



Riikka Pekkinen

Energiamurroksen vaikutukset sähkölämmitteisten pientaloalueiden muuntopiireihin

Tekniikan ja innovaatiojohtamisen akateeminen yksikkö
Energiatekniikan diplomityö
Energia- ja informaatiotekniikan ohjelma

Vaasa 2026

VAASAN YLIOPISTO
Tekniikan ja innovaatiojohtamisen akateeminen yksikkö

Tekijä:	Riikka Pekkinen		
Tutkielman nimi:	Energiamurroksen vaikutukset sähkölämmitteisten pientaloalueiden muuntopiireihin		
Tutkinto:	Diplomi-insinööri		
Opintosuunta:	Energiatekniikka		
Työn valvoja:	Anne Mäkiranta		
Työn ohjaajat:	Ari Salo, Kimmo Kauhaniemi		
Työn tarkastaja:	Kimmo Kauhaniemi		
Valmistumisvuosi:	2026	Sivumäärä:	87

TIIVISTELMÄ:

Tässä diplomityössä tarkastellaan energiamurroksen vaikutuksia sähkölämmitteisen pientaloalueen muuntopiireihin. Energiamurroksella tarkoitetaan energiasektorin muutosta kohti hajautettua energiantuotantoa ja hiilineutraalia energiasysteemiä. Ilmiö näkyy erityisesti rakennusten sähkölämmityksen ja liikenteen sähköistymisenä, mikä lisää sähkön kulutusta pientaloissa. Sähkönkulutuksen kasvaessa myös sen ajoittuminen muuttuu, sillä kuormia voidaan ohjata esimerkiksi sähkön spot-hinnan perusteella. Joustavuuden ja automaatiokehityksen myötä kuormien tehot voivat ajoittua samoille hetkille, mikä kasvattaa huipputehoja jakeluverkossa.

Tutkimuksen tavoitteena on arvioida, kuinka energiamurros voi enimmillään vaikuttaa huipputehoihin liittymä- ja jakelumuuntajatasolla sekä millaisia vaikutuksia kuormituksen ajallisella muutoksella on pienjänniteverkkoon. Tarkastelun keskiössä on tehoprofiilien muutokset ja niiden vaikutus verkon kapasiteetin riittävyyteen.

Teoriaosuudessa käsitellään energiamurroksen keskeisiä ilmiöitä sekä niiden vaikutuksia muuttuvaan sähköjärjestelmään ja sähkönkulutukseen. Lisäksi tarkastellaan sähkömarkkinoiden kehitystä ja energiamurroksen seurauksena kehittyneitä ratkaisuja, jotka lisäävät kuormien joustavuutta. Lopuksi käsitellään jakeluverkon mitoitusperiaatteita ja kysyntäjouston roolia jakeluverkon näkökulmasta. Tämän jälkeen työssä keskitytään skenaariopohjaiseen mallinnukseen, jossa tarkastellaan erilaisten kuormitustilanteiden vaikutuksia pienjänniteverkkoon. Mallinnus perustuu tuntikohtaiseen mittausdataan, jota täydennetään ulkolämpötila- ja sähkön spot-hintatiedoilla. Kuormituksen muutoksia mallinnetaan korjauskertoimien avulla, ja vaikutuksia arvioidaan muuntopiiritasolla. Työssä analysoidaan erityisesti joustavien kuormien ajallisen ajoittamisen merkitystä sekä niiden vaikutusta huipputehoihin ja verkon kuormitettavuuteen.

Tutkimuksen tulosten perusteella energiamurros asettaa merkittäviä haasteita jakeluverkon mitoitukselle ja käytölle. Sähkölämmitys yhdessä sähköauton latauksen kanssa kasvattaa huipputehoja ja aiheuttaa ylikuormittumista jakeluverkossa. Kuormitusasteet ja jännitteenalenemat kasvavat sekä liittymä-, runkojohto- että jakelumuuntajatasolla paikoin ylittäen verkon mitoituksen raja-arvot. Pelkkä verkon kapasiteetin kasvattaminen ei ole riittävä ratkaisu kasvavien tehotarpeiden ratkaisemisessa, vaan keskeiseksi tekijäksi nousee huipputehojen hallintakeinot, joiden avulla voidaan tasata huipputehoja ja varmistaa verkon toimintavarmuus muuttuvassa toimintaympäristössä.

AVAINSANAT: Energiamurros, jakeluverkot, sähkönkulutus, kuormitus, sähkölämmitys, sähköautot, kysyntäjousto

UNIVERSITY OF VAASA**School of Technology and Innovations****Author:** Riikka Pekkinen**Title of the thesis:** The impacts of the energy transition on transformer circuits in electrically heated detached house areas**Degree:** Master of Science in Technology**Degree Programme:** Energy Technology**Supervisor:** Anne Mäkiranta**Instructors:** Ari Salo, Kimmo Kauhaniemi**Inspector:** Kimmo Kauhaniemi**Year:** 2026**Pages:** 87

ABSTRACT:

This thesis investigates the impacts of the energy transition on distribution transformer circuits in an electrically heated detached house area. The energy transition refers to the transformation of the energy sector towards distributed energy production and a carbon-neutral energy system. This phenomenon is particularly reflected in the electrification of building heating and transport, which increases electricity consumption in detached houses. As electricity consumption increases, its temporal distribution also changes, as loads can be controlled, for example, based on electricity prices. With flexibility and automation, load demand may concentrate at the same time periods, thereby increasing peak loads in the distribution network.

The objective of this study is to assess how the energy transition can maximally affect peak loads at the connection point and distribution transformer levels, as well as the effects of temporal changes in load demand on the low-voltage network. The analysis focuses on changes in load profiles and their implications for network capacity adequacy.

The theory section discusses the key phenomena of the energy transition and their impacts on the evolving power system and electricity consumption. In addition, it examines the development of electricity markets and solutions emerging from the energy transition that increase load flexibility. Finally, the dimensioning principles of the distribution network and the role of demand response are discussed from the distribution network perspective. This is followed by scenario-based modelling, where the effects of different loading conditions on the low-voltage network are analysed. The modelling is based on hourly measurement data combined with temperature and spot-price data. Changes in load demand are modelled using correction factors, and their impacts are assessed at the transformer feeder level. Attention is given to the temporal shifting of flexible loads and its effects on peak loads and network utilization.

Based on the results, the energy transition poses significant challenges to the dimensioning and operation of distribution network. Electric heating combined with electric vehicle charging increases peak loads and may cause overloading in the network. Loading levels and voltage drops increase at the connection point, feeder, and distribution transformer levels, in some cases exceeding dimensioning limits. Increasing network capacity alone is not a sufficient solution to growing power needs. Instead, peak load management measures play a key role in balancing load demand and ensuring reliable network operation in a changing operating environment.

KEYWORDS: Energy transition, distribution network, electricity consumption, load, electric heating, electric vehicles, demand response

Alkusanat

Haluan kiittää tämän diplomityön toimeksiantajaa Vaasan Sähköverkko Oy:ta, erityisesti ohjaajaani Ari Saloa työn aiheen kehittamisestä sekä opettavaisesta ohjauksesta. Lisäksi haluan kiittää esimiestäni Tony Bäckä joustavuudesta opintojeni aikana. Kiitos myös tiimilleni Liittymäpalveluille tuesta sekä kärsivällisyydestä työprosessin haastavina aikoina. Kiitokset myös Stinalle ja Hubertille, jotka ovat olleet apuna viimeisen vuoden aikana.

Kiitokset Vaasan yliopistolle, erityisesti sähkötekniikan professori Kimmo Kauhaniemelle ja yliopistolehtori Anne Mäkirannalle laadukkaista kursseista, opetuksesta sekä työn ohjauksesta ja valvonnasta. Suurkiitokset opiskelukavereilleni näistä mahtavista opiskeluvuosista. Ilman teitä moni ikimuistoinen kokemus olisi jäänyt kokematta, enkä todennäköisesti olisi koskaan kunnolla kotiutunut Vaasaan.

Viimeiseksi haluan kiittää perhettäni ja ystäviäni kannustuksesta lähteä opiskelemaan sekä tuesta opintovuosien aikana.

Vaasassa 24.6.2026

Riikka Pekkinen

Sisällys

1	Johdanto	11
1.1	Tavoitteet ja tutkimuskysymykset	12
1.2	Rajaukset	12
1.3	Vaasan Sähköverkko Oy	13
2	Energiamurros ja muuttuva sähköjärjestelmä	14
2.1	Energiamurroksen ilmiöt	15
2.1.1	Lämmitysjärjestelmien kehitys	15
2.1.2	Liikenteen sähköistyminen	19
2.1.3	Pientuotannon kasvu	20
2.2	Suomen sähkömarkkinan kehitys	21
2.2.1	Spot-hinnan muodostuminen ja vaihtelu	21
2.2.2	Sähkösopimustyyppien kehitys	25
2.3	Energiamurroksen seurauksena kehittyneet ratkaisut	27
2.3.1	Kotiautomaatiojärjestelmät	27
2.3.2	Kotiakut	28
2.3.3	Sähkökattilat	29
3	Jakeluverkon mitoituseriaatteet	30
3.1	Jännitteenalenema	30
3.2	Johtojen mitoitus ja kuormitusaste	32
3.3	Jakelumuuntajan kuormitettavuus	33
4	Kysyntäjousto jakeluverkossa	35
4.1	Kysyntäjouston määritelmä	35
4.2	Kuormien joustopotentiali	38
4.3	Kysyntäjouston edellytykset ja haasteet jakeluverkon kuorman hallinnassa	40
4.4	Joustavien kuormien verkostovaikutukset	41
5	Tutkimusaineisto ja menetelmät	43
5.1	Tutkimusaineisto	43
5.2	Tutkittava muuntopiiri ja käyttöpaikat	44

5.3	Yleistys vastaaviin muuntopiireihin	45
5.4	Tutkimusmenetelmät	45
5.5	Korjauskertoimet	46
6	Skenaariomallinnus	48
6.1	Kuormat skenaariomallinnuksessa	48
6.1.1	Pohjakuorma	49
6.1.2	Sähköiset lämmitysjärjestelmät	49
6.1.3	Lämminvesivaraaja	50
6.1.4	Sähköautojen vakiolataus	51
6.1.5	Optimoitu sähköauton lataus	53
6.2	Skenaariot	53
7	Tulokset ja analyysi	55
7.1	Tehoprofiilit liittymätasolla	55
7.1.1	Lähtötilanne	55
7.1.2	Sähkölämmityskuormat	56
7.1.3	Sähköauton lataus	58
7.2	Tehoprofiilit muuntopiiritasolla	60
7.2.1	Lähtötilanne	60
7.2.1	Sähköiset lämmityskuormat	62
7.2.2	Sähkölämmitys ja sähköauton lataus	63
7.2.3	Tehoprofiilien tuloksista saadut kertoimet	65
7.3	Tehonjakolaskelmat	66
7.3.1	Jakelumuuntajan kuormitusasteet	66
7.3.2	Runkojohtojen kuormitusasteet ja jännitteenalenemat	68
7.3.3	Liittymisjohtojen kuormitusasteet	70
7.3.4	Jännitteenalenemat liittymillä	71
7.4	Vaikutusten tarkastelu useissa muuntopiireissä	72
7.5	Kuormitusasteet kaikilla jakelumuuntajilla	75
8	Johtopäätökset	77

9	Yhteenveto	81
	Lähteet	82

Kuvat

Kuva 1.	Vaasan Sähköverkon toiminta-alue (Vaasan Sähköverkko, n.d.).	13
Kuva 2.	Asumisen energiankulutus käyttökohteittain (Tilastokeskus, 2024, muokattu).	16
Kuva 3.	Rivi- ja paritalon ensisijaiset lämmitystavat vuosina 2012,2016 ja 2022 (Tilastokeskus, 2024, muokattu).	17
Kuva 4.	Omakotitalojen pääasiallinen lämmitystapa vuosina 2012, 2016 ja 2022 (Tilastokeskus, 2024, muokattu).	17
Kuva 5.	Liikennekäytössä olevat henkilöautot käyttövoimittain vuosina 2021–2025 (Tilastokeskus, 2025).	19
Kuva 6.	Sähkön markkinahinnan muodostuminen kysynnän ja tarjonnan mukaan (Nord Pool, n.d.).	22
Kuva 7.	Spot-hinnan vaihtelu 29.11.–7.12.2022 (Pörssisähkö.net, n.d., muokattu).	24
Kuva 8.	Sähkösopimustyyppien osuudet kaikista sopimuksista ja kehitys ajanjaksolla 2021–2024 (Energiavirasto, 2025b).	26
Kuva 9.	Periaate kysyntäjoustosta.	37
Kuva 10.	Liittymien keskimääräinen teho suhteessa spot-hintaan.	56
Kuva 11.	Liittymätason tehoprofiilit, kun sähkölämmitysjärjestelmät reagoivat spot- hinnan vaihteluun.	57
Kuva 12.	Tehoprofiilit liittymillä vakioaikaisessa sähköauton latausskenaariossa.	58
Kuva 13.	Tehoprofiilit liittymätasolla optimoidussa sähköauton latausskenaariossa.	59
Kuva 14.	Lähtötilanne muuntopiiritasolla.	61
Kuva 15.	Tehoprofiili, kun sähkölämmitystä ohjataan spot-hinnan perusteella.	62
Kuva 16.	Sähkölämmityksen ja sähköauton latauksen yhdistetty tehoprofiili.	64
Kuva 17.	Liittymisjohtojen kuormitusasteet eri skenaarioissa.	70
Kuva 18.	Sähkölämmitteinen pientaloalue.	72

Taulukot

Taulukko 1. Sähkönjakelun jännitteen vaihtelualueet sekä jännitteenaleneman raja-arvot (Energiateollisuus ry, 2022).	31
Taulukko 2. Muuntopiirin käyttöpaikat.	44
Taulukko 3. Tehonjakolaskelmissa käytetyt skenaariot sekä niiden sisältämät kuormat, suhdeluvut sekä käytetyt korjauskertoimet.	65
Taulukko 4. Tutkitun jakelumuuntajan kuormitusasteet eri skenaarioissa. Harmaalla korostettu raja-arvojen ylitykset (RN=säteittäinen verkko, MN=Silmukoitu verkko).	66
Taulukko 5. Runkojohtojen kuormitusasteet, loppusolmun pienimmät jännitteet sekä jännitteenalenemat eri skenaarioissa.	68
Taulukko 6. Muuntajien nimellistehot, maksiminäennäisteho, kuormitusasteet ja raja-arvojen ylitykset yhdistelmäskenaariossa (harmaalla korostettu raja-arvojen ylitykset).	73

Lyhenteet

AMR	Automaattinen mittareiden luenta (Automatic meter reading)
DR	Kysyntäjousto (Demand Response)
DMR	Kysynnän hallinta (Demand Side Management)
IEA	Kansainvälinen energiajärjestö (International Energy Agency)
KJ	Keskijänniteverkko
MN	Silmukoitu verkko (Meshed Network)
PJ	Pienjänniteverkko
RN	Säteittäinen verkko (Radial Network)

Symbolit

C	Kulutus
c	Ominaislämpökapasiteetti
d	Ajomatka
E	Energiantarve
I	Virta
m	Massa
P_{lataus}	Sähköauton latausteho
R	Resistanssi
t	Aika
U	Jännite
U_h	Jännitteenalenema
U_n	Nimellisjännite
X	Reaktanssi
ΔT	Lämpötilanmuutos
φ	Vaihekulma

Ilmoitus tekoälyn käytöstä

Tämän diplomityön tekstin kieliasun tarkastamisessa, kehittämisessä sekä englannin kielen käännöstyössä on hyödynnetty Microsoft 365 Copilot-tekoälytyökalua. Tekoälyn tuottama sisältö on tarkistettu, arvioitu ja tarvittaessa muokattu tekijän toimesta. Tekijä vastaa kokonaisuudessaan diplomityön sisällöstä, asianmukaisuudesta ja sen oikeellisuudesta.

1 Johdanto

Energiamurros lisää sähkönkulutusta ja muuttaa sen ajallista jakautumista. Rakennusten lämmitysratkaisujen ja liikenteen sähköistyminen sekä spot-hintaan perustuva kuormanohjaus muuttavat tehoprofiileja siten, että sähkönkäyttö ajoittuu yhä useammin samoille ajankohdille. Tämä lisää kuormien samanaikaisuutta ja nostaa huipputehoja jakeluverkossa.

Jakeluverkko on suunniteltava kestäämään tyypillisesti harvoin esiintyvät mutta mitoituksen kannalta kriittiset huipputehotilanteet. Energiamurroksen myötä kuormituksen samanaikaisuus kasvaa, mikä voi johtaa verkon komponenttien, kuten runkojohtojen ja jakelumuuntajien ylikuormittumiseen. Vaikka kokonaisenergiankulutus ei kasvaisi samassa suhteessa, kuormituksen päällekkäisyys voi aiheuttaa tilanteita, joissa verkon komponentit, kuten runkojohdot ja jakelumuuntajat kuormittuvat aiempaa voimakkaammin. Energiamurroksen muokkaamat tehoprofiilit ja huipputehojen päällekkäisyys haastavat siten nykyistä verkkorakennetta ja sen mitoitusperiaatteita.

Huipputehon kasvu voi lisätä verkon vahvistamistarvetta ja johtaa merkittäviin investointeihin jakeluverkossa. Samalla verkossa on usein kapasiteettia käyttämättä suurimman osan ajasta, mikä korostaa kuormituksen hajauttamisen merkitystä.

Ilmiön tarkastelu on tarpeen, jotta voidaan arvioida huipputehojen kasvun suuruutta ja sen vaikutuksia jakeluverkon toimintaan tulevaisuudessa. Tarkastelun avulla voidaan tunnistaa tilanteet, joissa nykyinen verkko ei kykene vastaamaan kasvavaan kuormitukseen, sekä tuoda esiin huipputehojen hallintakeinojen tarve.

1.1 Tavoitteet ja tutkimuskysymykset

Tämän työn tavoitteena on tutkia energiamurroksen vaikutuksia sähkölämmitteisen asuintaloalueen pienjänniteverkossa sekä liittymä- että jakelumuuntajatasolla. Tarkastelun keskiössä on tehoprofiilien ajallinen muuttuminen ja sen vaikutus huipputehoihin. Tarkoituksena on tuottaa tietoa energiamurroksen aiheuttamien kuormitusmuutosten suuruusluokasta sekä niiden vaikutuksesta jakeluverkkoon.

Tutkimuksessa vastataan seuraaviin tutkimuskysymyksiin:

1. Kuinka paljon energiamurros voi enimmillään vaikuttaa sähkölämmitteisten pientaloalueiden huipputehoihin?
2. Miten energiamurros vaikuttaa pienjänniteverkkoon muuntopiiritasolla?

1.2 Rajaukset

Mallinnuksen lähtöarvot perustuvat yhteen pientaloalueen muuntopiiriin, jossa sähkölämmityksen osuus on merkittävä. Tarkastelu kohdistuu kylmään talvijaksoon, jotta verkon kannalta kuormitukseltaan mitoittavinta tilannetta voidaan analysoida. Työssä ei pyritä kehittämään ratkaisutoimia, vaan tarkastelemaan ja todentamaan huipputehojen kasvua sekä sitä, miten kulutusprofiilien muutos vähentää kuormien risteilyä eli kuormien ajallista hajautumista.

Yksittäisten käyttöpaikkojen tarkat tiedot, kuten rakennusten pinta-alat, sisälämpötilat, energialuokitukset tai tarkka lämmitysmuoto ei ole tiedossa, minkä vuoksi sähkölämmityksen tehontarve nojautuu aiempien tutkimusten tapaustarkasteluihin ja kirjallisuuteen.

Mallinnuksessa ei huomioida liittymien pääsulakkeiden kokoa 3x25 A, sillä sulakekoko rajoittaisi huipputehon liittymätasolla 17,3 kW:iin. Tutkimuksen tarkoituksena on kuvata verkon kannalta mahdollisimman kuormittavinta tilannetta.

1.3 Vaasan Sähköverkko Oy

Vaasan Sähköverkko Oy on osa Vaasan Sähkö -konsernia ja vastaa sähkönjakelusta, sähköverkon ylläpidosta sekä kehittämisestä toimialueellaan. Toiminta-alue on kahdeksan eri kunnan alueella sisältäen kaupunki-, maaseutu- ja saaristoaluetta. Alueen monimuotoisuus asettaa erilaisia vaatimuksia sähköverkon suunnittelulle, mitoitukselle ja käytölle. Alueella on 4 976 km pienjänniteverkkoa ja keskijänniteverkkoa 2336 km (Vaasan Sähköverkko Oy, 2026.) Vaasan Sähköverkon toiminta-alue esitetään kuvassa 1.



Kuva 1. Vaasan Sähköverkon toiminta-alue (Vaasan Sähköverkko, n.d.).

2 Energiamurros ja muuttuva sähköjärjestelmä

Energiamurros kuvaa merkittävää ja laaja-alaista muutosta energiasektorilla, jossa perinteiset fossiiliset polttoaineet korvataan uusiutuvilla energianlähteillä. Muutos ei ole pelkästään rakenteellinen, vaan siihen liittyy myös taloudellisia, poliittisia ja sosiaalisia ulottuvuuksia, jotka vaikuttavat koko energiasektoriin. Energiamurroksen taustalla ovat ilmastomuutoksen hillintä, kansainväliset päästövähennystavoitteet sekä teknologinen kehitys, jotka yhdessä ohjaavat energiajärjestelmää kohti hiilineutraalia tulevaisuutta. Keskeisiä ilmiöitä ovat uusiutuvien energialähteiden laajempi hyödyntäminen, siirtyminen keskitetystä tuotannosta hajautettuun energiantuotantoon, energiatehokkuuden parantaminen sekä älykkäiden sähköverkkojen kehittäminen.

Hajautetun tuotannon ja kuluttajakäyttäytymisen muutoksen myötä jakeluverkosta on muodostumassa kaksisuuntainen. Sähköä ei ainoastaan siirretä käyttöpaikoille, vaan verkkoon syötetään yhä enemmän tehoa aurinkopaneeleista, akkujärjestelmistä ja muista hajautetuista tuotantolähteistä. Tämä muutos edellyttää toimivia tehonhallintamenetelmiä, älykkäitä sähköverkkoja ja automaatiota, jotta jakeluverkko kykenee vastaamaan toimintaympäristön muutoksiin.

Sähkön kulutus on kasvanut tasaisesti ja ennustettavasti yhteiskunnan sähköistyessä, mutta energiamurroksen myötä tulevaa kehitystä ei voida arvioida aiempien trendien pohjalta. Tulevaisuudessa sähköverkon kuormitus tulee kasvamaan liikenteen, teollisuuden ja lämmityksen sähköistyessä. Sähköautojen ja sähkölämmitysjärjestelmien lisääntyminen kasvattavat kulutusta erityisesti lyhyillä ajanjaksoilla. Näiden kuormien ajoittuminen ei ole satunnaista, vaan voimakkaasti sidoksissa ulkoisiin tekijöihin, kuten vuorokauden aikaan, sähkön markkinahintaan ja ulkolämpötilaan.

Kuluttajien sähkönkäyttöä ohjaavat useammin taloudelliset kannustimet, kuten tuntiperusteinen hinnoittelu ja automaattiset ohjausjärjestelmät. Yksittäisen kuluttajan näkökulmasta sähkönkulutuksen ajoittaminen edullisimmille hetkille on rationaalista, mutta jakeluverkkotasolla tämä voi johtaa kuormien keskittymiseen yksittäisille tunneille. Kun

suuri joukko kuluttajia reagoi samanaikaisesti samoihin hintasignaaleihin, hetkellinen huipputeho voi kasvaa merkittävästi sekä liittymä- että jakelumuuntajatasolla.

