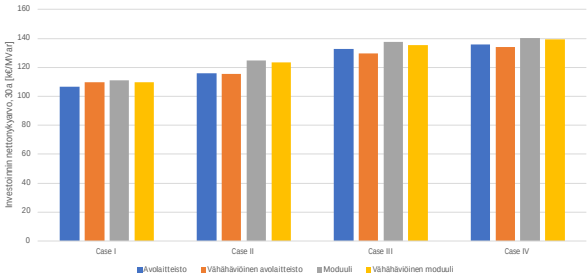
Kuormitustaso 58 % + yliaaltosuodatus



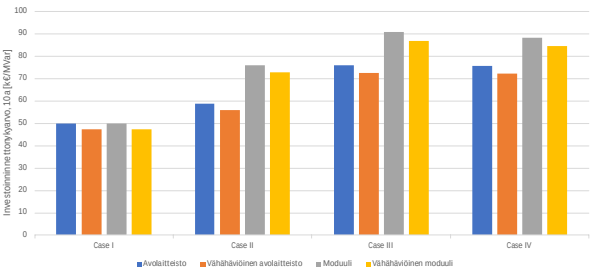


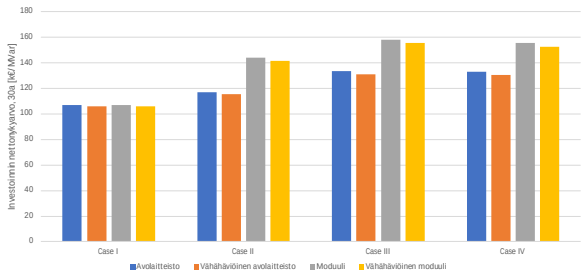
Kuormitustaso 48 %, estokela





Kuormitustaso 30 %, estokela

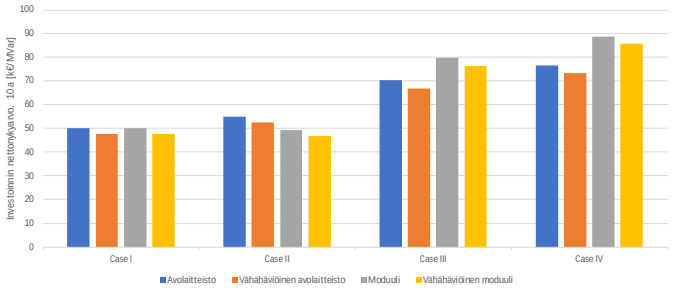


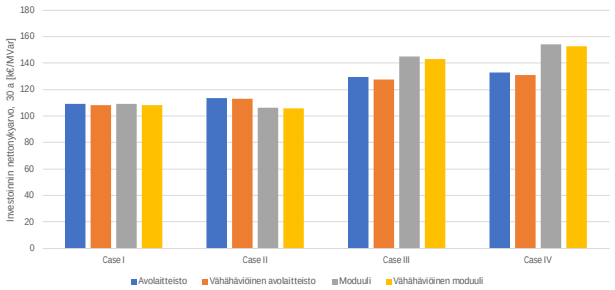


31,5 MVA	Nettonykyarvo, 10 vuotta /MVar											
%	24 %				33 %				52 %			
	Avolaitteisto	Vähähäviöinen avolaitteisto	Moduuli	Vähähäviöinen moduuli	Avolaitteisto	Vähähäviöinen avolaitteisto	Moduuli	Vähähäviöinen moduuli	Avolaitteisto	Vähähäviöinen avolaitteisto	Moduuli	Vähähäviöinen moduuli
Case I	46 391 €	43 374 €	46 391 €	43 374 €	39 579 €	37 945 €	39 579 €	37 945 €	50 071 €	47 565 €	50 071 €	47 565 €
Case II	53 829 €	50 771 €	45 912 €	41 887 €	52 099 €	48 998 €	38 847 €	36 339 €	54 959 €	52 596 €	49 326 €	46 957 €
Case III	67 519 €	63 990 €	77 711 €	73 215 €	71 660 €	67 990 €	78 615 €	74 945 €	70 248 €	66 981 €	79 702 €	76 335 €
Case IV	77 309 €	73 938 €	87 526 €	83 585 €	76 711 €	73 200 €	82 487 €	84 378 €	76 649 €	73 301 €	88 788 €	85 875 €