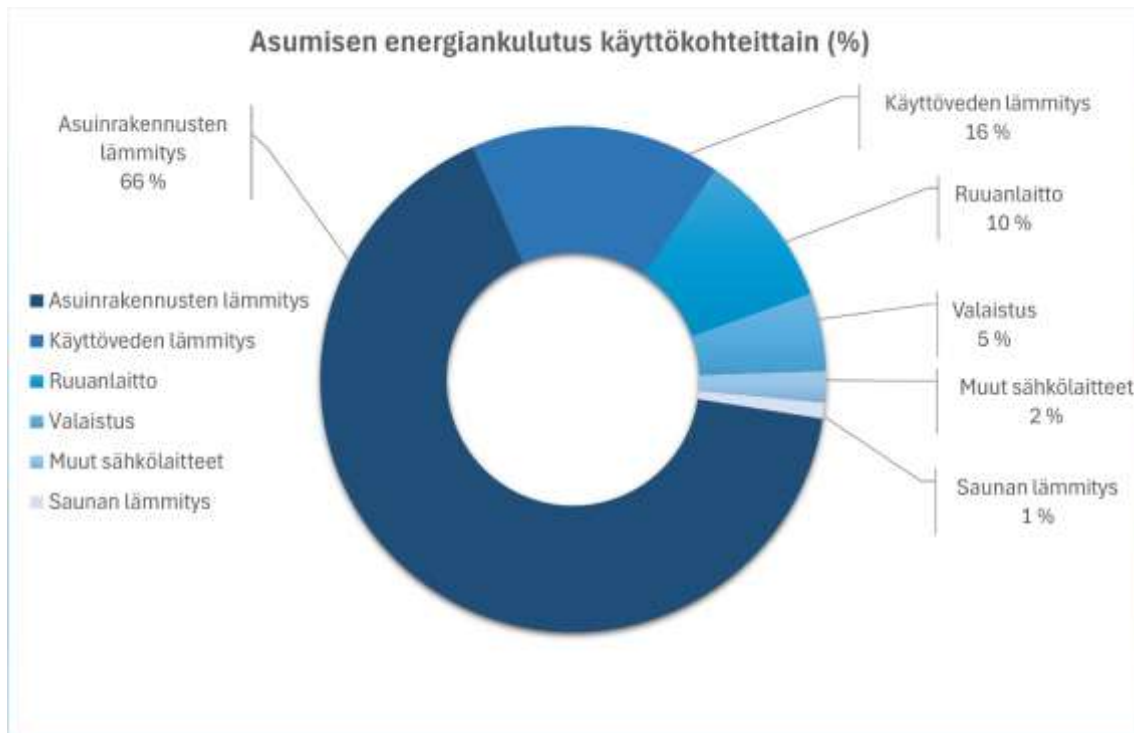
Tämä kokonaisvaltainen muutos muokkaa energiasektoria perusteellisesti ja luo uusia vaatimuksia niin jakeluverkoille kuin myös sähkömarkkinalle, jotta järjestelmä kykenee vastaamaan kasvavaan ja muuttuvaan tehontarpeeseen.

2.1 Energiamurroksen ilmiöt

Tässä alaluvussa käsitellään energiamurroksen ilmiöitä, joita ovat liikenteen ja lämmitysratkaisujen sähköistyminen sekä pientuotannon kasvu. Nämä ilmiöt ovat viime vuosina voimistuneet ja näkyvät pientalojen kulutusprofiilien sekä energiankäytön muutoksina. Muutosten seurauksena jakeluverkkoon kohdistuu uudenlaisia kuormituspiikkejä, joiden ymmärtäminen on välttämätöntä huipputehojen hallinnan ja verkon mitoituksen kannalta. Pientuotanto toimii energiamurroksen sekä mahdollistajana että seurauksena vahvistaen siirtymää kohti hajautetumpaa, joustavampaa ja kuluttajalähtoisempää sähköjärjestelmää.

2.1.1 Lämmitysjärjestelmien kehitys

Rakennusten lämmitys muodostaa suurimman osan asumisen energiankulutuksesta, mikä tekee siitä merkittävän tekijän huipputehon muodostumisessa. Tilastokeskuksen (2024) mukaan rakennusten sisätilojen ja käyttöveden lämmitys kattaa noin kaksi kolmannesta asumisen kokonaisenergiankulutuksesta. Kuvassa 2 esitetään asumisen energiankulutus käyttökohteittain.



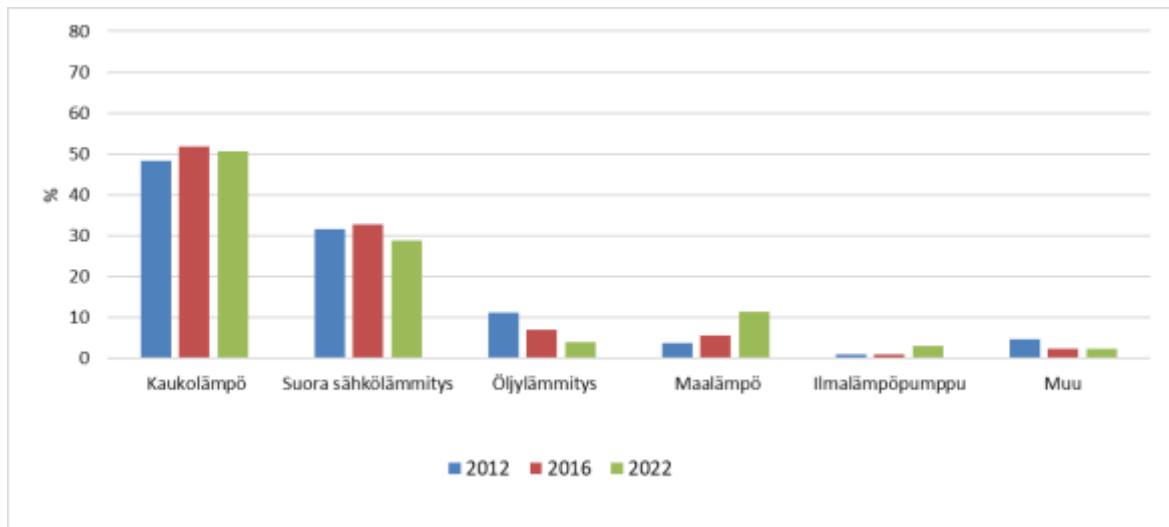
Kuva 2. Asumisen energiankulutus käyttökohteittain (Tilastokeskus, 2024, muokattu).

Lämmitysjärjestelmät ovat kehittyneet viime vuosikymmenten aikana ja perinteisten ratkaisujen, kuten puu-, öljy- ja kaukolämmön rinnalle on noussut yhä enemmän sähköisiä lämmitysmuotoja, jotka tarjoavat energiatehokkuutta ja joustavuutta. Sähkölämmitys on nykyään yleisin lämmitysmuoto suomalaisissa pientaloissa.

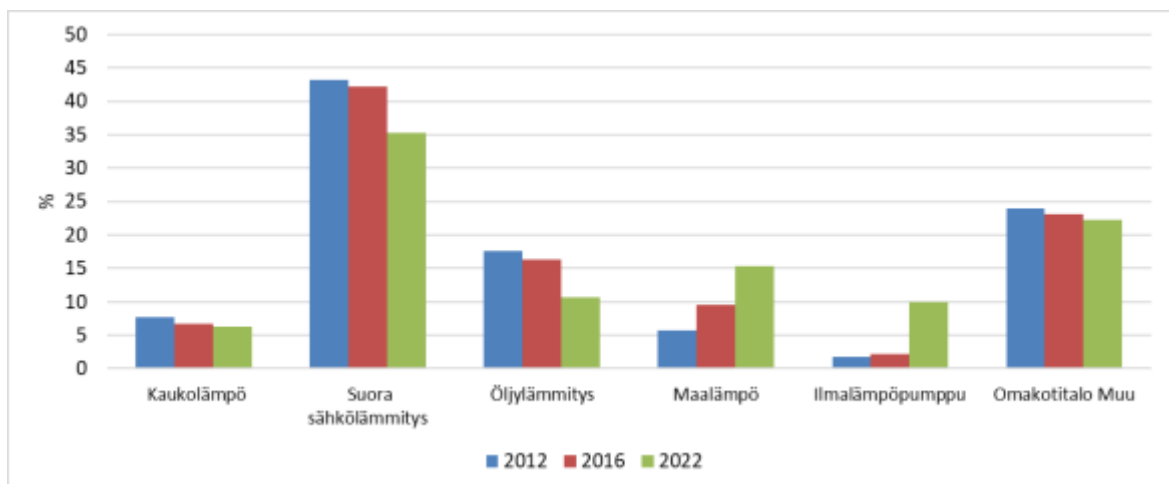
Rakennusten sähköiset lämmitysmuodot voidaan eritellä suorasähkölämmitykseen ja sähköä hyödyntäviin lämpöpumppuratkaisuihin. Erityisesti lämpöpumppujen kohdalla kehitys on ollut nopeaa, ja niiden käyttö on yleistynyt huomattavasti viime vuosina energiatehokkuusvaatimusten sekä fossiilisiin polttoaineisiin perustuvien lämmitysmuotojen vähentyessä. Tilastokeskuksen (2024) kulutustutkimuksen mukaan maa- ja ilmalämpöpumput ovat yleistyneet pääasiallisena lämmitystapana kaikissa talotyypeissä, etenkin omakotitaloissa ja muissa pientaloissa. Lämpöpumput ovat pääasiallisena lämmitystapana noin 25–30 % pientaloista. Suorasähkölämmityksen osuus pääasiallisena lämmitystapana on vastaavasti noin 25–35 %.

Lämpöpumput tarjoavat energiatehokkaan vaihtoehdon perinteisille lämmitysmuodoille ja ovat siten keskeinen osa rakennuskannan sähköistymistä ja osana energiamurrosta (Motiva n.d.-f).

Kuvissa 3 ja 4 esitetään pientalojen pääasialliset lämmitystavat vuosina 2012, 2016 ja 2022.



Kuva 3. Rivi- ja paritalon ensisijaiset lämmitystavat vuosina 2012, 2016 ja 2022 (Tilastokeskus, 2024, muokattu).



Kuva 4. Omakotitalojen pääasiallinen lämmitystapa vuosina 2012, 2016 ja 2022 (Tilastokeskus, 2024, muokattu).

Kuvista 3 ja 4 voidaan nähdä, että fossiilisen polttoaineen käyttö lämmityksessä on odotetusti vähentynyt vuodesta 2012. Merkittävin kasvu on ilmalämpöpumpuissa ja maalämmön käytössä. Suoran sähkölämmityksen osuus pientaloissa on hieman pienentynyt vuodesta 2012, mikä johtuu pääasiassa energiatehokkaampien ja kustannustehokkaampien lämpöpumppuratkaisujen yleistymisestä.

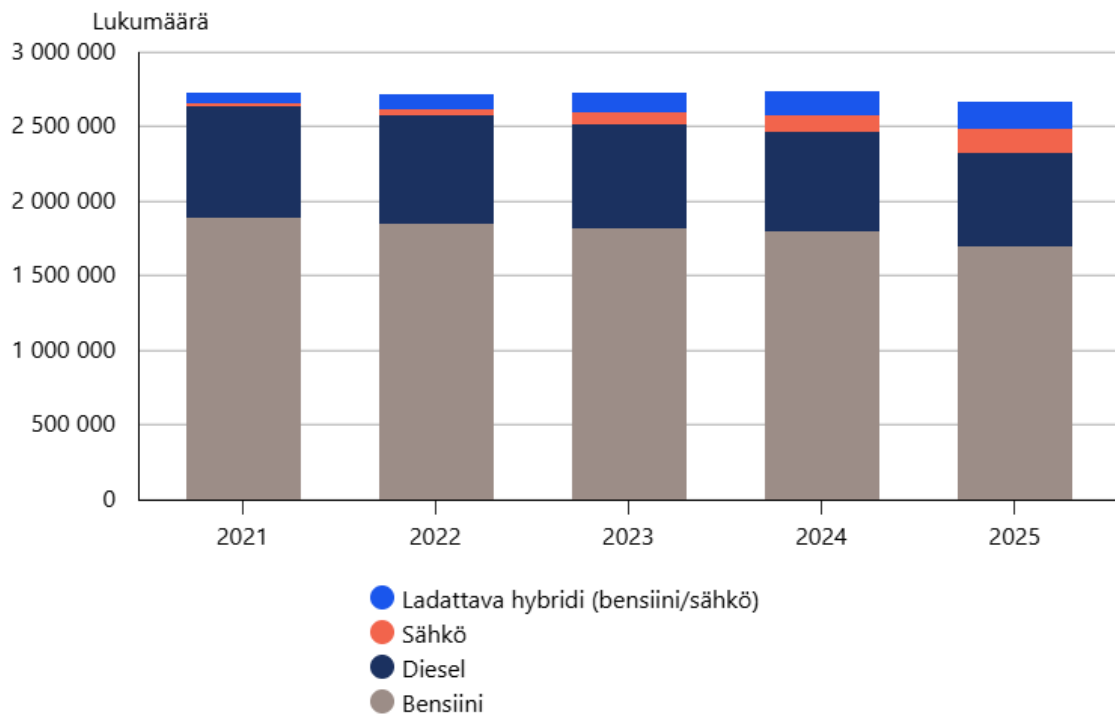
Kiristyneet energiatehovaatimukset ohjaavat rakennusten lämmitysjärjestelmien suunnittelua. Vaatimukseen vastatakseen on kahden tai useamman energiamuodon yhdistelmä eli niin sanottu hybridilämmitys on erityisesti nousussa. Hybridilämmitysjärjestelmät mahdollistavat energiatehokkaan ja joustavan lämmöntuotannon, jossa hyödynnetään eri energiamuotojen vahvuuksia. Yleisin hybridilämmitysmalli pientaloissa on sähkön, puun ja ilmalämpöpumpun yhdistelmä (Numminen et al., 2023). Myös yhdistelmät kaukolämpö ja maalämpö tai kaukolämpö ja poistoilman lämmöntalteenotto ovat kasvattaneet suosiotaan. Hybridilämmitys parantaa huoltovarmuutta, lisää sopeutumiskykyä vaihteleviin sääolosuhteisiin ja energiamarkkinoiden muutoksiin sekä tarjoaa taloudellisesti ja ekologisesti kestävä vaihtoehtoon perinteisille lämmitysmuodoille (Lämmitysenergia Yhdistys Ry, 2024).

Sähköä hyödyntävien lämmitysjärjestelmien merkityksen arvioidaan kasvavan edelleen tulevaisuudessa, kun uudisrakentamisessa ja vanhojen rakennusten lämmitysjärjestelmäsaneerauksissa painotetaan energiatehokkaita sähköisiä ratkaisuja. Nykyisellä kasvuvauhdilla kansainvälisten arvioiden mukaan lämpöpumppujen osuus voi lähes kaksinkertaistua vuoteen 2030 mennessä (IEA, 2023a). Samanaikaisesti suorasähkölämmityksen osuus pientaloissa on laskenut (Tilastokeskus, 2024). Tästä huolimatta ei voida olettaa, että suorasähkölämmityksen poistuvan kokonaan, sillä se on edelleen merkittävä valinta osassa uudesta rakennuskannasta (STT Info, 2022).

2.1.2 Liikenteen sähköistyminen

Sähköautot ovat keskeinen osa energiamurrosta, sillä liikenteen sähköistyminen vähentää fossiilisten polttoaineiden käyttöä ja tukee hiilineutraalisuustavoitteita. Liikenteen sähköistyminen on kasvanut Suomessa nopeasti viime vuosina ja kasvu tulee jatkumaan tulevaisuudessa. Vuoden 2025 kolmannella neljänneksellä (Q3/2025) liikennekäytössä olevista henkilöautoista ladattavia hybridejä oli noin 184 000 ja täyssähköisiä 154 000 (Traficom, 2025). Kuvassa 5 esitetään liikennekäytössä olevat henkilöautot käyttövoimittain vuosina 2021–2025.

Liikennekäytössä olevat henkilöautot käyttövoimittain 2021-2025



Kuva 5. Liikennekäytössä olevat henkilöautot käyttövoimittain vuosina 2021–2025 (Tilastokeskus, 2025).

Kuvasta voidaan havaita, että Suomen henkilöautokanta muuttuu asteittain kohti ladattavia ajoneuvoja. Vaikka bensiini- ja dieselautot muodostavat yhä selvästi suurimman osan kannasta, niiden suhteellinen osuus pienenee vuosittain. Liikennekäytössä olevien

ladattavien henkilöautojen yhteenlaskettu osuus oli 10 %, eli joka kymmenes henkilöauto Manner-Suomen liikenteessä on ladattava. Täyssähköautojen määrä kasvaa nyt nopeimmin ohittaen hybridit vuoden 2026 lopulla. Autoalan tiedotuskeskuksen (2024) arvion mukaan Suomessa tullaan seuraamaan Norjan trendiä sähköautojen yleistymisessä, missä sähköautojen osuus on tällä hetkellä noin 90 %. Arvion mukaan Suomi ylittäisi yli 90 % sähköautojen osuuden vuonna 2035.

2.1.3 Pientuotannon kasvu

Pientuotannolla tarkoitetaan sähkönkäyttöpaikan yhteyteen kytkettyä tuotantolaitetta, jonka ensisijaisena tarkoituksena on tuottaa sähköä kulutuskohteeseen. Pientuotannossa sähköä tuotetaan yleisimmin aurinkoenergialla ja pientuulivoimalla, mutta on myös muita tuotantotapoja, kuten pienvesivoima, sähkön ja lämmön yhteistuotanto (engl. Combined Heat and Power) ja biokaasu (Motiva, 2025a). Pientuotannon yleisyys on kasvanut nopeasti lähivuosien aikana, erityisesti aurinkosähkön osalta. Aurinkosähköjärjestelmien suosion nousuun on vaikuttanut kustannusten aleneminen, teknologioiden kehitys ja kuluttajien kasvava kiinnostus. Pientalojen osalta tuotanto painottuu lähes kokonaan aurinkosähköön, ja pientaloihin soveltuvat tuulivoimalat ovat harvinaisia muun muassa niiden sijoitusvaatimusten, korkeamman kustannusten sekä aurinkosähköjärjestelmää heikomman hyötysuhteen vuoksi.

Pientalojen aurinkosähköjärjestelmien käyttöönotto on ollut Suomessa viime vuosina selvässä kasvussa, ja erityisesti vuonna 2023 esiintyi voimakas asennusmäärän nousu. Energiaviraston (2025a) arvion mukaan noin 30 000 taloon asennettiin aurinkosähkölaitteisto kyseisen vuoden aikana. Vuonna 2024 kasvu kuitenkin hidastui, ja aurinkosähköjärjestelmiä asennettiin alle 10 000 pientaloon. Vaikka vuosittaisten asennusten määrä muuttui näiden kahden vuoden välillä, aurinkosähköjärjestelmien asentamista pientaloihin on tapahtunut myös tämän ajanjakson jälkeen. Tulevaisuuden kehitykseen vaikuttavia tekijöitä ovat muun muassa aurinkosähköjärjestelmien kustannustaso sekä älykkään ohjauksen yleistyminen, energiayhteisöjen muodostuminen sekä kuluttajien roolin laajeneminen aktiiviksi energiantuottajiksi.

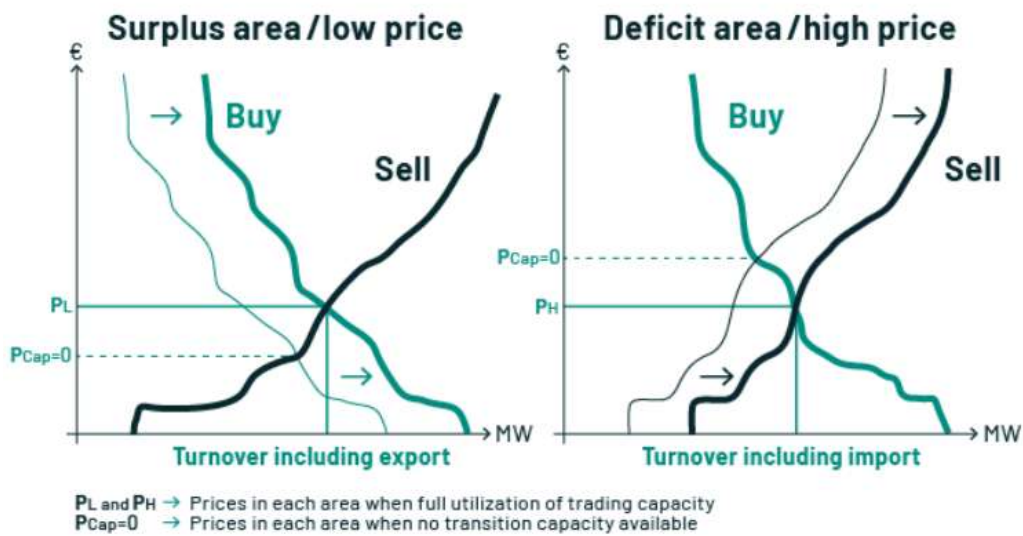
2.2 Suomen sähkömarkkinan kehitys

Suomi on osa pohjoismaiden sähkömarkkinaa, joissa kauppaa käydään yhteisellä Nord-Pool markkina-alustalla. Viime vuosien aikana Suomen sähkömarkkina on muuttunut merkittävästi tuotantorakenteen siirtyessä kohti uusiutuvia ja sääriippuvaisia energialähteitä, mikä on lisännyt sekä hintavaihtelua että joustotarvetta. Samalla markkinoiden siirtyminen tuntikohtaisesta hinnoittelusta varttitaseeseen on lisännyt hinnanmuodostuksen tarkkuutta ja korostanut teknologioita, jotka voivat reagoida nopeasti markkinasignaaleihin. Tällaisia ovat esimerkiksi sähkökattilat, jotka vaikuttavat sekä kulutusjoustoon että hintatasoon.

Myös sähkösopimusrakenteessa on tapahtunut muutoksia. Kuluttajien kiinnostus pörsisähkösopimukseen ja kulutusvaikutuksellisiin tuotteisiin on kasvanut samaan aikaan, kun kiinteähintaisten sopimusten osuus on pienentynyt. Tämä voisi osoittaa kuluttajien kiinnostusta hyödyntää spot-markkinan tarjoamia taloudellisia etuja sekä osallistua aktiivisesti kulutusjoustoon osana muuttuvaa sähköjärjestelmää.

2.2.1 Spot-hinnan muodostuminen ja vaihtelu

Suomessa sähkön spot-hinta muodostuu Nord Poolin vuorokausimarkkinalla, jossa markkinaosapuolet eli sähkön tuottajat sekä ostajat jättävät seuraavan vuorokauden jokaiselle tunnille osto- ja myyntitarjoukset. Spot-hinta määräytyy tuntikohtaisen hintojen kysynnän- ja tarjonnankäyrien leikkauspisteessä. Kuvassa 6 esitetään markkinahinnan muodostuminen. Kuvassa vihreä käyrä kuvaa sähkön kysyntää ja musta käyrä tarjontaa.



Kuva 6. Sähkön markkinahinnan muodostuminen kysynnän ja tarjonnan mukaan (Nord Pool, n.d.).

Kysyntä ja tarjonta -markkinarakenteessa hintojen vaihtelu on luonnollinen ilmiö, mutta viime vuosina hinnan vaihtelu on ollut merkittävän voimakasta johtuen erityisesti sääriippuvaisen tuotannon kasvusta ja geopolittisestä tilanteesta. Vuonna 2022 alkaneen energiakriisin jälkeen spot-hinnan äärivaihtelut ovat kasvaneet. Markkinahintoja tarkasteltaessa voidaan havaita, että spot-hinta on noussut ajoittain poikkeuksellisen korkeaksi, ja samalla negatiiviset tunti hinnat yleistyneet. Edellä mainitut muutokset tekevät hinnan arvioinnista aiempaa vaikeampaa, ja hinnan vaihtelu näyttäisi muodostuvan pysyväksi osaksi sähkömarkkinoiden toimintaa.

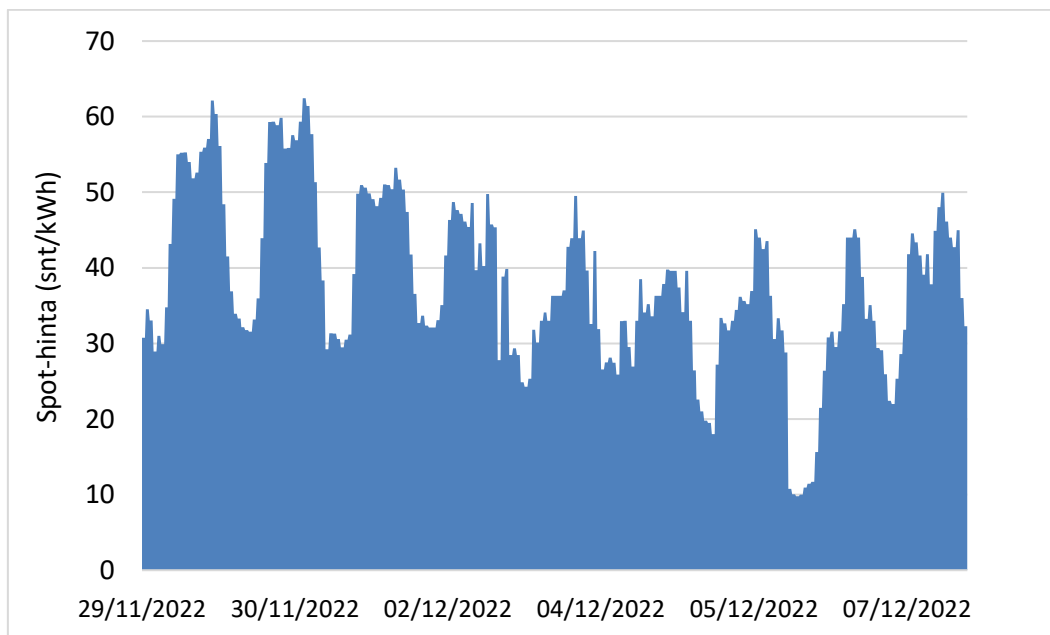
Hinnanvaihtelua voidaan tarkastella lyhyen ja pitkän aikavälin tasolla. Lyhyen aikavälin vaihtelu, kuten yksittäiset tunti- tai vuorokausikohtaiset vaihtelut, aiheutuu pääasiassa hetkellisistä muutoksista tuotannossa ja kulutuksessa. Näihin muutoksiin reagoiminen on usein rajallista, koska kulutuksen siirtäminen ei ole kaikissa tapauksissa mahdollista lyhyellä aikavälillä.

Lyhyen aikavälin vaihtelu johtuu erityisesti sääriippuvaisesta tuotannosta. Tuuli- ja aurinkovoiman sähköntuotanto voi muuttua nopeasti, ja niiden tuottama energian määrä vaikuttaa suoraan tarjontaan ja siten markkinahintaan. Vesivoimalla on nopea säätökyky, minkä vuoksi tuotantoa voidaan muuttaa nopeasti kulutuksen ja muun sähköntuotannon vaihteluiden mukaan, mikä vaikuttaa sähkön hintaan lyhyellä aikavälillä. Lisäksi kulutus vaihtelee vuorokauden aikana merkittävästi. Ruuhka-ajat eli aamu ja iltapäivän kulutuspiikit nostavat hintoja, kun taas yöllä hinnat ovat tyypillisesti matalampia. Hintarakenne, jossa esiintyy selkeät erot yö- ja päiväajan hinnoissa saattaa kuitenkin tulevaisuudessa muuttua automaation lisääntyessä, sillä silloin kuluttajan ei tarvitse olla mekaanisesti kytkemässä laitteita päälle, vaan automaatio tekee sen asiakkaan puolesta hintaohjauksen perusteella.

Pitkän aikavälin hinnanvaihtelut syntyvät hitaammin, ja ne heijastavat markkinan rakenteellisia tekijöitä. Polttoaineiden hinnat, päästöoikeuksien hinnat, vesivoiman varastotilanne, siirtokapasiteetin muutokset sekä tuotantokapasiteetin lisäykset tai poistumat vaikuttavat pidemmällä aikavälillä yleiseen hintatasoon. Kylmät talvikaudet, pitkät heikokuuliset jaksot tai polttoainemarkkinoiden häiriöt voivat nostaa keskimääräistä hintatasoa viikkojen tai jopa kuukausien ajaksi. Vastaavasti runsas tuuli- ja vesivoimatilanne voi laskea hintatasoa pitkäksi aikaa. Spot-hinnan lyhyen ja pitkän aikavälin vaihtelut yhdessä muodostavat markkinan volatiliteetin.

Energiaviraston (2025c) mukaan siitä huolimatta, että hinnan vaihtelu on voimakasta, korkeat tuntihinnat ovat yleensä lyhytkestoisia. Markkinoilla on nähtävissä jaksoja, joissa spot-hinta pysyy pidempään matalalla tasolla, jotka mahdollistavat sähkönkulutuksen siirtämisen useammalle tunnille yksittäisen edullisen tunnin sijaan. Käytännössä sähkölaitteiden ohjaus reagoi kuitenkin usein heti hinnan laskiessa, jolloin useita kuormia kytkeytyy samanaikaisesti päälle. Tämä voi johtaa kulutuksen ajalliseen kasaantumiseen, vaikka kuorma olisi mahdollista jakaa tasaisemmin koko edullisen hintajakson ajalle. Kuvassa 7 esitetään spot-hinnan kehitys tarkastelujaksolla 29.11.–7.12.2022. Hinta vaihteli

9,78–62,44 snt/kWh välillä, mikä kuvastaa huomattavaa hinnanvaihtelua. Tätä markkinahinnan tasoa voidaan pitää suhteellisen korkeana, sillä koko joulukuun keskiarvohinta oli 26,6 snt/kWh ja aina 5.12. asti se pysyi suurimman osan ajasta tämän arvon yläpuolella. Ennen 6.12 spot-hinta alitti kuukausikeskiarvon vain neljänä vuorokautena, silloinkin lyhytaikaisesti noin 2–6 tunnin ajan. Merkittävin hinnanmuutos tapahtui itsenäisyyspäivän yönä 6.12., jolloin spot-hinta laski nopeasti 28,8 snt/kWh tasolta 9,78 snt/kWh tasolle.



Kuva 7. Spot-hinnan vaihtelu 29.11.–7.12.2022 (Pörssisähkö.net, n.d., muokattu).

Korkean hintajakson jälkeen tapahtuva voimakas hinnanlasku kannustaa pörssisähkösovimusasiakkaita ajoittamaan sähkönkäyttönsä edullisimmille tunneille. Pitkittynyt korkea hintataso voi johtaa siihen, että kuluttajat lykkäävät kulutustaan odottaen edullisempaa hintaa, mikä voi aiheuttaa kulutuksen nopean purkautumisen heti hinnan laskiessa. Jakeluverkon näkökulmasta tämä on haasteellista, sillä kulutus kohdistuu automaation myötä helposti samoille tunneille aiheuttaen hetkellisiä tehopiikkejä verkkoon.

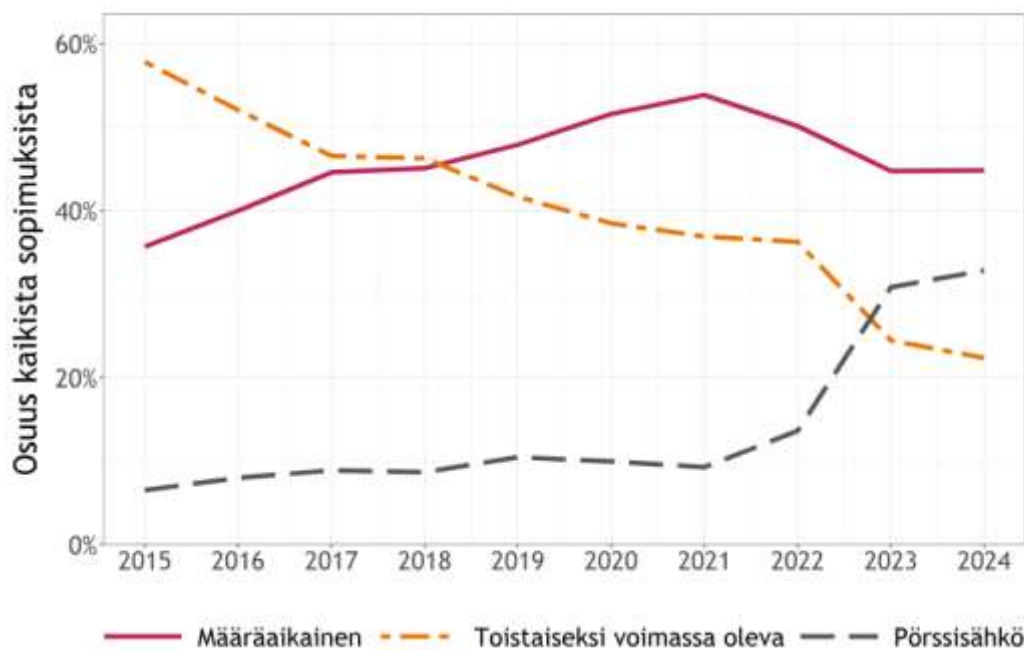
Markkinahinnan vaihtelevuus tarjoaa pörssisähkösopimusasiakkaille taloudellisen mahdollisuuden hyödyntää omaa kulutusjoustoja. Haakanan et al. (2024) mukaan ennen energiakriisiä joustavuuden taloudellinen hyöty oli tyypillisesti muutamia euroja kuukaudessa, mutta vuoden 2022 energiakriisin jälkeen jouston vaikutus on voinut nousta jopa yli 10 euroon kuukaudessa. Tämä kehitys on lisännyt kannustimia ajoittaa sähkönkulutusta hintasignaalien perusteella.

Spot-hinnan vaihtelulla on myös havaittu olevan selkeä vaikutus sähkönkulutuksen ajoittumiseen. Talvikaudella 2023–2024 kuluttajat reagoivat voimakkaasti tunti- ja vuorokausikohtaisiin hintasignaaleihin. Korkeiden hintojen aikoina kokonaiskulutus väheni parhaimmillaan jopa yli 5 %, kun taas negatiivisten tuntihintojen aikana kulutus kasvoi noin 10 % (Haakana, et al. 2024). Sähkönkäyttö on muuttunut yhä enemmän joustavampaan suuntaan, jossa aktiiviset sähkönkäyttäjät säätävät omaa kulutustaan sähkön hinnan mukaan ottaen merkittävämmän roolin osana joustavaa sähköjärjestelmää.

Tutkimusten ja markkinaennusteiden perusteella pitkän ajanjakson ajalla spot-hinnan pysyminen matalalla ei ole todennäköinen skenaario. Ennusteet indikoivat hinnan voimakasta vaihtelua, matalien ja korkeiden hintajaksojen vuorottelua ja negatiivisia hintoja, mutta ei pysyvä matalaa markkinahintaa. Tämä vahvistaa sen, että hintavaihtelu on pysyvä osa sähkömarkkinoiden toimintaa ja kuluttajien merkitys kysyntäjoustossa kasvaa edelleen.

2.2.2 Sähkösopimustyyppien kehitys

Suomessa pienkuluttajille on tarjolla useita erilaisia sähkösopimuksia, joista yleisempiä ovat määräaikaisten kiinteähintaiset sopimukset, toistaiseksi voimassa olevat kiinteähintaiset sopimukset ja toistaiseksi voimassa olevat pörssisähkösopimukset.



Kuva 8. Sähkösopimustyyppien osuudet kaikista sopimuksista ja kehitys ajanjaksolla 2021–2024 (Energiavirasto, 2025b).

Sopimustyyppien kehitys (kuva 8) osoittaa, että kiinteähintaisten sopimusten suosio on ollut laskussa, mikä johtuu ennen kaikkea niiden korkeasta keskihinnasta. Vuonna 2024 kiinteähintaisten osuus oli noin 26 % kaikista sopimuksista. Samalla määräaikaisten sopimusten kokonaisosuus on laskenut arviolta noin 50 % tasolta 38 % tasolle. Kulutusvaihtokellisten määräaikaisten sopimusten suosio on kasvanut vuodessa 0 % tasolta 6 % tasolle. Pörssisähkösopimukset ovat kasvattaneet suosiotaan ja niiden osuus kiinnitettyjen sopimusmallien kanssa on yhteensä jo 31 % (Energiateollisuus ry, 2024).

Markkinakehityksen perusteella pörssisähkösopimusten suosio tuskin tulee merkittävästi laskemaan tulevaisuudessa, sillä kuluttajat ovat yhä enemmän tietoisempia pörssisähkösopimuksen tarjoamasta säästömahdollisuuksista ja kulutuksen ajoittamisen tuomasta hyödystä. On jo nähtävissä, että pörssisähkön tuoma pitkän aikavälin kustannusetu houkuttelee asiakkaita, ja monet sähkönmyyntiyhtiöt raportoivat edelleen kasvavaa kiinnostusta joko täysin vaihtuvahintaisiin pörssisopimuksiin tai hybridituotteisiin.

Talvikausina korkeat spot-hinnat kuitenkin lisäävät kiinteähintaisten sopimusten kysyntää, ja osa kuluttajista siirtyy talvikuukausiksi määräaikaisiin kiinteähintaisiin vaihtoehtoihin riskin hallitsemiseksi (Verkkouutiset, 2026).

Sopimuskehitys viittaa siihen, että pörssisähkön suosio säilyy pitkällä aikavälillä, vaikka kuluttajat tasapainottavat valintojaan vuodenajan mukaan. Lisäksi tämä kehitys osoittaa, että kuluttajat haluavat aktiivisesti vaikuttaa omaan sähkölukutukseen ja siihen liittyviin kustannuksiin, mikä vahvistaa jouston roolia.

2.3 Energiamurroksen seurauksena kehittyneet ratkaisut

Tässä luvussa esitetään energiamurroksen ilmiöiden seurauksena kehittyneitä ratkaisuja, kuten kotiautomaatiojärjestelmät ja kotiakut, jotka mahdollistavat joustavamman ja tehokkaamman sähkönkäytön. Sähkökattilat puolestaan tarjoavat joustoa ja voivat osallistua tukea sähköjärjestelmän tasapainoa.

Automaatiojärjestelmät ja kehittynyt akkuteknologia sekä kulutuksen ohjautuminen yhä enemmän hintasignaalien perusteella muokkaavat sähkönkäytön ajoittumista. Nämä vaikuttavat siihen, milloin sähkönkulutus tapahtuu ja kuinka kuormitus kasautuu eri ajan-kohtiin, mikä puolestaan vaikuttaa huipputehon muodostumiseen.

2.3.1 Kotiautomaatiojärjestelmät

Energiamurroksen muokatessa sähköjärjestelmän rakennetta sen toiminnalta edellytetään entistä enemmän joustavuutta. Kotiautomaatio tarjoaa keinon, jonka avulla kulutusta voidaan ohjata tuotannon vaihtelun mukaan, jolloin kotitaloudet toimivat aktiivisena osana järjestelmän tasapainoa.

Älykkäiden kotiautomaatiotoimintojen keskeisenä tarkoituksena on tehostaa energiankäyttöä, parantaa asumismukavuutta ja tarjota mahdollisuus ohjata kulutusta ilman, että kuluttajan tarvitsee tehdä jatkuvia manuaalisia toimenpiteitä. Järjestelmät yhdistävät mittaus-, ohjaus- ja viestintätoiminnot, joiden avulla rakennusten energiankulutusta voidaan säätää ulkoisten ja sisäisten muuttujien perusteella. Näitä muuttujia ovat muun muassa sähkön markkinahinta, ulkolämpötila ja käyttäjän henkilökohtaiset mieltymykset (Motiva, 2024).

Kaupalliset kotiautomaatioratkaisut ovat yleistyneet nopeasti, ja markkinoilla on tarjolla sekä energiayhtiöiden omia ohjauspalveluita että laitevalmistajien älykotijärjestelmiä. Järjestelmien yleistymistä haastaa laitteiden yhteensopivuus. Suuren tehon kotitalouslaitteita, kuten lämminvesivaraajia ja sähköautojen latausasemia voidaan säätää niiden omilla älytoiminnoilla, mutta niitä ei välttämättä voida ohjata yhtenäisen automaation kautta. Jotta kotiautomaatio toimisi tehokkaasti, sen tulee olla yhteensopiva erilaisten laitevalmistajien ohjausjärjestelmien kanssa, ja sen käyttöönoton taloudellisen hyödyn tulee olla käyttäjälle riittävä. Tulevaisuudessa voidaan olettaa järjestelmien yleistyvän, sillä ne tarjoavat kotitalouksille helpon tavan hyödyntää kulutusjoustoa ja pienentää energiakustannuksia.

2.3.2 Kotiakut

Lähivuosina kotitalouksiin asennettavien sähkövarastojen eli niin sanottujen kotiakkujen kysyntä on kasvanut myös Suomessa. Tyypillisesti kotiakut liitetään osaksi aurinkosähköjärjestelmään tai ostetaan valmis paketti, johon kuuluu paneelit, invertteri ja itse akku. Sähkövaraston hyöty saadaan, kun sitä ladataan sähkön markkinahinnan ollessa edullista ja käyttämällä ladattua energiaa, kun hinta on korkea. Akkujärjestelmien avulla kotitaloudet voivat osallistua kulutusjoustoön, pienentää huipputehoja, varastoida omaa pientuotantoa myöhempää käyttöä varten tai käyttää akkua varaenergiälähteenä jakeluhäiriöiden aikana.

Verkosta ja aurinkopaneeleista sähköä lataavia kotiakkuja ei ole pidetty tähän mennessä taloudellisesti kannattavana investointina Suomessa. Epävarmuutta lisäävät sekä sähkön spot-hinnan voimakas vaihtelu, että laitehintojen kehityksen vaikea ennustettavuus. Tällä hetkellä 5–10 kWh:n kotiakun kustannukset asennuksineen on tyypillisesti 7 000–10 000 €. Hintojen kuitenkin uskotaan laskevan tulevaisuudessa, kun vanhojen sähköautojen akkuja voidaan tarjota sähkövarastoiksi kotitalouksiin. Kotiakuilla voidaan osallistua aggregaatin kautta reservimarkkinoille, jolloin akuston tarjoamasta kapasiteetista maksetaan kotitaloudelle kompensatiota. Reservimarkkinoille osallistuminen voi parantaa kotiakkujen taloudellista kannattavuutta, mutta nykyarvion mukaan se ei useinkaan riitä takaamaan kotitalouksille selkeää taloudellista voittoa (Jaakkola, 2024). Kotiakkujen tulevaisuuden kehitykseen vaikuttavat vahvasti akkuteknologian kehitys, laitteiden hintataso sekä sähkömarkkinoiden rakenteelliset tekijät.

2.3.3 Sähkökattilat

Sähkökattilat kykenevät reagoimaan nopeasti sähkömarkkinoiden kysynnän ja tarjonnan vaihteluihin, minkä ansiosta ne voivat hyödyntää edulliset sähkön tunnit ja ylituotantotilanteet sähköverkossa. Sähkökattiloiden tuottama lämpö pystytään varastoimaan lämpövarastoihin, mikä lisää energiajärjestelmän joustavuutta ja mahdollistaa kulutuksen tasaamisen eri ajanjaksojen välillä. Kattiloiden avulla voidaan tasata verkon huippukuormia ja vähentää fossiilisten lämmöntuotantomuotojen tarvetta (Fingrid, 2025).

Kattilat toimivat joustavana kysyntäresurssina lisäämällä sähkön kysyntää alhaisen hinnan jaksoilla ja vähentämällä korkean hinnan hetkillä. Tämä pienentää hintapiikkien voimakkuutta lyhyellä aikavälillä. Pitkällä aikavälillä sähkökattilakapasiteetin kasvu voi kuitenkin nostaa keskimääräistä hintatasoa, mikäli kokonaiskysyntä lisääntyy, mutta tuotantokapasiteetti ei kasva vastaavasti (Säämäki et al., 2025). Lämmön tuotannon sähköistyessä sähkökattiloiden määrän voidaan arvioida kasvavan, mikä lisää joustavan kulutuksen potentiaalia ja kasvattaa sähköverkkoihin kohdistuvaa tehontarvetta.

3 Jakeluverkon mitoitusperiaatteet

Jakeluverkko on sähköverkon osa, jonka tehtävänä on siirtää sähköä loppukäyttäjille, kuten kotitalouksille ja yrityksille. Jakeluverkko koostuu keski- ja pienjänniteverkosta, joissa kj-verkko toimii tyypillisesti jännitetasolla 10–20 kV ja pj-verkko jännitetasolla 0,4 kV. Tässä työssä tarkastelu rajataan pj-verkkoon, sillä pienkuluttajat liittyvät sähköverkkoon pääosin sen kautta. Jakeluverkon suunnittelu tapahtuu pitkälle tulevaisuuteen, sillä verkon keskeisten komponenttien, kuten muuntamoiden tekniset käyttöiät voivat olla jopa 40–50 vuotta (Lakervi & Partanen, 2009).

Pj-verkon mitoituksessa on huomioitava nykyisten kuormitustarpeiden lisäksi pitkän aikavälin muutokset sähkönkulutuksessa ja tuotannossa. Jakeluverkossa siirrettävä teho vaihtelee merkittävästi vuorokaudenajan, viikonpäivän ja vuodenajan mukaan, mikä asettaa haasteita verkon mitoitukselle ja käytölle. Verkon komponentit on mitoitettava kestäämään korkeimmat hetkelliset kuormitukset, vaikka huipputehotilanteet saattavat esiintyä vain harvoin. Tämän seurauksena verkon kapasiteetti jää usein osittain vajaaan käyttöön.

3.1 Jännitteenalenema

Jännitteenalenema on yksi keskeisimmistä jakeluverkon mitoitukseen vaikuttavista tekijöistä, sillä jännitetason vaihtelut vaikuttavat toimitettavan sähkön laatuun. Jännitteenalenemalla tarkoitetaan tilannetta, jossa verkon jännitetaso alenee tilapäisesti nimellisarvoonsa verrattuna (Suomen Standardisoimisliitto SFS Ry, 2022).

Liiallinen jännitteenalenema heikentää sähkön laatua ja aiheuttaa häiriöitä tai vaurioita asiakkaiden laitteille. Pj-verkossa on huomioitava, että kuormituksen kasvu lisää kuormitusvirtaa nopeasti, minkä takia jännitteenalenema voi muodostua merkittäväksi jo lyhyillä kaapelietäisyyksillä (Lakervi & Partanen 2009).

Jännitteenaleneman likiarvo U_h voidaan laskea yhtälöllä

$$U_h = I * R * \cos \varphi + I * X * \sin \varphi, \quad (1)$$

missä U_h on jännitteenalenema, I virta, R verkon resistanssi, X reaktanssi ja vaihekulma φ .

Prosentuaalinen jännitteenalenema $U_h \%$ ilmaisee jännitteenaleneman suhteessa nimellisjännitteeseen prosentteina, ja se saadaan yhtälöllä

$$U_h \% = \frac{U_h}{U_n} * 100, \quad (2)$$

missä U_n on nimellisjännite.

Pienjänniteverkon asiakkaan jännitteen nimellisarvo on 230 V. Suomessa noudatetaan sähkön laatustandardia SFS-EN 50160, jonka mukaan jakelujännitteen vaihteluväli normaalitilassa tulee olla $\pm 10 \%$ sen nimellisarvosta. Tämä tarkoittaa, että jännitteen tulisi olla välillä 207–253 V. Taulukossa 1 esitetään Energiategollisuuden verkostosuosituksen SA 4:22 mukaiset jännitteen vaihtelualueet sekä jännitteenalenemat.

Taulukko 1. Sähkönjakelun jännitteen vaihtelualueet sekä jännitteenaleneman raja-arvot (Energiategollisuus ry, 2022).

Osaverkko	Jännitteen vaihtelualue		Jännitteenalenema		
	Minimi	Maksimi	Korkea laatu	Suunnittelu laatu	Normaali laatu
Keskijänniteverkko	19 kV	22 kV	$\pm 4 \%$	$\pm 4 \%$	$\pm 6 \%$
Pienjännitejakelu	207 V	253 V	$\pm 4 \%$	$\pm 6 \%$	$\pm 10 \%$
Muuntamo ¹⁾	220 V	253 V			1-2 %
Pienjänniterunkoverkko	210 V	253 V		2 %	3-5 %
Liittymisjohto ²⁾	207 V	253 V			1-3 %
Sisäjohtoverkko	198 V	253 V			1-4 %

¹⁾ Jännitetasoa voidaan säätää, jos käytettävissä on väliottokytkin.

²⁾ Liittymisjohto asiakkaan sähköpääkeskuksen pääsulakkeille saakka

Jakeluverkkoyhtiöt kuitenkin soveltavat standardia omissa mitoitusperiaatteissaan siten, että ne vastaavat yhtiön omaa toimintaa ja verkon kehittämistarpeita. Sallittu jännitteenalenema normaalissa kytkentätilanteessa riippuu verkon rakenteesta.

Pienjänniteverkko voidaan toteuttaa joko säteittäisenä tai silmukoituna. Kaupunkialueella verkko on yleensä silmukoitu, mutta sitä käytetään säteittäisesti. Maaseudulla verkko on lähes pelkästään säteittäistä kustannussyistä. Säteittäinen rakenne on yksinkertainen ja kustannustehokas, kun taas silmukoitu rakenne mahdollistaa sähkön siirron useampaa reittiä. Silmukoitu verkkorakenne mahdollistaa varasyötön ja siten parantaa toimitusvarmuutta (Korpinen, 2008).

Vaasan Sähköverkko Oy:n nykytila-analyysin perusteella säteittäisessä verkossa liittyvillä jännitteenaleneman yläraja on tyypillisesti 10 %, kun taas silmukoidussa verkossa vastaava raja-arvo on 7 %. Tiukempi arvo perustuu varasyöttötilanteen huomioimiseen, jolloin mitoituksessa käytetään kerrointa 0,7. Vastaavasti runkojohdoilla säteittäisessä verkossa jännitteenaleneman raja-arvo on 8,7 %, jolloin alin sallittu jännite on 210 V. Silmukoidussa verkossa vastaava raja-arvo on 6,1 %, mikä vastaa 216 V:n alinta jännitettä (Salo, 2026)

3.2 Johtojen mitoitus ja kuormitusaste

Johtimien mitoituksessa on huomioitava niiden kuormitettavuus sekä kustannukset. Kuormitettavuuden on oltava riittävä suhteessa kuormitusvirtaan sekä asennus- ja käyttöolosuhteisiin. Tämän lisäksi mitoituksessa on jätettävä riittävä kapasiteettivara kuormituksen mahdolliselle kasvulle sekä poikkeustilanteille. Mitoituksen tavoitteena on yhdistää siirtokapasiteetti ja kustannustehokkuus siten, että verkko toimii turvallisesti sekä nykyisessä että tulevaisuuden kuormitustilanteissa (Lakervi & Partanen, 2009).

Pienjänniteverkossa runkojohdot siirtävät sähköä jakelumuuntamolta useille liittymille ja muodostavat pääasiallisen siirtoreitin. Tämän vuoksi niiden mitoituksessa on huomiotava useiden kuormien yhteisvaikutus. Liittymisjohdot puolestaan liittävät yksittäisen asiakkaan jakeluverkkoon, ja niiden mitoitus perustuu pääasiassa kyseisen liittymän tarpeisiin.