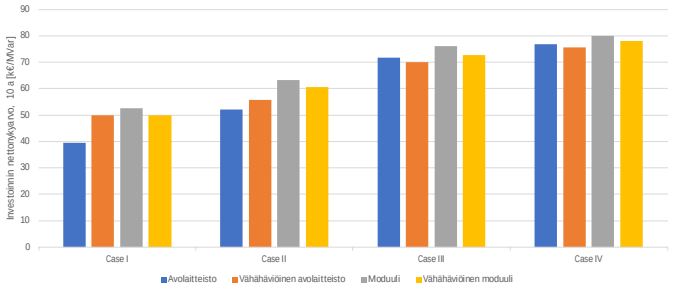
31,5 MVA	Nettonykyarvo, 30 vuotta / MVar											
%	24 %				33 %				52 %			
	Avolaitteisto	Vähähäviöinen avolaitteisto	Moduuli	Vähähäviöinen moduuli	Avolaitteisto	Vähähäviöinen avolaitteisto	Moduuli	Vähähäviöinen moduuli	Avolaitteisto	Vähähäviöinen avolaitteisto	Moduuli	Vähähäviöinen moduuli
Case I	104 083 €	102 581 €	104 083 €	102 581 €	94 022 €	94 679 €	94 022 €	94 679 €	109 180 €	108 410 €	109 180 €	108 410 €
Case II	112 449 €	110 966 €	101 807 €	98 842 €	108 687 €	107 132 €	90 257 €	89 611 €	113 546 €	113 051 €	106 335 €	105 831 €
Case III	125 692 €	123 487 €	142 588 €	138 901 €	128 496 €	126 067 €	140 801 €	138 372 €	129 509 €	127 654 €	145 253 €	143 244 €
Case IV	134 045 €	131 788 €	152 403 €	149 271 €	133 128 €	130 656 €	144 673 €	147 805 €	133 034 €	130 811 €	154 340 €	152 785 €

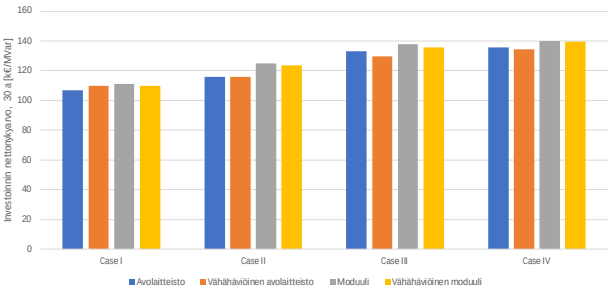
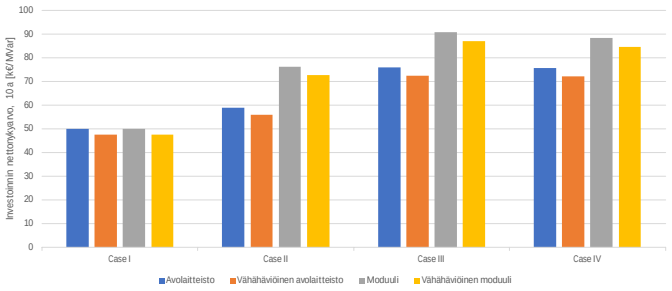
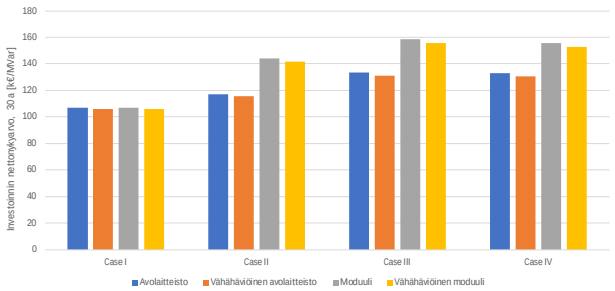
Kuormitustaso 52 %, estokela





Kuormitustaso 33 %, estokela





Kuormitustaso 24 %, estokela