Johtojen mitoituksessa käytetään kuormitusasteita, joilla varmistetaan verkon käyttövarmuus ja riittävä siirtokapasiteetti poikkeustilanteissa ja erilaisissa asennusolosuhteissa, kuten rinnakkain asennetuissa kaapelissa ja seinälle asennetuissa liittymisjohdoissa. Vaasan Sähköverkon Nykytila-analyysin perusteella silmukoidussa verkossa runkojohtojen sallittu kuormitusaste on 50 %, jotta verkolle jää riittävä kapasiteettia varasyöttötilanteita varten. Säteilteisessä verkossa kuormitusaste voi olla korkeampi, mutta enintään noin 80 %. Liittymätasolla käytetään noin 60 % kuormitusastetta varmuusvaran säilyttämiseksi (Salo, 2026).

3.3 Jakelumuuntajan kuormitettavuus

Jakelumuuntaja on verkon komponentti, joka muuntaa tyypillisen 20 kV:n keskijännitteen 0,4 kV:n pienjännitteeksi. Jakelumuuntajan syöttämä pj-verkko muodostaa muuntopiirin, jonka rakenteeseen ja mitoitukseen vaikuttavat sekä kulutusprofiilit että verkon sijainti.

Jakelumuuntajan mitoituksessa keskeinen tarkasteltava suure on kuormitusaste, joka ilmaisee muuntajan kuormituksen suhteessa sen nimellistehoon. Sallittu kuormitusaste riippuu muun muassa verkon rakenteesta sekä muuntamotyypistä. Jakelumuuntajaa voidaan kuormittaa jonkin verran yli sen nimellisen, mutta ylikuormituksesta aiheutuva lämpö lyhentää muuntamon käyttöikää.

Tässä työssä tarkastelussa huomioidaan pientaloalueille tyypillisten muuntamotyyppien, kuten tiili-, pelti- ja betonikioskimuuntamoiden kuormitusrajat. Yksityiskohtaisempi analyysi kohdistetaan kuitenkin peltikioskimuuntamoihin, sillä tarkasteltava muuntopiiri, johon kaikki skenaariot kohdistuvat, on kyseistä muuntamotyyppiä. Lisäksi peltikioskimuuntamot ovat yleisesti käytössä taajama-alueiden pienjänniteverkossa, minkä vuoksi niiden tarkempi tarkastelu on työn kannalta perusteltua. Peltikioskimuuntamoille sallittu kuormitusaste on normaalikäyttötilanteessa säteittäisessä verkossa 130 % ja silmuroidussa verkossa 91 % (Salo, 2026).

4 Kysyntäjousto jakeluverkossa

Luvussa 2.1 esitetyt energiamurroksen ilmiöt vaikuttavat suoraan jakeluverkon kuormitusprofiileihin ja huipputehoihin. Sähköautojen lataus, sähköinen rakennusten lämmitys ja lämminvesivaraajat ovat suuritehoisia ja helposti ajoitettavia kuormia, minkä vuoksi ne muodostavat merkittävän kysyntäjoustopotentiaalin. Näiden kuormien samanaikaisuus voi kuitenkin kasvattaa pienjänniteverkon hetkellistä tehokuormitusta merkittävästi ja siten vaikuttaa sekä verkon kuormitustilanteeseen että mahdollisiin vahvistustarpeisiin.

Kysyntäjoustolla voidaan vaikuttaa kuormituksen ajoittumiseen ja tätä kautta pienentää huipputehoja tai tasata kuormitusta. Tässä työssä kysyntäjoustoa tarkastellaan erityisesti jakeluverkon kuormituksen hallinnan näkökulmasta kuitenkin huomioiden, että kysyntäjousto toimii myös sähköjärjestelmän tehotasapainon hallinnan välineenä sähkömarkkinoilla.

Jotta jakeluverkon tilaa energiamurroksessa voidaan arvioida, on tarkasteltava joustavien kuormien aiheuttamia verkostovaikutuksia ja niitä ohjauskeinoja, joilla olemassa olevaa tehokapasiteettia voidaan hyödyntää tehokkaammin. Tässä luvussa tarkastellaan kysyntäjouston periaatetta, kuormien joustopotentiaalia, käsitellään kysyntäjouston toteuttamiseen liittyviä haasteita ja joustavien kuormien verkostovaikutuksia jakeluverkon kuormanhallinnan näkökulmasta.

4.1 Kysyntäjouston määritelmä

Kysyntäjoustosta puhuttaessa käytetään usein termejä DSM ja DR. DSM viittaa kysynnän puolen hallintaan muodostaen laajan kokonaisuuden, joka sisältää kulutuksen optimoinnin, energiatehokkuuden ja kuluttajien sähkönkäyttöä ohjaavat toimenpiteet. DR eli kysyntäjousto, josta käytetään joskus myös termiä kulutusjousto, on osa tätä kokonaisuutta,

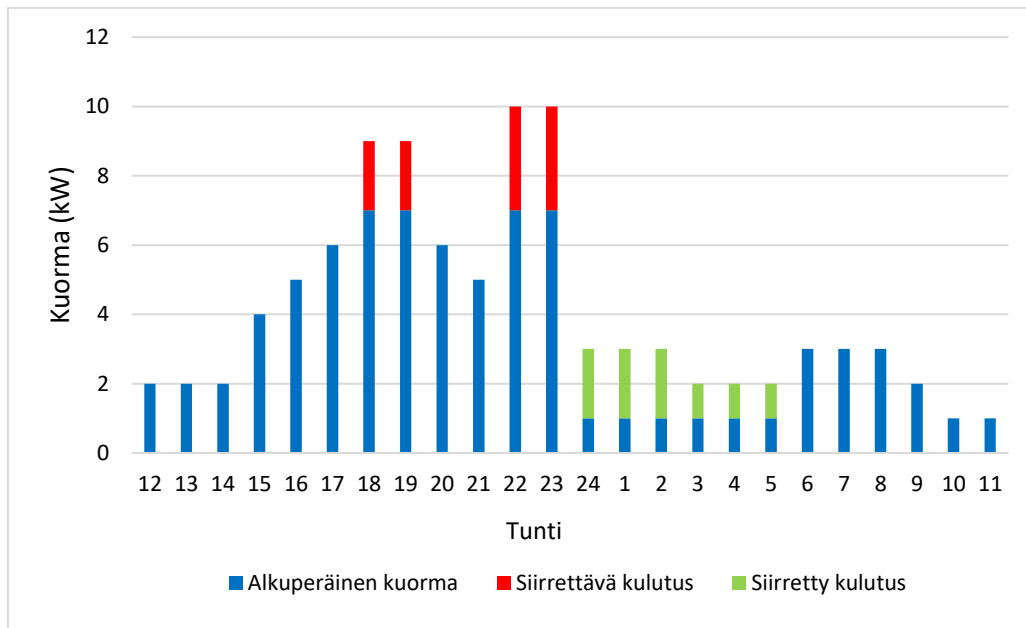
ja sillä tarkoitetaan sähkön kulutuksen siirtämistä ajankohdalta toiselle esimerkiksi sähkön markkinahinnan tai tuotannon mukaan. Kysyntäjouston tarkoituksena on tasapainottaa kysynnän ja tuotannon eroja taajuuden tasapainottamiseksi (IEA, 2023b; IEA, n.d.).

Käsitteenä kysyntäjousto on laaja ja määritelmä on tarkastelunäkökulmasta riippuva. Kysyntäjousto tarvitaan sähköjärjestelmän eri tasoilla eri tavoin, ja sillä on kaksi keskeistä tarkoitusta. Ensimmäinen on järjestelmän tehotasapainon hallinta sähkömarkkinoiden kautta. Sähköjärjestelmässä tuotannon ja kulutuksen on oltava jatkuvassa tasapainossa, sillä niiden välinen epätasapaino aiheuttaa muutoksia verkon taajuuteen. Taajuuden vaihtelut kuvaavat järjestelmän hetkellistä tehotasapainon häiriötä, jota voidaan korjata säätämällä joko tuotantoa tai kulutusta. Tässä yhteydessä kysyntäjousto toimii osana sähköjärjestelmän reservejä ja säätömarkkinoita, joiden avulla ylläpidetään verkon taajuutta ja varmistetaan järjestelmän käyttövarmuus. Sähkömarkkinat voidaan jakaa seuraaviin kategorioihin:

- Energiamarkkinat, joihin kuuluvat vuorokausimarkkinat (day-ahead) ja päivän sisäiset markkinat (intraday).
- Tasapainostusmarkkinat eli säätömarkkinat, joilla korjataan käyttöajankohtana ilmeneviä ennustusvirheitä.
- Reservimarkkinat, joilla ylläpidetään taajuuden vakautta ja palautetaan järjestelmä normaalitilaan reservituotteiden FFR, FCR, aFRR ja MFRR-tuotteiden avulla (Fingrid, n.d.-a).

Day-ahead markkina ja siellä muodostuva spot-hinta ovat keskeisessä roolissa kulutuksen ohjautumisessa, sillä siellä syntyy hintasignaali mikä ohjaa kuluttajien sähkönkulutusta.

Toinen tarkoitus on verkon kuormituksen hallinta, joka on keskeistä jakeluverkon näkökulmasta. Tällöin kysyntäjouaston avulla kulutusta voidaan rajoittaa tai siirtää pois huipputunneilta, siten että verkon siirtokapasiteetti säilyy riittävänä eikä komponenttien ylikuormittumista pääse tapahtumaan. Ylikuormitustilanteita voi syntyä esimerkiksi sähköautojen samanaikaisesta latauksesta tai muusta kuormituksen kasautumisesta. Kuvassa 9 esitetään kysyntäjouaston periaatetta, jossa kuormaa siirretään korkean kulutuksen tunneilta matalan kulutuksen tunneille.



Kuva 9. Periaate kysyntäjoudesta.

Tässä työssä keskitytään day-ahead- markkinoilla muodostuvan spot-hinnan rooliin kulutuksen ohjaajana sekä verkon paikallisista tarpeista muodostuvan kysyntäjouaston tarpeeseen, joka voidaan toteuttaa joko implisiittisenä tai eksplisiittisenä kysyntäjoudesta. Implisiittisellä tarkoitetaan mekanismeja, jossa hintasignaalien tai tariffien avulla kannustetaan kuluttajia siirtämään sähkönkulutustaan. Esimerkkinä kannustimista on pörssi-sähkö sopimus tai tehopohjainen tariffi, jossa asiakkaalta veloitetaan tehomaksua. Eksplisiittinen tarkoittaa kulutusjoustoja, joissa kuluttajille maksetaan suoria maksuja kompensaatina kulutuksen säädöstä. Eksplisiittinen kysyntäjousto voi toteutua joko ylös- tai alas säätönä sen mukaan, mitä tehotasapaino kulloinkin edellyttää (IEA, 2023b).

Kuluttaja voi hyödyntää kysyntäjoustoa taloudellisesti tarjoamalla joustoa sähkömarkkinoille. Esimerkiksi kantaverkkoyhtiön ylläpitämät reservimarkkinat mahdollistavat jouston myymisen osana sähköjärjestelmän tasapainottamista. Jouston ennustetaan lisääntyvän tulevaisuudessa, kun joustamattomat ja sääriippuvaliset sähköntuotantotavat yleistyvät. Sähkön kulutuksen ja tuotannon tulee olla tasapainossa ja kysyntäjouston avulla voidaan tasapainottaa näiden kahden vaihteluita (Fingrid, n.d.-b; Manner, 2024).

4.2 Kuormien joustopotentialiaali

Lämmitykseen liittyvät järjestelmät on jo tunnistettu merkittäviksi kysyntäjouston lähteiksi. Kotitaloudet, erityisesti sähkölämmitteiset pientalot muodostavat merkittävän kysyntäjoustopotentialista. Sähköiset lämmitysmuodot, eritoten lämpöpumput ovat helposti ohjattavia ja joustavia kuormia. Niiden toimintaa voidaan säätää esimerkiksi sisälämpötilan mukaan, mikä tekee ohjauksesta ennakoitavampaa. Lisäksi muut sähköiset lämmitysmuodot ovat myös joustavia ja hyödynnettävissä kulutusjoustossa (Manner 2024). Luvussa 2.1.1 todettiin, kuinka lämpöpumput tulevat yleistymään tulevaisuudessa, ja sitä myöten sähkötehontarve tulee myös kasvamaan, mutta samalla joustavien kuormien määrä myös kasvaa.

Kysynnän jousto - Suomeen soveltuvat käytännön ratkaisut ja vaikutukset verkkoyhtiöille (DR pooli) -raportin mukaan suoran ja varaavan sähköisen sisätilalämmityksen potentialinen kello-ohjattu kapasiteetti olisi yli 3200 MW. Nykyaikaisilla AMR-sähkömittareilla vastaavasti potentialiaalia arvioidaan olevan noin 2800 MW (Järventausta et al. 2015). Nämä arviot osoittavat, että pelkästään kotitalouksien lämmityskuormissa on huomattavan suuri kysyntäjoustoresurssi. Toisaalta sisätilalämmityksen ohjaaminen tietyissä tilanteissa voi johtaa asuinmukavuuden heikkenemiseen. Kuitenkin energiakriisin aikana havaittiin joustopotentialiaalia hintasignaalin ollessa riittävän voimakas (Haakana, et al. 2024).

Käyttöveden lämmitys puolestaan tarjoaa helpon ja ympärivuotisen joustomahdollisuuden, sillä sen toimintaperiaate perustuu yksinkertaiseen päälle- ja pois kytkettävään lämpövastukseen. Käyttöveden kulutus on lisäksi sähköistä sisälämmitystarvetta ennakoitavampaa, mikä tekee sen ajoittamisesta helpompaa.

Sähköautot muodostavat kotitalouksille merkittävän ja ympärivuotisen joustopotentialin. Arkikäytössä useimmille käyttäjille riittää, että auto on ladattu työmatkaa varten, jolloin latausaikaväli on myös laaja. Sähköautot ovat erityisen joustavia, jos niissä on V2G-ominaisuus eli ne pystyvät myös syöttämään tehoa verkkoon. Sähköautojen ohjaus on erittäin helppoa, sillä useimmat latauspalvelut tarjoavat etäohjattavan älylatauksen. Ohjatun latauksen avulla voidaan rajoittaa lataustehoa tai siirtää latauksen ajankohtaa, jolloin käyttäjä voi sovittaa latauksen helposti omaan arkeensa. Kuormaa voidaan ohjata muun muassa hintasignaalin mukaan ja näin hyödyntää edullisimmat sähkönkäyttöhetket. Ohjauksella voidaan myös hyödyntää kuormien risteilyä, jolloin lataus kytkeytyy pois, kun toinen suuri tehoinen kuorma aktivoituu. Tämän avulla voidaan varmistaa liittymän pääsulakkeiden riittävyys kovien kuormitusten aikaan. Kotitaloudet, missä on pientuotantoa voivat ajoittaa latauksen runsaan tuotannon hetkille, jolloin tehoa ei tarvitse ottaa ollenkaan verkosta (Svarc, 2024).

Mikäli Suomessa olisi 500 000 liikennerekisteröityä V2G-täyssähköautoa, muodostuisi *Jousto 2035 visio – Energiajärjestelmän jouston tarpeet 2035-* tutkimusraportin mukaan kokonaisjoustokapasiteetiksi arviolta 875 MW (Honkapuro et al. 2020).

4.3 Kysyntäjouaston edellytykset ja haasteet jakeluverkon kuorman hallinnassa

Verkon kuormituksen hallinnassa kysyntäjouaston tarkoituksena on leikata huipputehoja siirtämällä kulutusta pois kuormitushuipuista. Seurauksena voi olla myös päinvastainen vaikutus, jos useat kuluttajat samassa muuntopiirissä tai jonovarokelähdöllä ohjaavat sähkölaitteet päälle samanaikaisesti, esimerkiksi alhaisen sähkön hinnan perusteella. Tällöin kuormien risteily vähenee ja kuormat kasautuvat samalle hetkelle, mikä voi kasvattaa huipputehoa jakeluverkossa. Pörssisähkösopimusasiakkailla on yhteinen hintapohjainen kannustin toteuttaa ohjausta samaan aikaan. Vastaavaa tehojen samanaikaista kasvua on havaittu aiemmin yö sähköohjattujen varaavien sähkölämmitysten yhteydessä.

Kysyntäjouaston hyödyntäminen edellyttää, että kotitalouksien sähkölaitteiden sähkötehoa voidaan ohjata vaivattomasti. Automaation kehitys, kuten kotiautomaatiot ja uudet sähkömittarit tukevat kulutusjouaston mahdollistamista ja hyödyntämistä. Automaatiot mahdollistavat esimerkiksi sähkönkulutuksen seurannan ja kulutuksen automaattisen sääntelyn, mikä tekee kuluttajalle jouaston hyödyntämisestä helpompaa. Kuluttajien tulisi kuitenkin hankkia automaatiojärjestelmä ja tehdä rahallisia investointeja.

Energiamarkkinoiden rakenteet ja sääntely muodostavat myös keskeisen haasteen kysyntäjouaston toteutukselle. Nykyiset sopimusmallit ja hinnoittelurakenteet eivät kaikilta osin tue kulutusjouaston tehokasta hyödyntämistä, mikä korostaa tarvetta uudistaa ja kehittää energiamarkkinoita sekä mahdollisesti kehittää uudenlaisia sääntelyratkaisuja (Good et al, 2017). Pörssisähköasiakkailla on jouaston hyödyntämiselle selkeä taloudellinen kannustin, mutta kiinteähintaisilla sopimuksilla tämä kannustin puuttuu. Energiapohjainen siirtotariffi ei myöskään kannusta osallistumaan joustoon. Näin ollen kotitaloudella, jolla on kiinteähintainen sähkösopimus, ja sähkön siirron perustuessa siirrettyyn energiaan, ei kuluttajalla ole suoraa taloudellista kannustinta hallita tai siirtää huipputehojaan.

Liittymän sulakkeet voivat kuitenkin muodostaa epäsuoran taloudellisen kannustimen huipputehojen muodostumiseen, sillä niiden ylittäminen voi edellyttää liittymäkoon kasvattamista ja sitä kautta lisäkustannuksiin.

Toinen olennainen haaste on kuluttajien tietoisuuden puute kulutusjoustosta. Vaikka tekniset valmiudet kulutusjoustoos osallistumiselle ovat jo pitkälti olemassa, voi kuluttajien osallistuttaminen olla vaikeaa, mikäli heillä ei ole tarpeeksi tietoa sen hyödyistä eikä osallistumista tueta riittävästi taloudellisilla kannustimilla (Gamma et al. 2021). Teh-tyjen kyselyiden ja tutkimusten perusteella viestinnän voidaan arvioida olevan merkittävä tekijä kulutusjouston toteuttamisessa.

4.4 Joustavien kuormien verkostovaikutukset

Joustavien kuormien vaikutukset ilmenevät jakeluverkossa ensisijaisesti suurentuneiden huipputehojen, jännitetasen vaihteluiden, jännitteenlaadun muutosten sekä verkon suojausjärjestelmien toimintavarmuuden kautta. Kun kuormituksia ohjataan samalle hetkelle, verkon kuormitus kasvaa, mikä voi johtaa verkon komponenttien yli-kuormitukseen ja liian suureen jännitealenemaan.

Huipputehon nousu ei aiheuta ongelmia, jos verkko on riittävän paljon ylimitoitettu, mutta se ei ole taloudellisesti kannattavaa. Viime vuosina Vaasan Sähköverkon jakelualueella pientalojen pääsulakkeiden suurentaminen on yleistynyt kotitalouksien kasvaneiden tehontarpeiden vuoksi. Sulakekoon ja sen myötä huipputehon kasvu lisää jakeluverkon komponenttien kuormitusastetta ja edellyttää, että runko- ja liittymiskaapelit, jakokaapit ja jakelumuuntajat kestävä aiempaa suurempia tehoja. Kun useat liittymät samassa muuntopiirissä kasvattavat sulakekokoaan, verkon vahvistamistarve kasvaa, mikä voi tarkoittaa esimerkiksi runkokaapelien tai jakelumuuntajien mitoituksen korotusta. Maakaapeliverkoissa kaapelinvaihdot ovat kalliita, erityisesti asfaltoidulla alueella. Näin

yksittäisten asiakkaiden yhteen summattu sulakekoon kasvattaminen voi johtaa laajempiin investointitarpeisiin jakeluverkon alueella, mikä puolestaan heijastuu asiakkaiden palvelu- ja siirtomaksuihin pitkällä aikavälillä.

Sähköautojen kotilataus on yksi keskeisimmistä tekijöistä, jotka vaikuttavat jakeluverkkojen mitoitukseen ja kapasiteettitarpeisiin. Jakeluverkon näkökulmasta ideaalilanteessa sähköautojen lataus kohdistuisi matalan kuormituksen hetkiin, mutta käytännössä lataus keskittyy usein ruuhka-aikoihin, jolloin verkko on jo valmiiksi kuormittunut. Ylikuormituksen riski kasvaa erityisesti, mikäli suuri määrä sähköautoja ladataan samanaikaisesti samalla alueella. Yhtäaikaiset kolmivaihelataukset voivat kuormittaa siirtokapasiteettia ja heikentää jännitteenlaatua, mikä voi näkyä esimerkiksi jännitetason laskuna ja harmonisina yliaaltoina.

Akkujen avulla voidaan muuttaa sähkönkulutusprofiilia ilman muutosta varsinaiseen kulutuskäyttäytymiseen. Akun lataus ja purku mahdollistaa kuormituksen tasaamisen pienentäen liittymän huipputehoa. Toisaalta jos akun käyttöä ohjataan esimerkiksi hintasignaalien perusteella, voi jakeluverkkoon aiheutua kuormitusmuutoksia, joita perinteinen kulutusprofiili ei muodosta. Tällöin kuormitus voi keskittyä samoihin hetkiin, mikä heikentää kuormien risteilyä ja kasvattaa verkon hetkellisiä tehopiikkejä. Tämä muuttaa verkon perinteistä mitoituslogiikkaa ja voi lisätä tarvetta jakeluverkon komponenttien kapasiteettivahvistuksille.

5 Tutkimusaineisto ja menetelmät

Tässä luvussa esitetään tutkimuksessa käytetyt aineistot ja menetelmät, joiden avulla tarkastellaan energiamurroksen vaikutuksia sähkölämmitteisten pientaloalueiden huipputehoihin liittymä- ja jakelumuuntamotasolla. Tarkastelussa keskitytään siihen, kuinka kuormituksen samanaikaisuus vaikuttaa huipputehoon ja jakeluverkon kuormitukseen.

5.1 Tutkimusaineisto

Tutkimusaineisto koostuu tuntikohtaisesta käyttöpaikkojen ja jakelumuuntamon pätötehodatasta, ulkolämpötilatiedoista sekä sähköön spot-hinnoista. Aineisto toimii sekä tehoprofiilianalyysin että skenaariomallinnuksen perustana.

Tutkimuksessa hyödynnetty tuntikohtainen käyttöpaikkojen ja jakelumuuntajan pätötehodata on tammikuulta 2024, ja se on saatu Vaasan Sähköverkolta Trimble NIS-järjestelmästä. Tarkasteluun on valittu talvikauden kylmimmän ajanjakson viikonloppu, joka edustaa sähköverkon mitoittavinta hetkeä eli ajankohtaa, jolloin verkon kuormitus on suurimmillaan.

Tuntikohtaiset ulkolämpötilan keskiarvot on haettu Ilmatieteenlaitoksen (2024) avoimesta palvelusta Vaasan lentokentän mittausasemalta. Kyseinen asema on maantieteellisesti lähin käytettävissä oleva havaintopiste tarkasteltavaan muuntopiiriin nähden, ja sen mittauksen katsotaan kuvastavan riittävällä tarkkuudella Vaasan Sähköverkon alueen ulkolämpötilaa yleisellä tasolla. Ulkolämpötila on olennainen tekijä, sillä kylminä ajanjaksoina lämmityskuorma tyypillisesti kasvaa.

Sähköön spot-hinnat perustuvat Nord Poolin julkaisemiin tuntihintoihin, jotka on esitetty muodossa (snt/kWh). Hintatietoja hyödynnetään skenaariomallinnuksessa kuormien ajoittumisen tarkastelussa.

5.2 Tutkittava muuntopiiri ja käyttöpaikat

Tarkasteltava muuntopiiri sijaitsee taajama-alueella ja edustaa tyypillistä pientaloaluetta, jossa merkittävä osa sähkönkulutuksesta muodostuu sähkölämmityksestä. Muuntopiiri on kokonaan maakaapeloitu ja verkko rakenteeltaan säteittäinen. Jakelumuuntamo on peltikioskirakenteinen ja nimellisteholtaan 200 kVA. Muuntamo syöttää yhteensä 23 kulutuskäyttöpaikkaa. Käyttöpaikkojen lämmitystavat ja liittymäkoot ovat esitetty taulukossa 2. Osa käyttöpaikoista on rajattu tarkastelun ulkopuolelle virheellisten tehotietojen tai tuotantokäytön vuoksi.

Taulukko 2. Muuntopiirin käyttöpaikat.

Käyttöpaikka (KP)	Lämmitystapa	Sulakekoko
1	Kaksoislämmitys	3x25 A
2	Lämpöpumppu	3x25 A
3	Lämpöpumppu	3x25 A
4	Varaava sähkölämmitys	3x25 A
5	Lämpöpumppu	3x25 A
6	Lämpöpumppu	3x25 A
7	Sähkölämmitys	3x25 A
8	Lämpöpumppu	3x25 A
9	Ei sähkölämmitystä	3x25 A
10	Ei sähkölämmitystä	3x25 A
11	Ei sähkölämmitystä	3x25 A
12	Sähkölämmitys	3x25 A
13	Ei sähkölämmitystä	3x25 A
14	Lämpöpumppu	3x25 A
15	Sähkölämmitys	3x25 A
16	Lämpöpumppu	3x25 A
17	Sähkölämmitys	3x25 A
18	Sähkölämmitys	3x25 A
19	Sähkölämmitys	3x25 A
20	Sähkölämmitys	3x25 A
21	Lämpöpumppu	3x25 A
22	Lämpöpumppu	3x25 A

Taulukossa 2 esitetty sähkölämmitys viittaa pääasiassa suoraan sähkölämmitykseen, johon sisältyy myös käyttöveden lämmitys. Tässä työssä sähkölämmityksellä tarkoitetaan kuitenkin laajemmin myös muita sähköisiä sisätilälämmityksen muotoja, kuten lämpöpumppuratkaisuja. Käyttöveden lämmityksen oletetaan sisältyvän kaikkiin tarkasteltuihin sähkölämmitysjärjestelmiin.

5.3 Yleistys vastaaviin muuntopiireihin

Laajemman verkostovaikutusten arvioimiseksi tarkastelua laajennettiin yksittäisen muuntopiirin lisäksi kymmeneen vertailukelpoiseen muuntopiiriin sähkölämmitteiseltä pientaloalueelta. Muuntopiirit valittiin siten, että niiden lähtötilanteen kuormitusasteet edustavat verkossa esiintyvää tavanomaista vaihteluväliä. Lisäksi tarkasteltiin sähkölämmityksen ja sähköauton latauksen yhteisvaikutusta kaikkiin verkkoalueen jakelumuuntajien kuormitusasteisiin, lukuun ottamatta pylväsmuuntajia.

5.4 Tutkimusmenetelmät

Tutkimus perustuu päätätehodatan, spot-hinnan ja ulkolämpötilan analyysiin sekä skenaariopohjaiseen tarkasteluun. Tavoitteena on tarkastella energiamurroksen aiheuttamien kuormitusmuutosten vaikutuksia pienjänniteverkkoon sähkölämmitteisellä pientaloalueella, erityisesti huipputehoon liittymä- ja jakelumuuntajatasolla. Lisäksi tutkitaan verkon kuormitettavuutta muuntopiiritasolla.

Kuormitusta tarkastellaan tuntitasolla, mikä mahdollistaa sähkönkulutuksen ajallisen jakautumisen ja huipputehojen muodostumisen analysoinnin. Yksittäisten käyttöpaikkojen sähkönkäytön tarkkaa rakennetta ei tunneta, minkä vuoksi niiden kuormitusta kuvataan käyttöpaikkojen keskimääräisenä tehoprofiilina. Muuntopiiritason tehoprofiili muodostetaan käyttöpaikkojen keskimääräisen tehoprofiilin avulla kertomalla se käyttöpaikkojen lukumäärällä.

Mallinnus ja aineiston käsittely toteutettiin Excel- ja Trimble NIS-ohjelmistolla. Excelissä mitattu pätötehodata jaettiin pohjakuormaan sekä joustavien kuormien osuuteen. Näiden perusteella muodostettiin skenaariopohjaiset tehoprofiilit, joissa joustavat kuormat reagoivat spot-hintaan.

Tämän jälkeen muodostettujen tehoprofiilien perusteella määritettiin Trimble NIS-ohjelmassa tehdyn tehonjakolaskennan korjauskertoimet. Tehonjakolaskelmissa mitattu pätöteho toimii lähtötilanteena eli nykytilana, jota korjattiin lämpötilan korjauskertoimella. Korjauskerrointa tarvittiin, jotta kuormitusta voidaan skaalata vastamaan tarkasteltavan ajanjakson sääolosuhteita. Lisäksi korjauskertoimien avulla kuvataan muuntopiirin kuormitettavuutta eri kuormitustilanteissa, kuten spot-hinnan mukaan ohjautuvan sähkölämmityksen, lämminvesivaraajan, sähköautojen latauksen sekä niiden yhteisvaikutuksen skenaarioissa. Korjauskertoimia käsitellään tarkemmin alaluvussa 5.5.

Skenaariopohjaisen lähestymistavan avulla voidaan vertailla erilaisten kuormitustilanteiden vaikutuksia jakeluverkon kuormitukseen ja arvioida kuormien ajoittumisen merkittävyyttä jakeluverkon riittävyyden kannalta.

5.5 Korjauskertoimet

Tehonjakolaskennassa Trimble NIS-ohjelmiston laskentaparametreihin on määriteltä erilliset korjauskertoimet, joiden avulla voitiin mallintaa kuormituksen muutoksia. Lisäksi ulkolämpötilan vaikutus on huomioitu erillisellä korjauskertoimella.

Vuoden 2024 tarkastelujakso oli poikkeuksellisen kylmä, kun taas Trimble NIS-laskenta perustuu edeltävään 12 kuukauden jaksoon, joka oli selvästi tarkastelujaksoa lämpimämpi. Tällöin edeltävän 12 kuukauden jakson mitattuihin arvoihin perustuva laskenta aliarvioisi verkon kuormitusta kylmempää talvea vastaavissa olosuhteissa. Tämän vuoksi mitattua lähtötilanteen kuormitusta korjataan lämpötilan korjauskertoimella 1,15.

Sähkölämmityksen vaikutusta kuvaavana kertoimena käytetään arvoa 1,61, joka on johdettu lämmityskuormista muodostetun tehoprofiilin ja mitatun lähtötehon maksimien välisestä suhteesta. Pelkästään sähköautojen latauksen vaikutusta kuvaavana kertoimena käytetään arvoa 1,88, joka on johdettu sähkölämmityskuorman ja sähköautojen latauksen yhdistetyn tehoprofiilin sekä pelkän sähkölämmityskuorman maksimiarvojen suhteesta.

Sähkölämmityksen ja sähköautojen latauksen yhteisvaikutusta kuvaavana kertoimena käytetään arvoa 3,03, joka on muodostettu lämmityksen ja latauksen yhdistetyn tehoprofiilin ja mitatun lähtötehon maksimien välisestä suhteesta.

6 Skenaariomallinnus

Skenaariomallinnuksen tavoitteena on arvioida, kuinka paljon energiamurros voi suurimmillaan kasvattaa sähkölämmitteisten pientaloalueiden huipputehoja. Tarkastelu kohdistuu erityisesti tilanteisiin, joissa kuormat ajoittuvat samanaikaisesti, sillä nämä edustavat jakeluverkon kannalta kriittisimpiä käyttötilanteita.

Mallinnus perustuu mitattuun kuormitusdataan sekä tehoprofiilien kautta muodostettuihin korjauskertoimiin, jotka esitettiin luvussa 5.5.

Tehoprofiilien osalta tarkastelua tehdään kahdella eri tasolla:

- Liittymätasolla, jossa analysoidaan kuormien vaikutusta huipputehoon.
- Muuntopiiritasolla, jossa tarkastellaan kuormien yhteisvaikutusta huomioiden kuormituksen hajautuminen eri käyttöpaikkojen välillä, kuten erilaisten lämmitysratkaisujen ja sähköautojen lataustapojen vaihtelu.

Muuntopiiritasolla oletetaan, ettei kaikki liittymät käyttäydy identtisesti, mikä vastaa realistista tilannetta, jossa kuormien ajoittuminen ja joustoon osallistuminen vaihtelevat.

6.1 Kuormat skenaariomallinnuksessa

Skenaariomallinnuksessa huomioidaan pohjakuorma ja joustava kuormat, joita ovat sähköinen rakennusten lämmitys, lämminvesivaraaja ja sähköautojen lataus. Kuormien tehot, kesto ja ajallinen käyttäytyminen on määritetty kirjallisuuden ja aiempien tutkimusten perusteella.

6.1.1 Pohjakuorma

Pohjakuormalla tarkoitetaan sähkönkulutusta, joka jää jäljelle, kun kokonaiskulutuksesta on eritelty sähkölämmitykseen kuluva teho. Tehoprofiilien muodostamisen yhteydessä peruskuorma on jatkuvaa sähkönkäyttöä, kuten valaistusta, kodinkoneita ja viihde-elektroniikkaa. Pohjakuorma vaihtelee muun muassa vuorokauden ajan mukaan. Tässä työssä peruskuorma vaihtelee 0,5–2 kW välillä, perustuen Motivan esittämiin arvioihin pientalon sähkönkäytön jakautumisesta (Motiva, n.d.-e). Oletettu vaihteluväli kuvaa tyypillistä kulutustasoa eri käyttötilanteissa, kuten yöaikaan alhaisempaa pohjakuormaa ja päiväaikaan suurempaa kulutusta

6.1.2 Sähköiset lämmitysjärjestelmät

Tässä työssä tarkasteltavien pientalojen sähkölämmitykseen kuluva keskitehoa ei tunneta. Keskitehon arviointi on myös haastavaa, sillä tarkkoja tietoja sähkölämmitykseen vaikuttavista tekijöistä, kuten rakennusten pinta-aloista, sisälämpötiloista ja eristystasosta ei ole saatavilla. Tämän vuoksi lämmitystehon arviointi mallinnuksessa perustuu osittain kirjallisuudessa esitettyihin arvoihin sekä pientalon lämmitystä käsittelevien tutkimusten skenaariotapauksiin. Keskeisten lähteiden, kuten SÄTE-oppaan *Opas pientalojen suunnitteluun: Sähkötehojen hallinta osana rakennuksen energiatehokkuutta sekä Kysynnän jousto – Suomeen soveltuvat käytännön ratkaisut ja vaikutukset verkkoyhtiöille (DR pooli)* – raportin pohjalta voidaan arvioida pientalon lämmitystehon olevan suoräsähkölämmitteisissä kohteissa noin 8 kW ja lämpöpumppuratkaisuissa noin 4 kW (Harsia et al., 2019; Järventausta et al., 2015). Työssä lämmityskuorman oletetaan olevan joustava ja hintasignaaliin reagoiva, mutta jatkuvasti käytössä.

6.1.3 Lämminvesivaraaja

Tyypillinen omakotitaloissa käytetty lämminvesivaraaja on tilavuudeltaan 300 litraa, jonka sähkövastuksen nimellisteho on 3 kW. Sähkölämmitteisissä kohteissa vedenlämmitys voidaan toteuttaa varaavana lämmityksenä, tyypillisesti yöaikaan tai jatkuvana lämmityksenä (Harsia ym., 2019). Tässä työssä oletetaan varaajan lämmittävän nimellistehollaan ja lämmityksen tapahtuvan varaavana, sillä tavoitteena on joustavien kuormien sekä huipputehotilanteisen vaikutusten arviointi.

Tilastokeskuksen (2021) *Asunnot ja asuinolot*-tilaston mukaan Suomessa omakoti- ja paritaloissa asui keskimäärin noin 2,5 henkilöä asutokuntaa kohden. Kotitalouksien henkilömäärässä on alueellisia eroja, ja maaseutumaaisissa kunnissa henkilömäärä pientaloissa on keskimäärin suurempi kuin kaupunkimaisilla alueilla, mikä liittyy muun muassa suurempiin asuinpinta-aloihin. Tässä työssä pientalon asutokunnan henkilömäärä on pyöristetty kolmeen, mitä pidetään perusteltuna pientalovaltaisilla tarkastelualueilla.

Tutkimusten mukaan päivittäinen vedenkulutus on keskimäärin noin 120–150 litraa henkilöä kohden vuorokaudessa, josta noin 35 % muodostuu lämpimästä käyttövedestä (Motiva, 2025c). Laskennassa oletetaan vedenkulutuksen olevan 150 litraa vuorokaudessa henkilöä kohden, jolloin kolmen hengen taloudessa kokonaisvedenkulutus on 450 litraa ja lämpimän veden osuus tästä noin 160 litraa. Laskennassa oletetaan kylmän käyttöveden lämpötilaksi 10 °C, ja lämpimän käyttöveden lämpötilaksi 60 °C, jotka ovat tyypillisiä arvoja suomalaisessa käyttövesijärjestelmässä (Motiva, n.d.-d).

Lämmittämiseen tarvittava energia voidaan laskea lämpöenergian yhtälöllä

$$E = mc\Delta T \quad (3)$$

missä

m = veden massa (kg),

c = veden ominaislämpökapasiteetti (4,19 kJ/kg·K), ja

ΔT = lämpötilanmuutos (50 K).

Tällöin päivittäinen energiantarve on noin 9,3 kWh. Käytännössä osa tuotetusta lämpöenergiasta kuitenkin häviää varaajan ja putkiston lämpöhäviönä, minkä vuoksi todellinen energiantarve on suurempi kuin pelkästään veden lämmittämiseen tarvittava energia. Lämpöhäviöiden suuruus vaihtelee riippuen muun muassa varaajan iästä, eristyksestä ja rakenteesta. 300 litran varaajan lämpöhäviöt arvioidaan olevan noin 2 kWh vuorokaudessa, mikä tässä tarkastelussa vastaa noin 15 % lämpimän käyttöveden energiantarpeesta (Motiva, n.d.-d), jolloin todellinen energiantarve on noin 11 kWh. Kun lämpöhäviöt huomioidaan, voidaan vuorokautiseksi lämmitysajaksi arvioida noin 4 tuntia.

6.1.4 Sähköautojen vakiolataus

Vakioaikaisella latauksella tarkoitetaan tilannetta, jossa lataus tapahtuu ennalta määrättyyn aikaan, eikä sähkön spot-hinnan vaihteluilla ole vaikutusta latauskäyttäytymiseen. Tutkimukset osoittavat, että Suomessa sähköautojen omistajat kytkevät ajoneuvonsa lataukseen tyypillisesti heti työpäivän päätyttyä tai kello 16 alkaen, jolloin lataushuippu alkaa. Synergin (2025) mukaan ei-optimoitu lataus käynnistyy keskimäärin kello 18.30, mikä on linjassa Corcheron ja muiden (2014) havaintojen kanssa, joiden mukaan yleisin latausaika sijoittuu kello 18.00–21.00 välille.

Oletuksena käytetään 11 kW:n latausasemaa, joka on yleinen valinta suomalaisissa kotitalouksissa, sillä se on yhteensopiva sekä useimpien talouksien sähköliittymien että sähköautojen sisälatureiden kanssa. Sähköhenkilöauto kuluttaa tyypillisesti 15–25 kWh/100 km (Motiva, 2025b). Todellisuudessa energian kulutus vaihtelee, mutta tarkastelussa voidaan käyttää arviota 20 kWh/100 km. Tämä arvio toimii käytännöllisenä mitoitusarvona sähkösuunnittelijalle, sillä se vastaa suurimman osan sähköautojen keskimääräistä kulu- tusta (Korhonen ja muut, 2019).

Suomessa ajotottumukset vaihtelevat, mutta tavallinen henkilöautoilija ajaa noin 40 kilometriä päivässä (Traficom, 2024). Koska yleisimpien Suomessa myytyjen sähköautojen akun kapasiteetti on noin 60 kWh, ei noin 40 kilometrin päivittäinen ajomatka kuluta

merkittävää osaa akun kapasiteetista. Tämän vuoksi auton lataus ei yleensä tapahdu nimellisteholla 11 kW, vaan latausteho jää tyypillisesti noin 70–80 % nimellistehosta (Recharge Infra, n.d.).

Akun energiantarve voidaan laskea yhtälöllä

$$E = \frac{C * d}{100} , \quad (4)$$

missä

E = energiantarve (kWh),

C = kulutus (kWh/ 100 km) ja

d = ajomatka (km).

Kun kulutus on 25 kWh/100 km ja toimintamatka 40 km, saadaan energiantarpeeksi 10 kWh. Koska todellinen latausteho jää keskimäärin noin 80 %:iin laturin nimellistehosta, käytetään tehon korjauskertoimena arvoa 0,8. Tällöin todelliseksi lataustehoksi P_{lataus} saadaan 8,8 kW.

Akun teoreettinen latausaika t saadaan laskettua yhtälöllä

$$t = \frac{E}{P_{\text{lataus}}} , \quad (5)$$

Teoreettiseksi latausajaksi saadaan 68 minuuttia. Käytännössä sähköautoa ei kuitenkaan ladata päivittäin vaan tyypillisesti lataus tapahtuu 2–3 päivän välein, jolloin latausaika on 3–4 tuntia kerrallaan.

6.1.5 Optimoitu sähköauton lataus

Sähköautot ovat yksi suurimmista kuormitustekijöistä, joita tavallisella kotitaloudella voi olla, ja loppukäyttäjän latauskäyttäytymisellä voi olla merkittävä vaikutus sähköjärjestelmään. Esimerkiksi ajoneuvojen lataaminen huipputuntien aikoina voi lisätä sähköverkon kuormitusta merkittävästi. Sähköauton vakiolatauksessa oletetaan, että sähköauton omistajat lataavat ajoneuvojaan yleisimpään latausaikaan klo 18.00–21.00. Tarkastelun tavoitteena on arvioida kuormittavimman tilanteen vaikutusta jakeluverkkoon, jolloin lataus ajoittuu samalle ajanjaksolle ilman tehoa tasaavaa ohjausta. Tässä skenaariossa loppukäyttäjät muuttavat lataustottumuksiaan ja lataavat sähköautonsa taloudellisesti optimaalisimpaan aikaan.

6.2 Skenaariot

Skenaariomallinnuksessa tarkastellaan tilanteita, jotka kuvaavat energiamurroksen vaikutuksia jakeluverkon kuormitukseen. Skenaariot eroavat toisistaan joustavien kuormien määrän ja ajoituksen osalta. Tarkoituksena ei ole ennustaa yksittäisten käyttöpaikkojen tulevaa sähkönkäytön kehitystä, vaan muodostaa rakenteellisesti perusteltuja tehoprofiileja, joiden avulla voidaan havainnollistaa kuormitusmuutosten vaikutuksia pienjänniteverkossa. Skenaariotarkastelun lähtökohtana käytetään pääasiassa lämpötilakorjattua lähtötilannetta. Poikkeuksena tästä on pelkkä sähköautojen latausskenaario, jossa vertailu tehdään muodostettuun lämmitysskenaarioon.

Skenaariossa tarkasteltavien muuntopiirien rakennuskannan oletetaan edustavan tyypillistä suomalaista pientaloaluetta, jossa lämmitysmuotoina ovat lämpöpumppu- ja suorasähkölämmitys. Lämmitysmuotojen jakaumaksi oletetaan, että 70 % käyttöpaikoista ovat lämpöpumppukohteita ja 30 % suorasähkölämmitteisiä. Oletus vastaa luvun 2.1.1 kirjallisuudessa esitettyjä kehityssuuntia. Lisäksi luvussa 5.2. esitetyt käyttöpaikkojen lämmitysjakaumat tukevat tätä oletusta. Vaikka hybridilämmitysratkaisut yleistyvät, osa

rakennuksista käyttäytyy verkon kuormituksen kannalta edelleen suorasähkölämmityksen tavoin. Tämä johtuu siitä, että täydentävät lämmitystavat, kuten ilmalämpöpumput, voivat vähentää energiankulutusta, mutta eivät välttämättä pienennä sähköistä mitoituskormaa. Tämän vuoksi suorasähkölämmityksen osuuden oletetaan säilyvän 30 % tasolla. Lämpöpumppukohteissa oletetaan sähkötehoksi 4 kW ja suorasähkölämmityksessä 8 kW. Näiden oletusten avulla muodostetaan skenaariotarkastelu, jossa arvioidaan tulevaisuuden lämmityskuormien vaikutusta jakeluverkkoon.

Sähköauton latauksen osalta oletetaan, että jokaisella liittymällä on yksi täyssähköauto. Latauksen ajoitusta tarkastellaan kahdessa tapauksessa ohjaamatonta latausta, jossa lataus ajoittuu kello 18.00–21.00 välille sekä optimoitua eli ohjattua latausta, jossa lataus tapahtuu spot-hinnan mukaan. On epätodennäköistä, että kaikki sähköautojen omistajat osallistuvat ohjattuun lataukseen, minkä vuoksi skenaariossa käytetään 80/20-jakaumaa, jossa 80 % latauksesta on optimoitua ja 20 % ohjaamatonta. Oletus perustuu muun muassa Synergin tutkimukseen (2025), jossa sovelluksen käyttäjistä noin 17 % on kiinteähintainen sähkösopimus, joilla ei ole taloudellista kannustinta hyödyntää latauksen ohjausta. 80/20-suhdelukua on käytetty myös aiemmin tehdyssä Vaasan Sähköverkon verkkotietoihin pohjautuvassa diplomityössä, joka on toteutettu osana VTT:n tutkimustoimintaa (Aura, 2025).

Sähköautojen latausskenaarion tarkastelussa vertailuperuste poikkeaa muista skenaarioista. Sen sijaan, että vertailu tehtäisiin lämpötilakorjattuun lähtötilanteeseen, käytetään vertailutasona sähkölämmitysskenaariota. Tämä tehdään siitä syystä, että tavoitteena on tarkastella yksinomaan sähköautojen latauksen vaikutusta. Lähtötilanne perustuu mitattuun dataan, jonka kuormitusrakennetta tai sisältöä ei tunneta tarkasti, minkä vuoksi ei voida erottaa, kuinka suuri osa kuormituksesta muodostuu sähkölämmityksestä. Sähkölämmitysskenaariossa kuormituksen rakenne on tiedossa. Tällöin vertailutilanteessa lämmityskuorma pysyy samana, ja skenaarioiden väliset erot johtuvat ainoastaan sähköautojen latauksesta. Tämä mahdollistaa sähköautojen latauksesta aiheutuvan kuormitusvaikutusten tarkastelun.

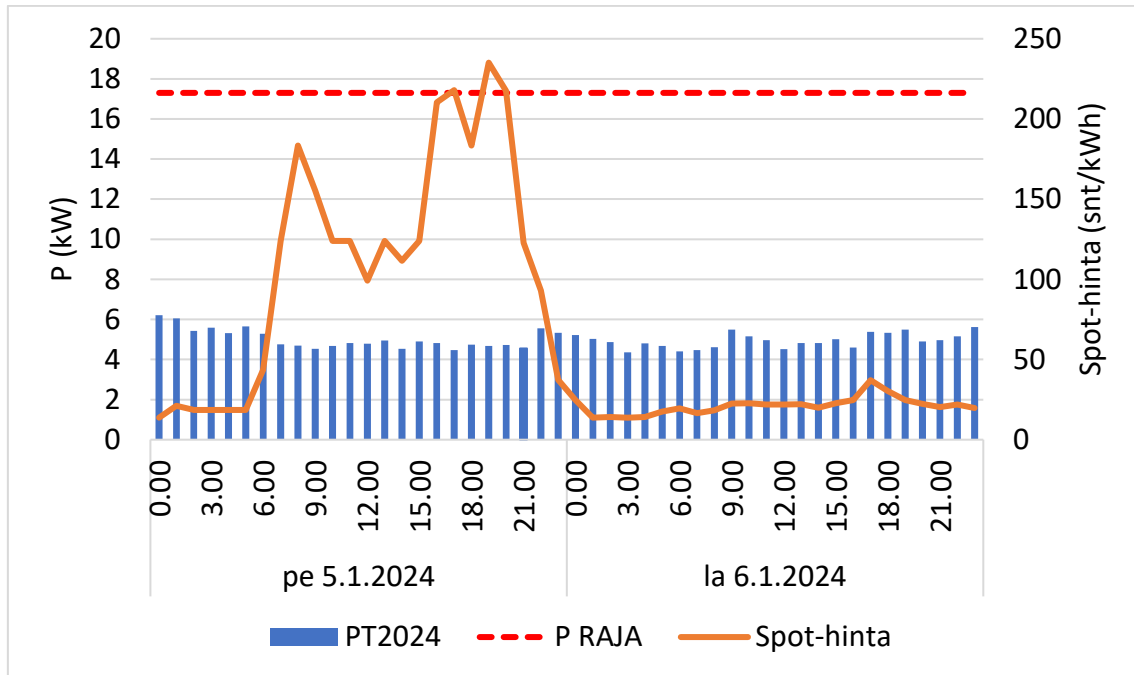
7 Tulokset ja analyysi

Tässä luvussa esitetään skenaariopohjaisen tarkastelun tulokset sekä analysoidaan energiamurroksen vaikutuksia pienjänniteverkkoon. Tuloksia tarkastellaan erityisesti kulutuksen ajallisen jakautumisen, huipputehon muutosten sekä jännitteenaleneman ja kuormitusasteiden näkökulmasta.

7.1 Tehoprofiilit liittymätasolla

7.1.1 Lähtötilanne

Lähtötilanteessa tarkastellaan liittymien keskimääräistä tehoprofiilia suhteessa sähkön spot-hintaan ajanjaksolla 5.1—6.1.2024. Spot-hinta on perjantain aikana äärimmäisen korkealla, jopa 235 senttiä/kWh. Ulkolämpötila on koko tarkastelujakson ajan negatiivinen ja vaihtelee noin $-25\ldots-32$ °C välillä, mikä vastaa tyypillistä talvikauden kylmää pakasjaksoa. Tarkastelujakson aikana ulkolämpötila pysyy kuitenkin suhteellisen vakaana, eikä sen vaihtelulla havaita olevan merkittävää vaikutusta kuormitusprofiilien ajalliseen vaihteluun. Kuvassa 10 esitetään liittymien keskimääräinen teho (PT2024) suhteessa spot-hintaan tarkastelujakson aikana sekä 3x25 A liittymän nimellinen tehoraja (PRAJA).



Kuva 10. Liittymien keskimääräinen teho suhteessa spot-hintaan.

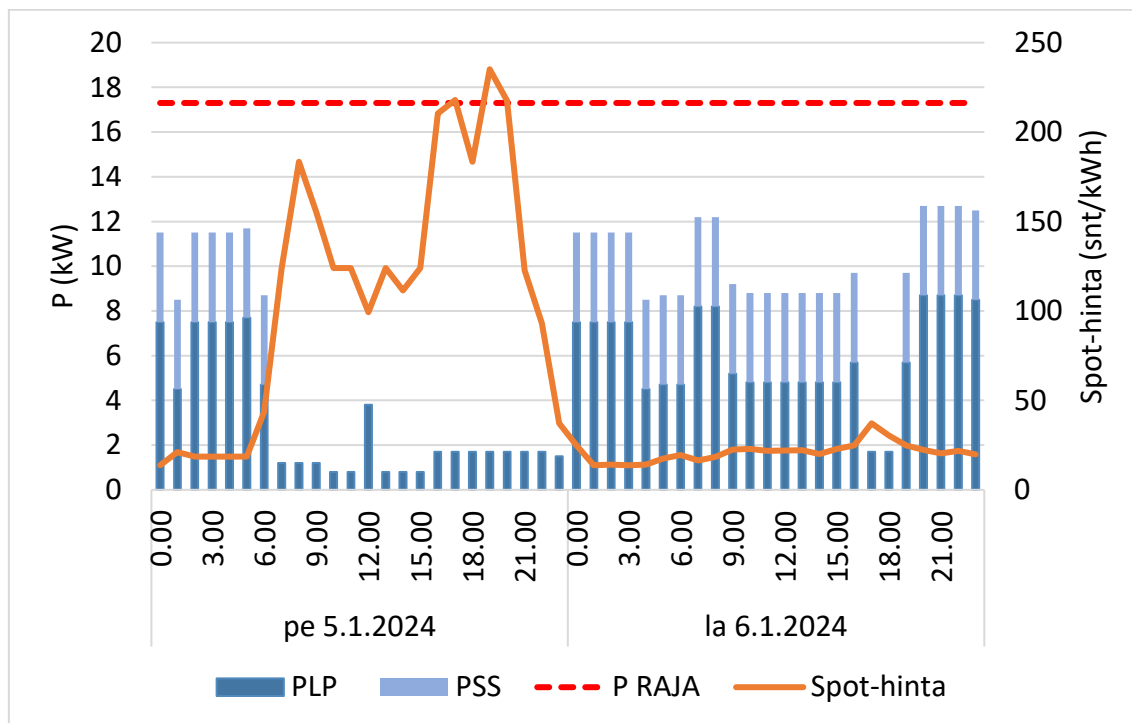
Liittymien keskithehoprofiili on suhteellisen tasainen vaihdellen välillä 4,5–6,2 kW. Lisäksi kuormitus pysyy selvästi tyypillisen pientaloliittymän 3x25 A nimellistehorajan alapuolella, eikä liittymien suurentamiselle ole nykytilanteessa tarvetta. Sähkön hinnan vaikutus kulutukseen on tarkasteluhetkellä melko vähäistä, eikä kulutus muutu merkittävästi hinnan ajallisista vaihteluista huolimatta.

On kuitenkin perusteltua olettaa, että kulutuksen ohjautuminen hinnan perusteella lisääntyy tulevaisuudessa. Taustalla on pörssisähkösopimusten osuuden oletettava kasvu, joka lisää kannusteita sekä automaattiseen että manuaaliseen kuormanohjaukseen. Sääriippuvaisen tuotannon lisääntyminen puolestaan kasvattaa sähkön hinnan vaihtelua, mikä voi lisätä kuluttajien kiinnostusta hyödyntää edullisimmat tunnit.

7.1.2 Sähkölämmityskuormat

Seuraavaksi tarkastellaan sähkölämmitysratkaisujen vaikutusta liittymätason tehoprofiileihin tilanteessa, jossa sähkölämmitystä ohjataan spot-hinnan perusteella. Kuvassa 11

esitetään tehoprofiilit lämpöpumppuratkaisulla (PLP) ja suorasähkölämmitysratkaisulla (PSS).



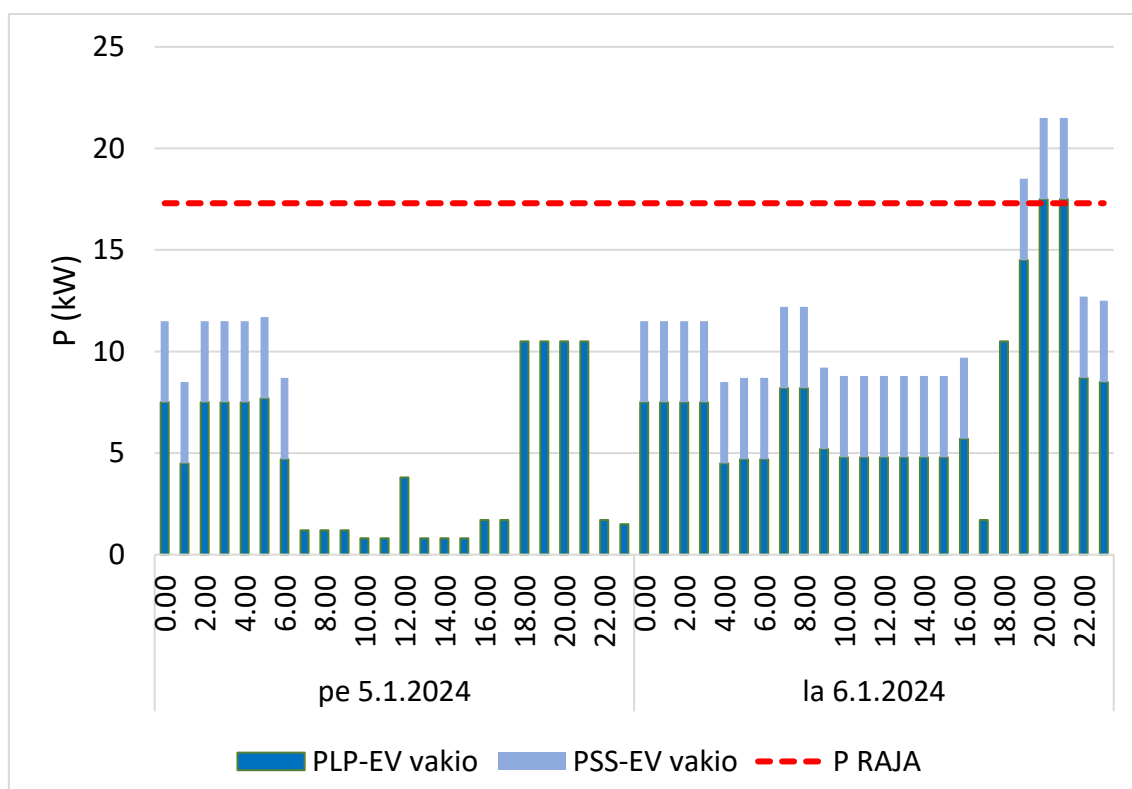
Kuva 11. Liittymätason tehoprofiilit, kun sähkölämmitysjärjestelmät reagoivat spot-hinnan vaihteluun.

Kuvia 10 ja 11 vertailemalla voidaan todeta, että sähkölämmityksen reagointi spot-hinnan vaihteluun muuttaa tehoprofiilia olennaisesti. Lähtötilanteessa sähkönkulutus on tasaista ja asettuu välille 4,5–6,2 kW, jolloin kulutus jakautuu melko tasaisesti eikä aiheuta merkittäviä huipputehopiikkejä. On huomioitava, että tarkastelu perustuu ilmalämpöpumpun tehoarvioon, ja muiden lämpöpumppuratkaisujen tapauksessa tehontarve voi olla suurempi.

Kun sähkölämmitys reagoi hintasignaaliin, kokonaisenergiankulutuksen määrä säilyy pääosin ennallaan, mutta tehon ajallinen jakautuminen muuttuu. Kulutus siirtyy alhaisen spot-hinnan ajanjaksoihin, mikä johtaa tehojen kasautumiseen lyhyemmille aikaväleille. Tämän tehoprofiilin rakennemuutoksen seurauksena korkein huipputeho kasvaa lähtötilanteen 6,2 kW:sta 12,2 kW:iin, eli se lähes kaksinkertaistuu verrattuna lähtötilanteeseen.

7.1.3 Sähköauton lataus

Kuvassa 12 esitetään liittymätason tehoprofiilit tilanteessa, jossa sähköautoa ladataan vakioaikaisesti kello 18.00–21.00. Tuloksia verrataan lähtötilanteeseen huipputehoja muutosten arvioimiseksi.



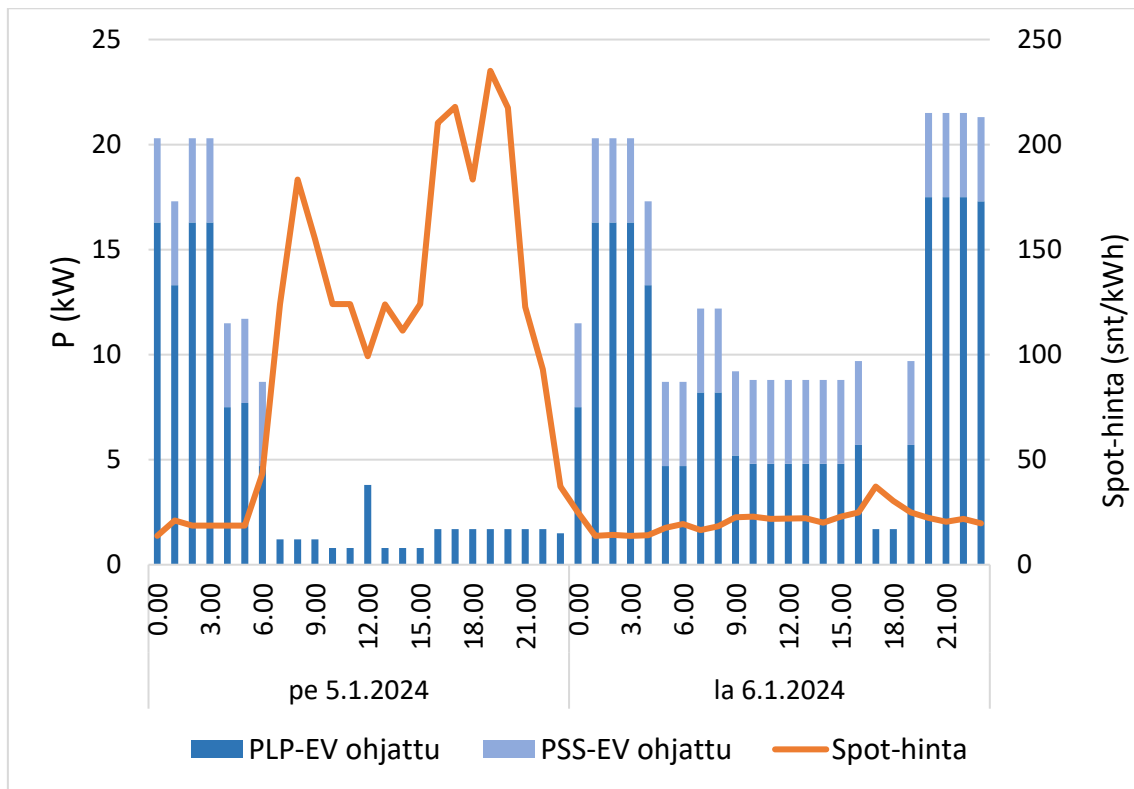
Kuva 12. Tehoprofiilit liittymillä vakioaikaisessa sähköauton latausskenaariossa.

Vakioaikainen sähköauton lataus kasvattaa tarkastelujaksolla selvästi huipputehoa verrattuna lähtötilanteeseen. Teho nousee hetkellisesti yli 17,3 kW, jolloin 3x25A liittymän nimellinen tehoraja ylittyy. Tämä osoittaa, että vakioaikainen lataus yhdistettynä muihin samanaikaiseen sähkönkulutukseen voi johtaa liittymän ylikuormitustilanteisiin, vaikka muu kuormitus olisi suhteellisen alhaista. Ylikuormitus korostuu erityisesti suoräsäkölämmityksellä.

Lauantai-iltana huipputeho kasvaa hetkellisesti yli 20 kW, kun vastaava teho lähtötilanteessa on noin 5 kW eli huipputeho kasvaa siten noin nelinkertaiseksi lähtötilanteeseen.

verrattuna. Tämä korostaa sähköauton latauksen merkittävää vaikutusta liittymän huipputehon muodostumiseen, erityisesti ruuhka-aikoina, jolloin esiintyy muutakin sähkönkulutusta. Perjantain alhaista kuormitustasoa selittää korkea spot-hinta, jolloin sähkölämmitys ei ole käytössä. Vertailu lähtötilanteeseen osoittaa, että vakioaikainen lataus ei ainoastaan lisää kokonaistehon tasoa, vaan ennen kaikkea kasvattaa ilta-ajan tehohuipuja.

Seuraavaksi tarkastellaan liittymätason tehoprofiileja tilanteessa, jossa sähköautoa ladataan optimoidusti eli latausta ohjataan sähkön spot-hinnan perusteella. Kuvassa 13 esitetään tehoprofiilien lisäksi spot-hinta, joka mahdollistaa hintasignaalien ja kuormituksen välisen yhteyden tarkastelun.



Kuva 13. Tehoprofiilit liittymätasolla optimoidussa sähköauton latausskenaariossa.

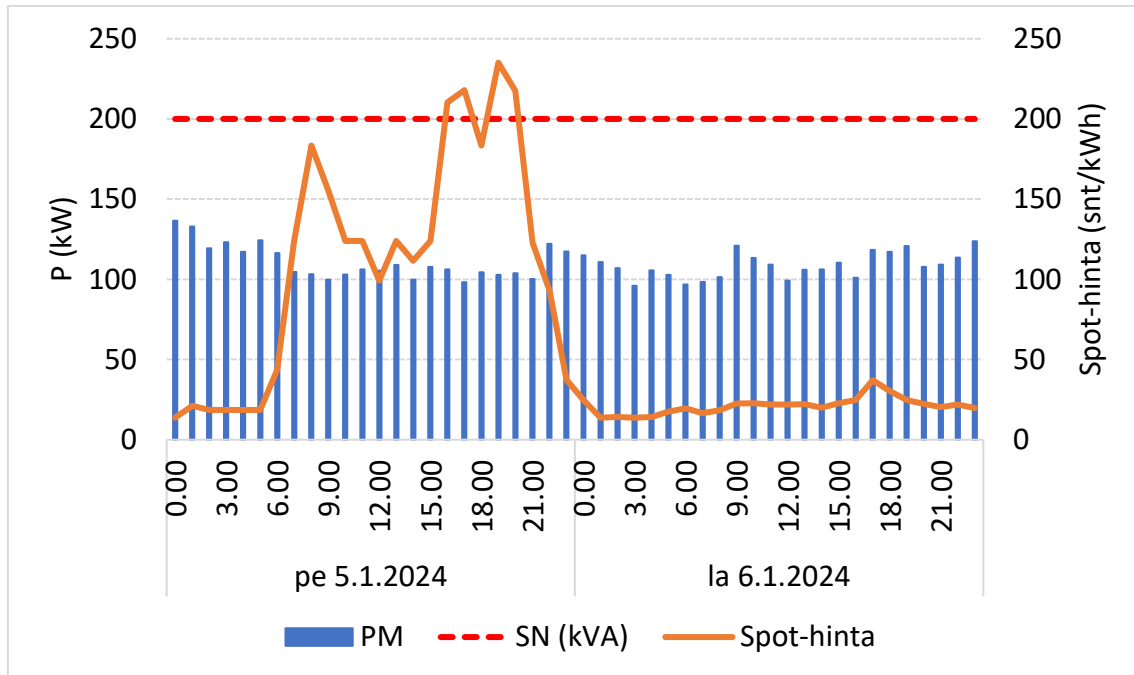
Liittymien hetkellinen kuormitus kasvaa merkittävästi ajanjaksoilla, jolloin spot-hinta on alhainen. Erityisesti ensimmäiset edulliset tunnit lauantaina kello 1.00–3.00 osoittautuivat kuormittavuuden kannalta kriittiseksi, sillä lataus reagoi voimakkaasti hintasignaalin muutokseen korkean hintajakson jälkeen. Lisäksi havaitaan toinen selkeä huipputehon nousu ilta-aikaan noin kello 20.00, jolloin sähköautojen lataus käynnistyy uudestaan. Hintapohjaisella latauksella ensimmäiset edulliset tunnit ovat liittymien mitoituksen kannalta kriittisimpiä.

Kuvia 12 ja 13 vertailemalla havaitaan, että vakioaikainen lataus aiheuttaa pidempikestoisia kuormitushuippuja ja johtaa paikoin liittymän mitoitus-tehon ylittymiseen, kun taas hintapohjaisesti optimoitu lataus keskittää kuormituksen lyhyemmille ajanjaksoille, mikä ilmenee useampina korkeina hetkellisinä huipputehoina. Molemmissa tapauksissa mitoitus-tehon ylitykset ovat liittymän toiminnan kannalta kriittisiä, sillä esimerkiksi liittymän sulakkeet voivat laueta pitkittyneen ylikuormituksen seurauksena.

7.2 Tehoprofiilit muuntopiiritasolla

7.2.1 Lähtötilanne

Seuraavaksi tarkastellaan tehoprofiilien muutoksia muuntopiiritasolla. Kuvassa 14 esitetään muuntopiirin keskimääräinen teho (PM) suhteessa spot-hintaan sekä muuntajan nimellistehoon (SN).



Kuva 14. Lähtötilanne muuntopiiritasolla.

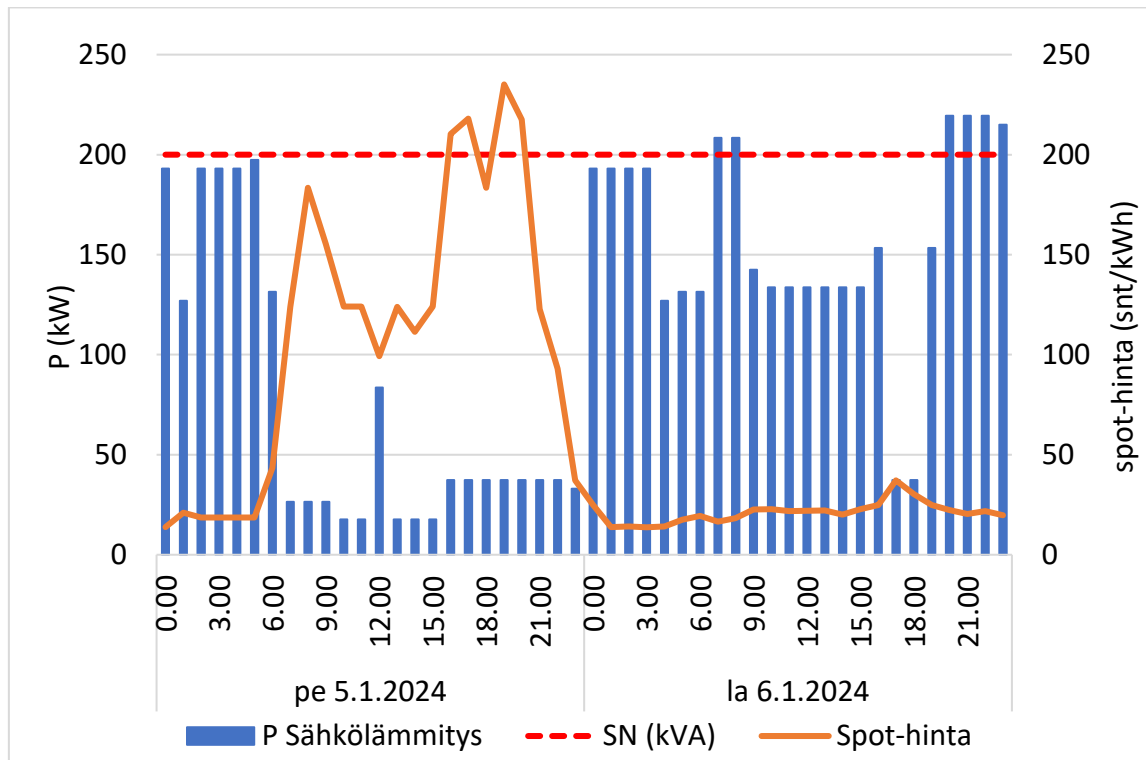
Lähtötilanteessa muuntopiirin keskimääräinen tehokuorma vaihtelee tarkasteluajanjaksoilla 95–136 kW välillä ja pysyy selvästi muuntajan nimellistehon alapuolella. On kuitenkin huomioitava, että keskimääräinen teho on esitetty kilowatteina, kun taas muuntajan nimellisteho on ilmoitettu kilovolttiampeereina, eikä arvoja voida suoraan verrata keskenään. Todellinen kuormitus on loistehon vaikutuksesta hieman suurempi, mutta loistehon osuus on niin pieni, että tehoa voidaan tässä tarkastelussa verrata muuntajan nimellistehoon riittävällä tarkkuudella. Tehoprofiilista nähdään, että muuntopiirin kuormitus on keskimäärin selvästi alle muuntajan kapasiteetin.

Tehoprofiilissa ei esiinny erityisen korkeita huipputehoja, vaan kuormitus on kokonaisuutena melko tasaista. Perjantaina havaitaan lievä kuormituksen aleneminen päiväaikaan, jolloin spot-hinta on poikkeuksellisen korkea. Lauantaina kuormitus pysyy tasaisena ja on hieman yli 100 kW tasolla.

Lähtötilanteessa tehoraja ei ylity, ja kuormituksen vaihtelu pysyy tasaisena ja ennustettavana. Hintasignaalin vaikutus on lievästi havaittavissa, mutta se jää vähäiseksi eikä muuta merkittävästi kuormitusprofiilin perusluonnetta.

7.2.1 Sähköiset lämmityskuormat

Kuvassa 15 on muuntopiiritason tehoprofiili (P Sähkölämmitys), kun sähkölämmitystä ohjataan spot-hinnan perusteella.



Kuva 15. Tehoprofiili, kun sähkölämmitystä ohjataan spot-hinnan perusteella.

Tehoprofiilissa havaitaan huomattavasti suurempaa vaihtelua kuin lähtötilanteessa. Teho vaihtelee laajasti välillä 20–220 kW, ja muutokset tapahtuvat lyhyessä ajassa. Kuormitus nousee ajoittain muuntajan nimellistehon tasolle ja jopa yli sen, ollen suurimmillaan käytännössä muuntajan kapasiteetin maksimissa.

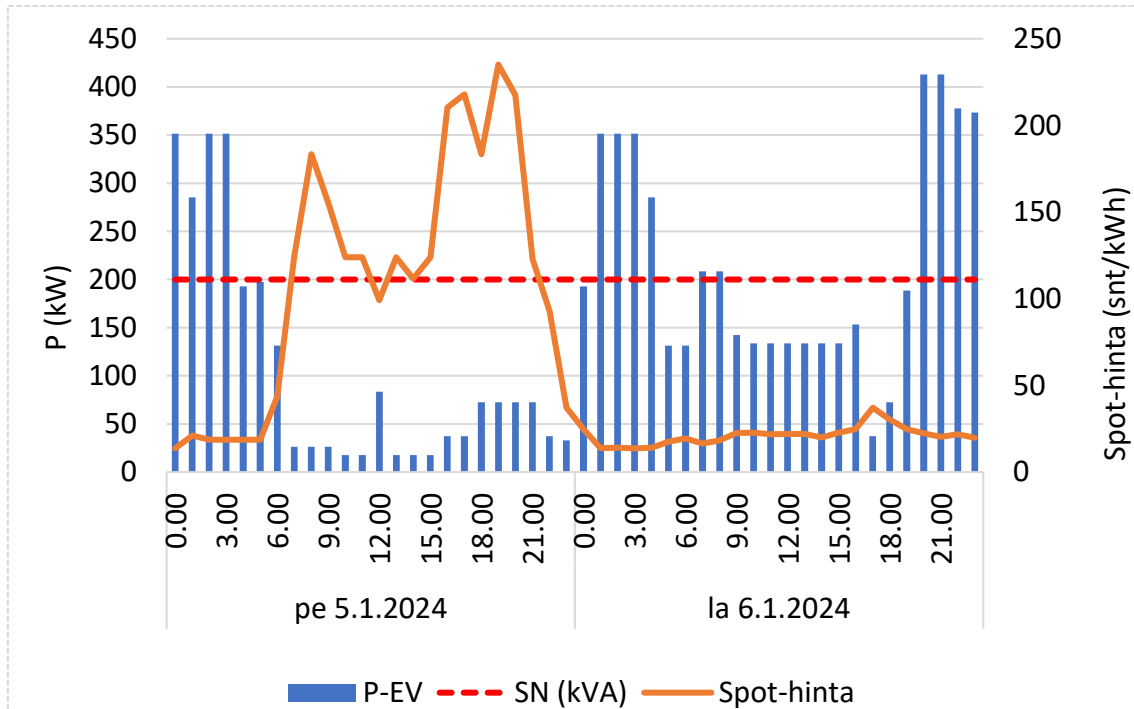
Perjantaina korkeiden spot-hintojen aikana teho laskee selvästi, ajoittain jopa 40 kW tasolle. Tämä korostaa spot-hinnan ja joustavien lämmityskuormien välistä yhteyttä ja niiden merkitystä jakelumuuntamon kuormitettavuudelle.

Spot-hinnan laskiessa teho kasvaa nopeasti ja nousee hetkellisesti noin 220 kW:iin. Tämä kuormituksen äkillinen kasautuminen osoittaa, että lämmitys aktivoituu samanaikaisesti useissa kohteissa heti edullisen hinnan alkaessa, mikä kumuloituu muuntamotasolla voimakkaiksi huipputehoiksi. Sähköisten lämmitysjärjestelmien ohjaaminen spot-hinnan perusteella kasvattaa muuntamotason huipputehoa noin 61 % verrattuna lähtötilanteeseen.

Yhteenvedona sähkölämmityksen ohjaaminen spot-hinnan perusteella muuttaa muuntopiiritason kuormitusprofiilin luonnetta olennaisesti. Kuormitus ei enää ole tasaista ja enustettavaa, vaan se muodostuu jyrkistä kuoppien ja huippujen vuorotteluista, mikä korostaa huipputehon hallinnan merkitystä kuormitettavuuden kannalta.

7.2.2 Sähkölämmitys ja sähköauton lataus

Kuvissa 16 esitetään muuntamopiiritason tehoprofiili (P-EV), kun sähkölämmityksen lisäksi 18 käyttöpaikalla ladataan sähköautoa optimoidusti spot-hinnan mukaan ja 4 käyttöpaikalla ladataan vakioaikaisesti kello 18.00–21.00 välillä.



Kuva 16. Sähkölämmityksen ja sähköauton latauksen yhdistetty tehoprofiili.

Muuntamotason huipputeho kasvaa lähtötilanteen 135 kW:sta, jopa 413 kW:iin, mikä vastaa noin 206 % kasvua. Samalla tehoprofiili muuttuu tasaisesta ja maltillisesta voimakkaasti vaihtelevaksi ja piikkimäiseksi. Kuormitus ylittää selvästi muuntamon nimellisen tehorajan, jota lähtötilanteessa ei tapahtunut.

Spot-hintaan perustuva ohjaus siirtää kulutusta yksittäisille edullisille tunneille, mikä johtaa jakelumuuntamon ajoittaiseen ylikuormitukseen. Sähköautojen latauksen vaikutus korostuu erityisesti huipputehon hallinnan näkökulmasta. Kuormitus ei ainoastaan kasva, vaan sen ajallinen vaihtelu lisääntyy ja ennustettavuus heikkenee. Tulokset osoittavat, että ilman rajoitteita kuormien samanaikainen reagointi hintasignaaliin sähköautojen yleistyessä muodostaa haasteen jakeluverkon kapasiteetin kannalta.

7.2.3 Tehoprofiilien tuloksista saadut kertoimet

Tehoprofiilien analyysin tuloksena saadaan tehonjakolaskelmissa käytettävät korjauskertoimet. Koska korjauskertoimia käytetään seuraavaksi tehdyissä tehonjakolaskelmissa, on skenaariot ja kertoimet koottu yhteenvedona taulukkoon 3.

Taulukko 3. Tehonjakolaskelmissa käytetyt skenaariot sekä niiden sisältämät kuormat, suhdeluvut sekä käytetyt korjauskertoimet.

Skenaario	Kuvaus	Toteutus	Korjauskerroin
Lämpötilakorjattu lähtötilanne	Edeltävän 12 kuukauden tunti-kohtainen mittausdata, jota on korjauskertoimen avulla skaalattu vastaamaan vuoden 2024 ulkolämpötilaa.	Mitattu pätöteho, jota korjattu lämpötilakertoimella.	$k_A = 1,15$
Sähkölämmitys	Lämmityskuormat 70/30- ja-kaumalla (lämpöpumppu/suorasähkö)	Lämmityskuorma (4 kW ja 8 kW), lämminvesivaraaja (3 kW) sekä pohjakuorma yhdistetään. Saatua tehoprofiilia verrataan mitattuun muuntopiiritason tehoprofiiliin.	$k_L = \frac{219,4}{136,5} \text{ kW} = 1,61$
Sähköautojen lataus	Sähköauton lataus 80/20-jakumalla (ohjattu/vakioaikainen)	Sähköautojen lataus lisätään sähkölämmityksen tehoprofiiliin. Yhdistettyä tehoprofiilia verrataan lämmitysskenaarion tehoprofiiliin.	$k_{EV} = \frac{413}{219} \text{ kW} = 1,88$
Sähkölämmityksen ja sähköauton latauksen yhdistelmäskenaario	Sähkölämmitys ja sähköautojen lataus samanaikaisesti	Sähkölämmityksen ja sähköautojen latauksen yhdistetty tehoprofiili muodostetaan summaamalla kuormat. Saatua tehoprofiilia verrataan mitattuun muuntopiiritason tehoprofiiliin.	$k_{L+EV} = \frac{413}{136,5} \text{ kW} = 3,03$

7.3 Tehonjakolaskelmat

Tässä luvussa esitetään tehonjakolaskelmien tulokset kaikissa kuormituskenaarioissa tarkasteltavalla muuntopiirillä, johon tutkimuksen lähtöaineisto perustuu. Lisäksi mitoit-
tavinta lämmitys- ja sähköautojen latauskenaariota tarkastellaan kymmenellä muulla
vertailumuuntopiirillä.

7.3.1 Jakelumuuntajan kuormitusasteet

Taulukossa 4 esitetään jakelumuuntajan kuormitustaso eri skenaarioissa. Analyysissä
vertaillaan toteutunutta maksimikuormitusta ($S_{\max}$) suhteessa muuntajan nimelliste-
hoon (S_N), sekä verkon käyttötilanteesta riippuviin sallittuihin kuormitusrajoihin.

Taulukko 4. Tutkitun jakelumuuntajan kuormitusasteet eri skenaarioissa. Harmaalla korostettu
raja-arvojen ylitykset (RN=säteittäinen verkko, MN=Silmukoitu verkko).

Kerroin	S_N (kVA)	$S_{\max}$ (kVA)	K-aste (%)	$KA_{\text{RAJA,RN}}$ (%)	$KA_{\text{RAJA,MN}}$ (%)	$KA_{\text{YLI/ALI,RN}}$ (%)	$KA_{\text{YLI/ALI,MN}}$ (%)
k_A	200	160	80	130	91	-50	-11
k_L	200	226	113	130	91	-17	22
k_{EV}	200	264	132	130	91	2	41
k_{L+EV}	200	434	217	130	91	87	126

Lähtötilanteessa (k_A) jakelumuuntajan kuormitusaste on 80 %, mikä vastaa 160 kVA:n
näennäistehoa. Kuormitus alittaa sekä säteittäisen että silmukoidun verkon sallitut raja-
arvot, ja muuntajalla on kapasiteettivaraa sekä kuormituksen kasvuille että mahdolliselle
varasyöttötilanteelle.

Sähkölämmitysskenaariossa (k_L) kuormitusaste nousee 113 %:iin tarkoittaen 226 kVA:n
näennäistehoa. Kuormitus kasvaa 41 % lähtötilanteesta. Vaikka kuormitus pysyy vielä sä-
teittäisen verkon sallitun raja-arvoissa, silmukoidun verkon kuormitusraja ylittyy.

Sähköauton latauksen yhdistetyssä skenaariossa (k_{EV}) kuormitusaste nousee 132 %:iin ja muuntajan näennäisteho 264 kVA:iin. Verrattuna lähtötilanteeseen kuormitus kasvaa noin 65 %. Kuormitus ylittää jo säteittäisen verkon kuormitusrajan lievästi ja silmukoidun verkon raja-arvon selvästi, mikä osoittaa sähköautojen latauksella olevan merkittävä vaikutus kuormitukseen ja huipputehon suuruuteen.

Suurin kuormitus esiintyy sähkölämmityksen ja sähköautolatauksen yhdistelmäskenaariossa (k_{L+EV}), jolloin kuormitusaste nousee 217 %:iin ja muuntajan näennäisteho 434 kVA:iin. Verrattuna lähtötilanteeseen kuormitus kasvaa noin 171 %. Kuormitus ylittää selvästi molempien verkkorakenteiden raja-arvot, minkä perusteella kyseinen skenaario muodostaa tarkastelun mitoittavimman käyttötilanteen. Kyseinen kuormitustaso ei ole jatkuvassa käytössä teknisesti hyväksyttävä, vaan vastaa käytännössä lyhytaikaista poikkeus- tai häiriötilannetta. Pitkäkestoisena vastaava kuormitus johtaisi muuntajan lämpökuormituksen merkittävään kasvuun, eristemateriaalien nopeutuneeseen ikääntymiseen sekä muuntajan käyttöiän lyhenemiseen.

Muuntajan kuormitus kasvaa voimakkaasti tarkasteltavien skenaarioiden välillä. Erityisesti sähköajoneuvojen latauksen vaikutus näkyy merkittävänä kuormituksen kasvuna, ja yhdessä sähkölämmityksen kanssa kuormitus nousee tasolle, joka ylittää muuntajan kapasiteetin. Lähtötilannetta lukuun ottamatta muuntajan kapasiteetti osoittautuu riittämättömäksi korvauskytkentätilanteiden kannalta. Tulokset korostavat, että kuormituksen lisääntyminen ja erityisesti tehon ajallinen päällekkäisyys muodostuvat verkon kannalta kriittiseksi tekijäksi. Yhteisvaikutus johtaa huipputehon merkittävään kasvuun, mikä muodostuu keskeiseksi haasteeksi verkon toiminnalle tulevaisuudessa.

7.3.2 Runkojohtojen kuormitusasteet ja jännitteenalenemat

Runkojohtojen kapasiteetin riittävyyttä tarkasteltiin useissa eri skenaarioissa. Taulukossa 5 esitetään kuormitusasteet, loppusolmuissa esiintyvät pienimmät jännitteet sekä jännitteenalenemat, joiden perusteella voidaan tarkastella kuormittumista ja käyttörajojen täyttymistä eri tilanteissa.

Taulukko 5. Runkojohtojen kuormitusasteet, loppusolmun pienimmät jännitteet sekä jännitteenalenemat eri skenaarioissa.

Runkojohto	Lämpötilakorjattu k_A			Sisälämmitys k_L			Sähköauton lataus k_{EV}			Sisälämmitys+EV k_{L+EV}		
	K-aste (%)	U_{min} (V)	U_h (%)	K-aste (%)	U_{min} (V)	U_h (%)	K-aste (%)	U_{min} (V)	U_h (%)	K-aste (%)	U_{min} (V)	U_h (%)
1	31,4	222,5	3,2	44,7	219,5	4,6	52,7	217,7	5,3	88,4	210,0	8,7
2	43,9	221,1	3,9	62,1	217,4	5,5	73,3	215,3	6,4	124,1	206,0	10,4
3	23,5	219,3	4,6	33,6	215,0	6,5	39,8	212,4	7,6	68,3	201,3	12,5

Lämpötilakorjatussa lähtötilanteessa (k_A) runkojohtojen kuormitusasteet ja jännitteenalenemat ovat alhaisella tasolla, ja kaikki arvot ovat sallittujen raja-arvojen sisällä. Tämä osoittaa, että verkolla on siirtokapasiteettia nykytilanteessa ja varaa kuormituksen kasvulle.

Sähkölämmitysskenaariossa (k_L) kuormitusasteet ja jännitteenalenemat kasvavat, mutta pysyvät pääosin sallituissa rajoissa. Vain yhdellä runkojohdolla (2) kuormitusaste ylittää silmukoidun verkon 50 % raja-arvon, mutta kaikki runkojohdot alittavat edelleen säteittäisen käyttötilanteen raja-arvon.

Pelkkä sähköautojen lataus vaikuttaa sähkölämmitystä voimakkaammin. Kuormitus kasvoi edelleen, mutta kaikki runkojohdot jäivät alle 80 % kuormitusasteen rajan. Sen sijaan varasyöttötilannetta tarkasteltaessa jo 2/3 runkojohdoista ylittävät silmukoidun 50 %-kuormitusasteen rajan. Samalla jännitteenalenemat kasvavat selvästi, mikä korostaa sähköautojen latauksen merkittävää vaikutusta runkojohtojen kuormittumiseen.

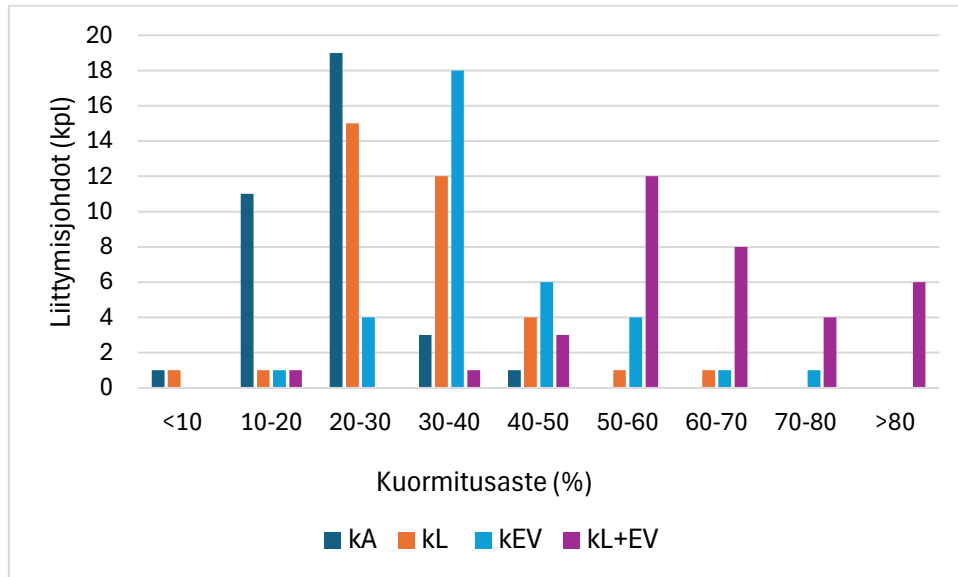
Suurimmat muutokset havaitaan yhdistelmäskenaariorissa, jossa kuormitus kasvaa merkittävästi. Tällöin 2/3 runkojohdoista ylittää säteittäisen verkon kuormitusasteen rajan, ja varasyöttötilanteessa kaikki runkojohdot ylittävät kuormitusrajan. Lisäksi kuormittuneimman runkojohdon maksimiarvo kasvoi noin 170 % lähtötilanteeseen verrattuna, mikä kuvastaa yhdistelmäskenaarion vaikutuksen voimakkuutta runkojohdoilla.

Samanaikaisesti jännitteenalenemat ovat kaikilla runkojohdoilla yli sallittujen rajojen tai aivan maksimissaan. Tämä osoittaa, että runkojohdot ovat nykytilassa absoluuttisessa maksimissa ja niillä ei ole käytännössä lainkaan ylimääräistä kapasiteettia kuormituksen kasvulle.

Sähköautojen lataus kasvattaa runkojohtojen kuormitusta ja jännitteenalenemaa enemmän kuin pelkkä sähkölämmitys. Kuormitusten yhdistyessä vaikutukset eivät ainoastaan kasva, vaan johtavat useissa tapauksissa verkon ylikuormittumiseen. Tämä osoittaa, että kuormitusten samanaikaisuus muodostuu runkojohtojen mitoituksen kannalta keskeiseksi haasteeksi.

7.3.3 Liittymisjohtojen kuormitusasteet

Liittymisjohtojen kuormitusasteet eri kuormitusskenaarioissa esitetään kuvassa 17.



Kuva 17. Liittymisjohtojen kuormitusasteet eri skenaarioissa.

Lämpötilakorjatussa lähtötilanteessa liittymisjohtojen kuormitusasteet pysyvät pääosin alhaisina, ja siirtokapasiteettia on riittävästi nykytilassa.

Sähkölämmityskuorman lisääminen kasvattaa odotetusti liittymisjohtojen kuormitustasetta ja siirtää jakaumaa kohti korkeampia kuormitusluokkia, mutta kuormitustasot pysyvät vielä pääosin kohtuullisina. Sähköautoskenaariossa kuormitusastejakauma painottuu entistä selvemmin korkeampiin kuormitusluokkiin. Tämä osoittaa sähköautojen latauksen lisäävän liittymisjohtojen hetkellisiä huipputehotarpeita erityisesti samanaikaisten lataustilanteiden aikana. Lämmityksen ja sähköauton yhdistelmäskenaariossa kuormitusasteiden jakauma muuttuu merkittävästi lähtötilanteesta, sillä 17 % liittymisjohtoista ylittää 80 % kuormitusasteen.

7.3.4 Jännitteenalenemat liittymillä

Liittymisjohtojen jännitteenalenemien tarkasteluun liittyy epätarkkuutta, koska verkkomallissa kuormitukset on laskettu aggregoituna. Tämän vuoksi liittymäkohtaisen jännitteenalenemien tarkkoja arvoja ei voida arvioida yhtä luotettavasti kuin runkojohdoilla. Tarkastelu kuitenkin antaa hyvän yleiskuvan jännitetasojen muutoksista eri skenaarioissa.

Lämpötilakorjatussa lähtötilanteessa liittymillä ei havaita jännitelaatuongelmia. Sähkölämmitysskenaariossa jännitteenalenemat pysyvät säteittäisessä käyttötilanteessa sallituissa rajoissa, kun taas silmukoidussa käyttötilanteessa noin 11 % liittymistä ylittää 7 % jännitteenaleneman rajan.

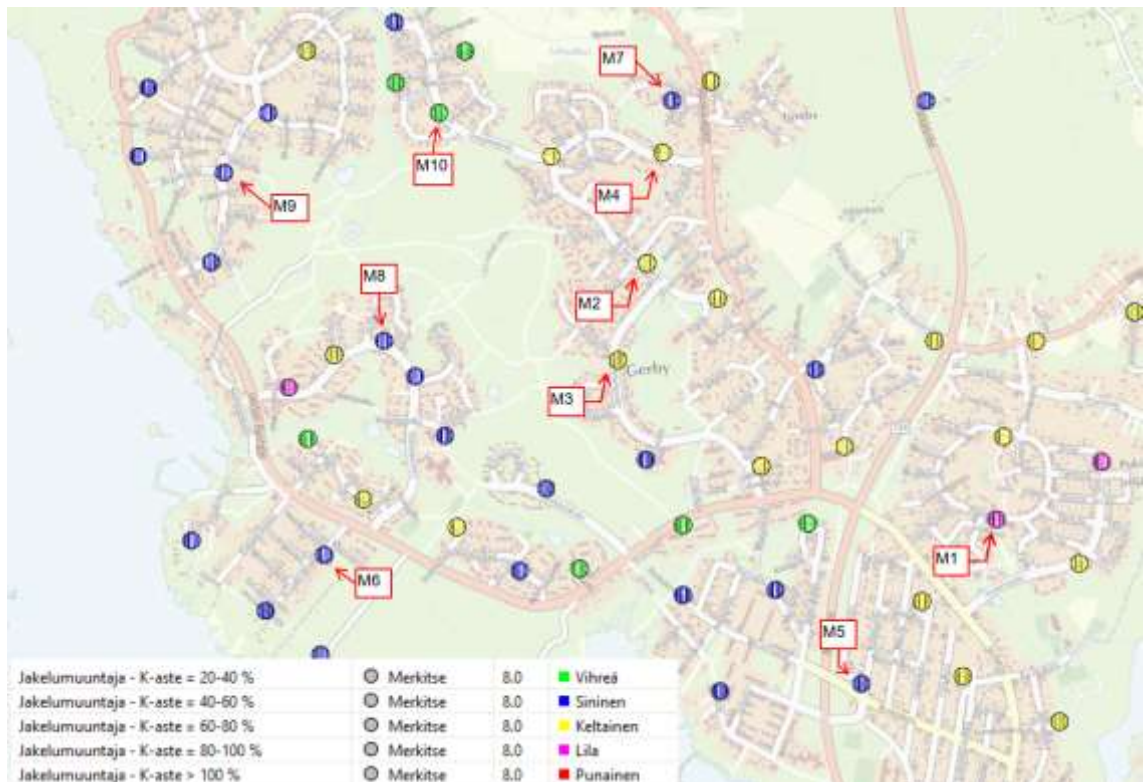
Sähköautoskenaariossa jännitteenalenemat kasvavat edelleen, jolloin noin 6 % liittymistä ylittää säteittäisen 10 % rajan ja noin 29 % liittymistä ylittää silmukoidun rajan. Tämä kuvastaa sähköautojen latauksen lisäämän kuormituksen samanaikaisuuden vaikutusta jännitetasoihin.

Suurimmat muutokset havaitaan sähkölämmityksen ja sähköautojen yhdistelmäskenaariossa, jossa noin 63 % liittymistä ylittää 10 % jännitteenaleneman rajan ja noin 97 % liittymistä ylittää 7 % rajan.

Tulokset osoittavat, että jännitetasot liittymillä heikkenevät merkittävästi kuormituksen kasvaessa, erityisesti yhdistelmäskenaariossa. Vaikka yksittäiset kuormitusskenaariot aiheuttavat vielä suhteellisen rajallisia vaikutuksia, sähkölämmityksen ja sähköautojen latauksen yhteisvaikutus muodostaa liittymisjohtojen kannalta selvästi kriittisimmän tilanteen.

7.4 Vaikutusten tarkastelu useissa muuntopiireissä

Kuvassa 18 esitetään muuntajat M1-M10 sähkölämmitteisellä pientaloalueella, jossa tarkastellaan sähkölämmityksen ja sähköautojen latauksen yhdistelmäskenaariota. Muuntajien nykytilan kuormitusasteet ovat esitetty värikoodein.



Kuva 18. Sähkölämmitteinen pientaloalue.

Nykytilanteessa suurin osa muuntajista toimii kuormitusasteella 40–80 %, mikä viittaa kohtuulliseen kuormitustasoon ennen skenaariotarkastelua.

Taulukossa 6 esitetään muuntajien nimellistehot S_N , kuormitusasteet sähkölämmityksen ja sähköauton latauksen yhdistelmäskenaariossa sekä näistä johdetut maksimikuormitukset S_{MAX} . Lisäksi taulukossa havainnollistetaan kuormituksen suhdetta säteittäisen (RN) ja silmukoidun (MN) verkon raja-arvoihin kyseisillä muuntamotyypeillä.

Taulukko 6. Muuntajien nimellistehot, maksiminäennäisteho, kuormitusasteet ja raja-arvojen ylitykset yhdistelmäskenaariossa (harmaalla korostettu raja-arvojen ylitykset).

JM	S_n (kVA)	S_{MAX} (kVA)	K-ASTE (%)	$KA_{RAJA,RN}$ (%)	$KA_{RAJA,MIN}$ (%)	$KA_{YLI/ALI,RN}$ (%)	$KA_{YLI/ALI,MIN}$ (%)
M1	800	2464	308	130	91	178	217
M2	800	1694	212	110	77	102	135
M3	800	1664	208	110	77	98	131
M4	800	1984	248	110	77	138	171
M5	500	875	175	130	91	45	84
M6	500	800	160	130	91	30	69
M7	500	775	155	130	91	25	64
M8	500	865	173	110	77	63	96
M9	780	562	72	110	77	-38	-5
M10	500	485	97	130	91	-33	6

Suurimmalla osalla muuntajista kuormitusasteet ylittävät merkittävästi sallitut raja-arvot kummassakin verkkorakenteessa. Taulukossa 6 sallitut kuormitusasteet ylittävät arvot on merkitty harmaalla värillä. Prosenttiosuudet kuvaavat raja-arvojen ylitysten määrää sekä silmukoidussa että säteittäisessä verkkorakenteessa. Useilla muuntajilla kuormitus on jopa 2–3-kertainen raja-arvoihin nähden, mikä viittaa laaja-alaiseen ylikuormittumiseen. Erityisesti muuntamot M1-M4 erottuvat joukosta suurimpina kuormitustapauksina.

Lisäkapasiteetin tarpeessa pelkkä muuntajan vaihtaminen suurempaan ei kuitenkaan ole riittävä ratkaisu, sillä puistomuuntamoiden fyysiset koot ja ilmanvaihto rajoittavat muuntajakoon kasvattamista. Esimerkiksi peltikioskimuuntamoissa 1000 kVA:n muuntaja on tyypillisesti suurin käytettävissä oleva kokoluokka, kun taas pienemmissä satelliittimuuntamoissa vastaava yläraja on tyypillisesti 315 kVA. Myöskään muuntamoiden lisääminen asemakaava-alueilla ei ole yksinkertaista, sillä niiden sijoituspaikat on määritelty tarkasti kaavoituksessa. Huipputehojen hallinta nousee tulevaisuudessa merkittävään rooliin siis myös näiden rakenteellisten rajoitteiden ja muuntamoiden sijoitteluun liittyvien haasteiden vuoksi. Huipputehon kasvua ei voida ratkaista pelkästään verkon komponentteja suurentamalla, vaan sitä on tarpeen rajoittaa ja hallita tehokkaasti verkon toiminnan turvaamiseksi.

Runkojohtojen tarkastelu osoittaa, että nykytilanteessa verkko toimii pääosin sallittujen raja-arvojen sisällä sekä normaali- että varasyöttötilanteessa. Kuormitusasteen ylityksiä

havaitaan ainoastaan kuudella runkojohdolla, mikä vastaa noin 4 % kaikista tarkastelluista runkojohdoista. Jännitteenalenemat pysyvät lähes kaikilla johdoilla sallituissa rajoissa. Tämä viittaa siihen, että runkoverkolla on nykytilanteessa riittävä siirtokapasiteetti eikä merkittäviä jännitteenlaatuongelmia esiinny.

Sähkölämmityksen ja sähköauton yhdistelmäskenaariossa tilanne muuttuu olennaisesti. Säteittäisen verkon kuormitusasteen raja-arvo ylittyy 85 runkojohdolla, mikä vastaa noin 56 % kaikista runkojohdoista. Vastaavasti silmukoidun verkkorakenteen rajat ylittävät 121 tapauksessa, mikä vastaa 79 %. Raja-arvojen ylitykset eivät myöskään ole mitenkään maltillisia, vaan esimerkiksi eniten kuormittuneella muuntopiirillä M1 korkein havaittu kuormitusaste runkojohdolla oli noin 230 %.

Myös jännitteenalenemat kasvavat selvästi skenaariossa. Säteittäisen verkon jännitteenaleneman raja ylittyy noin 46 % runkojohdoista, ja silmukoidun verkon raja ylittyy noin 75 % tapauksista. Tämä osoittaa jännitelaadun heikkenemisen olevan laaja-alaista koko runkoverkossa eikä rajoittuvan yksittäisiin johtimiin.

Liittymätasolla nykytilanteessa esiintyy vain satunnaisia kuormitusasteen ja jännitteenaleneman raja-arvojen ylityksiä. Vain yksi liittymisjohto ylitti yli 60 % kuormitusasteen, ja jännitteenalenemissa ei havaittu ylityksiä. Sähkölämmityksen ja sähköauton yhdistelmäskenaariossa 80 % kuormitusaste ylittyi 172 liittymisjohdolla, mikä vastaa noin 26 %. Tämän lisäksi 60 % kuormitusasteen ylitti 338 liittymisjohtoa, mikä vastaa noin 50 % kaikista liittymisjohdoista.

Jännitteenlaadussa havaittiin myös vakavia haasteita, sillä sallitun 10 % jännitteenaleneman arvo ylittyi 256 liittymällä eli noin 38 % liittymistä. VarakytKentätilanteen varalta vastaava ylitys oli jopa 513 liittymällä, mikä vastaa noin 77 %.

Samanaikainen sähkölämmityksen ja sähköauton lataus heikentää merkittävästi verkon suorituskykyä laajasti niin muuntaja, runkojohto kuin liittymätasolla. Nykytilassa verkon

käyttövarmuus on hyvällä tasolla, mutta tarkasteltu yhdistelmäskenaario aiheuttaa laajalaisia kapasiteetti- ja jännitteenlaatuongelmia.

Kokonaisuutena tarkastelu osoittaa, että energiamurros kasvattaa huipputehoa merkittävästi sekä jakelumuuntajien että liittymien tasolla. Samalla verkon vikakestävyys heikenee ja kapasiteettivajeet korostuvat erityisesti varasyöttötilanteissa. Tämä tekee kuormituksen hallinnasta ja verkon kehittämistoimenpiteistä keskeisiä tekijöitä jakeluverkon toiminnan turvaamisessa tulevaisuudessa.

7.5 Kuormitusasteet kaikilla jakelumuuntajilla

Vaasan Sähköverkon jakelumuuntajien kuormitusasteita tarkastellaan nykytilassa sekä sähkölämmityksen ja sähköauton latauksen yhdistetyssä skenaariossa $KEV+L$. On huomiotava, että jakelumuuntajia ei ole luokiteltu alueen tai muuntopiirin käyttöpaikkojen lämmitysmuodon mukaan. Tarkastelussa oletetaan, että sähkölämmitteisten asuinalueiden jakelumuuntajien kuormitusasteiden jakauma olisi sama kuin kaikilla semmoisilla jakelumuuntajilla, jotka eivät ole pylväsmuuntamoissa.

Nykytilassa jakelumuuntajien kuormitustaso on pääosin välillä 31–60 %. Korvausten toteuttaminen suurimmalta osalta on mahdollista, sillä vain 1,9 % jakelumuuntajista ylittää säteittäisen verkon rajan. Silmukoidussa verkkorakenteessa, jossa korvauskytkentää ei tarvitse huomioida, sallittu kuormitusaste ylittyy vain 0,1 % jakelumuuntajista.

Sähkölämmityksen ja sähköauton latauksen yhteisvaikutuksessa jakelumuuntajien kuormitus painottuu selvästi korkeille kuormitusasteille, ja merkittävä osa muuntamoista kuormittuu lähelle tai yli sen nimellistehonsa. Verkossa, jossa korvauskytkentätilanne on huomiotava 78,6 % jakelumuuntajista ylittää raja-arvon. Silmukoidussa verkossa, jossa korvauskytkennän mahdollisuutta ei tarvitse huomioida vastaava osuus on 62 %.

Kuormituksen kasvu voi johtaa laajamittaiseen ylikuormitukseen eikä nykyinen jakelumuuntajien mitoitus pysty vastaamaan energiamurroksen myötä kasvavaan kuormitukseen normaalitilanteessa, ja jakelumuuntajien tilanteen ongelmallisuus korostuu entistään korvauskytkentätilanteissa. Tämä korostaa verkon kapasiteetin kasvattamisen tarvetta sekä kuormanhallintaratkaisujen hyödyntämistä tulevaisuudessa.

8 Johtopäätökset

Työssä saatujen tulosten perusteella sähkölämmityksen ja liikenteen sähköistyminen sekä kuormien ohjautuminen hintasignaalien perusteella voivat muuttaa tehoprofiilien rakennetta olennaisesti. Lähtötilanteessa profiilit ovat suhteellisen tasaisia ja ennustettavia, mutta hintapohjainen ohjaus voi johtaa kulutuksen kasautumiseen yksittäisille edullisille tunneille. Tämä vähentää kuormien risteilyä ja tekee tehoprofiileista aiempaa piikkimäisempiä ja vaikeammin ennustettavia.

Liittymätasolla energiamurros kasvattaa huipputehoa merkittävästi. Jo pelkkä sähkölämmityksen hintapohjainen ohjaus voi lähes kaksinkertaistaa liittymien huipputehon lähtötilanteeseen verrattuna. Sähköautojen latauksen vaikutus on vielä merkittävämpi, ja erityisesti vakioaikainen lataus kasvattaa huipputehoja ruuhka-aikoina, jopa nelinkertaiseksi lähtötilanteeseen verrattuna. Hintapohjaisesti optimoitu lataus puolestaan muodostaa lyhytkestoisia, mutta erittäin korkeita tehopiikkejä, jotka ovat verkon mitoituksen kannalta kriittisiä.

Suurimmat vaikutukset havaitaan sähkölämmityksen ja sähköautojen latauksen yhdistelmäskenaariossa, jossa liittymätason huipputeho ylittää nykyisen liittymäkoon nimellistehorajan. Nykyiset liittymäkoot eivät kaikissa tilanteissa riitä vastaamaan kasvavaan tehon tarpeeseen ilman kuormituksen hallintaa tai liittymäkapasiteetin kasvattamista.

Muuntopiiritasolla lähtötilanteessa kuormitus pysyy selvästi muuntajan nimellistehon alapuolella, mikä osoittaa, että muuntajalla on kapasiteettivaraa niin normaalissa käyttötilanteessa kuin korvauskytkentätilanteessa.

Sähkölämmityksen ja sähköautojen latauksen yhdistelmäskenaariossa huipputeho kasvaa noin 135 kW tasolta yli 400 kW:iin, eli yli kolminkertaiseksi, ja ylittää selvästi muuntajan nimellistehon. Verkon mitoituksen kannalta ratkaisevaa ei ole yksittäisten kuormien suuruus, vaan niiden samanaikainen ajoittuminen, joka voi johtaa kapasiteetin ylitymiseen.

Tutkimuskysymyksiin vastaten voidaan todeta, että energiamurros voi enimmillään kasvattaa sähkölämmitteisten pientaloalueiden huipputehoja moninkertaisiksi nykytilanteeseen verrattuna. Vaikutukset korostuvat erityisesti tilanteessa, jossa sähkölämmitys ja sähköautojen lataus ajoittuvat samanaikaisesti.

Kymmenen muuntopiirin tarkastelussa havaitaan, että energiamurroksen vaikutukset eivät rajoitu yksittäisiin verkon osiin, vaan voivat aiheuttaa laaja-alaista ylikuormittumista koko jakeluverkossa. Nykytilassa verkossa on vielä kapasiteettivaraa, mutta tarkasteltu yhdistelmäskenaario osoittaa, että kapasiteetti ei riitä tilanteissa, joissa kuormitus kasautuu voimakkaasti ajallisesti. Yhdistelmäskenaariossa muuntajien kuormitusasteen raja-arvot ylitetään säteittäisessä käyttötilanteessa noin 80 % tapauksista ja varasyöttötilanteessa jopa noin 90 % tapauksista, mikä korostaa varasyöttötilanteen erityistä kriittisyyttä.

Runkojohtojen kuormitusasteet ja jännitteenalenemat kasvavat laajasti, mikä heikentää koko verkon suorituskykyä. Kuormitusasteiden raja-arvot ylitetään säteittäisessä käyttötilanteessa noin 56 % runkojohdoista, mikä korostaa nykyisen verkon kapasiteetin riittämättömyyden tulevaisuudessa. Samansuuntainen kehitys havaitaan myös liittymätasolla, jossa kuormituksen ajallinen kasautuminen aiheuttaa jännitteenlaatuongelmia.

Mikäli yhdistelmäskenaariota vastaava kehitys toteutuisi koko verkkoalueella, 62 % kaikista jakelumuuntajista ylittää hyväksyttävän kuormitusasteen. Tämä viittaa laaja-alaiseen ylikuormitustilanteeseen ja osoittaa nykyisten jakelumuuntajien mitoituksen olevan riittämätön vastaamaan tulevaisuuden kuormitusprofiileita.

Sähkölämmityksen ja sähköautojen latauksen yhteisvaikutus muodostaa verkon kannalta kriittisimmän tilanteen. Kuormitusten samanaikaisuus voi kasvaa merkittävästi, mikä johtaa huipputehojen voimakkaaseen kasvuun ja verkon kapasiteetin ylittymiseen useissa tarkastelutapauksissa. Ilmiö korostuu erityisesti hintasignaali ohjauksessa, jossa suuri määrä kuormia reagoi samanaikaisesti samoihin edullisiin ajanjaksoihin.

Tässä työssä tarkasteltiin pahimman tapauksen skenaarioita, jossa sähkölämmitteisen pientaloalueen tarjoama joustopotentiali hyödynnetään lähes kokonaisuudessaan ja siten edustavat joustopotentialin ylärajaa pientaloalueella. Todellinen jouston tarve ja sen kohdentuminen sähköjärjestelmässä voivat kuitenkin poiketa tarkastelluista. Tämä luo tarpeen jatkotutkimukselle, jossa tarkastellaan sitä kuinka paljon sähkölämmitteisillä asuinalueilla olevaa joustopotentialia kannattaa kokonaistaloudellisesti tarkasteltuna hyödyntää verrattuna muihin tehotasapainoa ylläpitäviin ratkaisuihin.

Lisäksi on tarpeen arvioida, missä määrin huipputehojen kasvua voidaan tasata hyödyntämällä olemassa olevaa tehokapasiteettia. Keskeiseksi kehitystarpeeksi nousee myös nykyisten hinnoittelurakenteiden tarkastelu. Esimerkiksi energiapohjaiset siirtotuotteet eivät kannusta kuluttajia tasaamaan huipputehoa. Päinvastoin energiapohjainen siirtotuote yhdessä hintasignaaleihin perustuvan kuorman ohjauksen kanssa voi johtaa kuluksen samanaikaisuuteen, mikä edelleen kasvattaa huipputehoja. Ilman ohjauskeinojen ja hinnoittelurakenteiden kehittämistä energiamurros voi johtaa tilanteeseen, jossa verkon kapasiteetti ei riitä kattamaan kasvavaa ja ajallisesti kasaantuviin huipputehoihin.

Keskeiset tulokset osoittavat, että energiamurros asettaa merkittäviä haasteita jakeluverkkoyhtiölle, sillä kuormituksen ajallinen kasaantuminen heikentää verkon käyttövarmuutta ja voivat johtaa laaja-alaiseen ylikuormittumiseen. Nykyinen verkko on mitoitettu perinteisen tehoprofiilien mukaan eikä se vastaa tilanteisiin, jossa suuri osa kuormasta aktivoituu samanaikaisesti. Samalla verkon vahvistaminen on usein hidasta, kallista ja osin rakenteellisten rajoitteiden vuoksi vaikeasti toteutettavissa, mikä korostaa kuormanhallinnan ja kysyntäjouston merkitystä.

Energiamurros voi muuttaa kuormituksen luonnetta niin, että kuorman vaihtelut eivät enää ole aiempaan tapaan maltillisia. Tämän seurauksena verkon mitoituksen kannalta entistä keskeisemmäksi tekijäksi nousee kulutuksen samanaikaisuus eikä kokonaisenergiakulutuksen määrä.

Nykyinen pienjänniteverkko ei kykene vastaamaan sähkölämmitteisten asuinalueiden joustopotentiaaliin laajaan hyödyntämiseen tehotasapainon hallinnassa ilman lisätoimenpiteitä, eikä pelkkä verkon kapasiteetin kasvattaminen ole riittävä ratkaisu. Keskeiseen rooliin nousee kuormahallinta ja kysyntäjousto, joiden avulla huipputehoja voidaan tasata ja verkon toimintavarmuus säilyttää.

9 Yhteenveto

Tässä työssä tarkasteltiin energiamurroksen vaikutuksia pienjänniteverkkoon sähkölämmitteisellä pientaloalueella skenaariopohjaisen mallinnuksen avulla. Tarkastelussa keskityttiin siihen, miten spot-hintaan reagoiva rakennusten lämmitys, lämminvesivaraaja sekä sähköautojen lataus muuttavat tehoprofiileja, ja miten ne vaikuttavat huipputehoihin sekä kuormittavat verkkoa.

Tulokset osoittavat, että energiamurros voi muuttaa kuormitusprofiileja merkittävästi. Kuormien reagoiminen sähkön spot-hintaan keskittää kuormitusta samoille edullisille tunneille, mikä johtaa aiempaa voimakkaammin vaihteleviin ja vaikeammin ennustettaviin tehoprofiileihin. Huipputeho voi kasvaa merkittävästi erityisesti sähkölämmityksen ja sähköautojen latauksen yhteisvaikutuksesta.

Liittymätasolla huipputeho voi kasvaa moninkertaiseksi nykytilanteeseen verrattuna, ja muuntopiiritasolla kuormitus voi ylittää muuntajien nimellistehon erityisesti sähkölämmityksen ja sähköauton latauksen yhdistelmäskenaariossa. Kuormien ajallinen päällekkäisyys voi lisätä kuormitusta ja aiheuttaa jännitealenemia laajasti muuntopiiritasolla, mikä heikentää verkon suorituskykyä.

Tulosten perusteella pienjänniteverkon kapasiteetti ei riitä kaikissa tilanteissa, erityisesti kuormien ajoittuessa samalle hetkelle, jolloin kuormanhallinnan ja kysyntäjouston merkitys korostuu.

Lähteet

- Aura, M. (2025). *Role of Distributed Flexibility in Distribution Network Operation and Planning*. [diplomityö, Aalto-yliopisto]. Aaltodoc. <https://urn.fi/URN:NBN:fi:aalto-202503172810>
- Autoalan tiedotuskeskus. (2024). *Autoalan käyttövoimaennusteet Ennusteet eri käyttövoimien yleistymisestä ensirekisteröinneissä ja autokannassa*. Noudettu 9.1.2026 osoitteesta <https://aut.fi/autoalan-kayttovoimaennuste-2024/>
- Corchero, S., González-Villafranca, M., & Sanmartí, M. (2014). *European electric vehicle fleet: Driving and charging data analysis*. Paper presented at the 2014 IEEE International Electric Vehicle Conference (IEVC), Florence, Italy, 1–6. <https://doi.org/10.1109/IEVC.2014.7056144>
- Energiateollisuus ry. (2024, maaliskuu 27). *Kysely eri sopimustyyppien osuuksista helmikuussa 2024*. Noudettu 11.3.2026 osoitteesta <https://energia.fi/artikkeli/kysely-eri-sopimustyyppien-osuuksista-helmikuussa-2024/>
- Energiateollisuus ry. (2022). *Kaapeloitujen PJ-liittymisjohtojen mitoitus ja suojaus (SA 4:22)*. Energiateollisuus ry.
- Energiavirasto. (2025a). *Aurinkosähkön tuotantokapasiteetti kasvoi 24 % vuonna 2024*. Noudettu 26.3.2026 osoitteesta <https://energiavirasto.fi/-/aurinkosahkon-tuotantokapasiteetti-kasvoi-24-vuonna-2024>
- Energiavirasto. (2025b). *Pörssisähkö reilulla kolmasosalla kotitalouksista – määräaikaiset yhä yleisin sopimustyyppi vuonna 2024*. Noudettu 10.3.2026 osoitteesta <https://energiavirasto.fi/-/porssisahko-reilulla-kolmasosalla-kotalouksista-maaraaikaiset-yha-yleisin-sopimustyyppi-vuonna-2024>
- Energiavirasto. (2025c). *Kotitalouksien sähkölasku pieneni lähes seitsemän prosenttia vuonna 2024*. Noudettu 12.2.2026 osoitteesta <https://energiavirasto.fi/-/kotitalouksien-sahkolasku-pieneni-lahes-seitseman-prosenttia-vuonna-2024>
- Gamma, K., Mai, R., Cometta, C., & Loock, M. (2021). *Engaging customers in demand response programs: The role of reward and punishment in customer adoption*. *Energy Research & Social Science*. Noudettu 17.5.2026 osoitteesta <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2214629621000207>

- Good, N., Ellis, K. A., & Mancarella, P. (2017). Review and classification of barriers and enablers of demand response in the smart grid. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 72, 57–72. Noudettu 30.5.2026 osoitteesta <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.01.043>
- Fingrid. (n.d.-a). *Johdanto sähkömarkkinoihin*. Noudettu 14.6.2026 osoitteesta <https://www.fingrid.fi/sahkomarkkinat/markkinoiden-yhtenaisyyss/johdanto-sahkomarkkinoihin>
- Fingrid. (n.d.-b). *Kulutusjousto*. Noudettu 12.1.2026 osoitteesta <https://www.fingrid.fi/sahkomarkkinat/markkinoiden-yhtenaisyyss/sahkomarkkinoiden-kehityshankkeet/kysyntajousto/>
- Fingrid. (2025). *Sähköjärjestelmävisio 2040: Loppuraportti*. Noudettu 15.3.2026 osoitteesta https://www.fingrid.fi/globalassets/dokumentit/fi/kantaverkko/kantaverkon-kehittaminen/sahkojarjestelmavisio-2025/fingrid-sahkojarjestelmavisio-2040.-loppuraportti-10_2025.pdf
- Haakana, J., Haapaniemi, J., Lamminpää, A., & Lassila, J. (2024). *Sähkömarkkinan hintavolatiliteetin vaikutukset sähkön kulutusjoustoön ja sähkönjakelujärjestelmään* [tutkimusraportti, Lappeenrannan-Lahden teknillinen yliopisto LUT]. Noudettu 8.1.2026 osoitteesta <https://lutpub.lut.fi/bitstream/handle/10024/168780/Hintajousto%20raportti%20-%20full.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Harsia, P., Järventausta, P., Hilden, A., Kallioharju, K., Kortetmäki, A., Koskela, J., Mutanen, A., Rautiainen, A., Supponen, A., Uusitalo, S., & Heljo, J. (2019). *SÄTE-opas : Opas pientalojen suunnitteluun: Sähkätehojen hallinta osana rakennuksen energiatehokkuutta*. Tampereen yliopisto. <http://urn.fi/URN:ISBN:978-952-03-1078-3>
- Honkapuro, S., Sihvonen, V., Partanen, J., Harsia, P., Kallioharju, K., Kortetmäki, A., Järventausta, P., Repo, S., Remes, L., & Ketomäki, J. (2020). *Jousto 2035 -visio: Energiajärjestelmän jouston tarpeet ja toteutuspotentiaali 2035*. Noudettu 23.6.2026 osoitteesta <https://urn.fi/URN:ISBN:978-952-335-582-8>
- IEA. (2023a, 31. maaliskuuta). *Global heat pump sales continue double-digit growth*. Noudettu 23.4.2026 osoitteesta <https://www.iea.org/commentaries/global-heat-pump-sales-continue-double-digit-growth?>

- IEA. (2023b). *Demand response*. Noudettu 20.2.2026 osoitteesta <https://www.iea.org/energy-system/energy-efficiency-and-demand/demand-response>
- IEA. (n.d.). Demand Side Management Energy Efficiency. Noudettu 20.2.2026 osoitteesta <https://nachhaltigwirtschaften.at/en/iea/technologyprogrammes/dsm>
- Ilmatieteen laitos. (n.d.). Havaintojen latauspalvelu. Noudettu 1.7.2025 osoitteesta <https://www.ilmatieteenlaitos.fi/havaintojen-lataus>
- Jaakkola, H. (2024). Sähköä säilövien kotiakkujen hinta laski alle kymppitonniin – mutta voiko niillä tienata? *Tekniikan Maailma*, 22A/2024. Noudettu 3.04.2026 osoitteesta <https://tekniikanmaailma.fi/lehti/22a-2024/aurinkoenergia-ja-halpa-porssisahko-talteen-ja-myyntiin-isot-kotiakut-tulossa-suomeenkin/>
- Järventausta, P., Repo, S., Trygg, P., Rautiainen, A., Mutanen, A., Lummi, K., ... Belonogova, N. (2015). *Kysynnän jousto – Suomeen soveltuvat käytännön ratkaisut ja vaikutukset verkkoyhtiöille (DR pooli) [loppuraportti]*, Tampereen teknillinen yliopisto]. <http://URN.fi/URN:ISBN:978-952-15-3485-0>
- Korpinen, L. (toim.). (2008). *Sähkövoimatekniikkaopus: Sähkön siirto- ja jakeluverkot*. Noudettu 30.5.2026 osoitteesta http://leenakorpinen.com/archive/svt_opus/3sahkon_siirto_ja_jakeluverkot.pdf
- Korhonen, E., Orrberg, M., Linja-aho, V., Mäkinen, J., & Sähkötieto. (2019). *Sähköautot ja latausjärjestelmät*. Sähköinfo Oy. ISBN:978-952-231-269-3.
- Lakervi, E., & Partanen, J. (2009). *Sähkönjakelutekniikka* (2. uud. p.). Gaudeamus Helsinki University Press. ISBN:978-951-672-359-7.
- Lämmitysenergia Yhdistys ry. (2024). Hybridilämmitys: Tulevaisuuden lämmitysratkaisu. Noudettu 12.1.2026 osoitteesta <https://oljylammitys.fi/2024/01/30/hybridilammitys-tulevaisuuden-lammitysratkaisu/>
- Manner, P. (2024). *Opportunities of households to contribute to primary frequency regulation in power systems: Proof of concepts* [väitöskirja, Lappeenranta-Lahti University of Technology LUT]. <https://urn.fi/URN:ISBN:978-952-412-063-0>
- Motiva. (2025a, kesäkuu 4). *Uusiutuva energia – sähkön pientuotanto*. Noudettu 26.3.2026 osoitteesta <https://www.motiva.fi/asiantuntijat/milja-aarni/>

- Motiva. (2025b, helmikuu 28). *Sähköautot*. Noudettu 10.10.2025 osoitteesta [https://www.motiva.fi/ratkaisut/kestava liikenne ja liikkuminen/va-litse auto viisaasti/ajoneuvotekniikka/moottoritekniikka/sahkoautot](https://www.motiva.fi/ratkaisut/kestava_liikenne_ja_liikkuminen/va-litse_auto_viisaasti/ajoneuvotekniikka/moottoritekniikka/sahkoautot)
- Motiva. (2024). *Kotiautomaatio tuo pientaloon energiatehokkuutta, asumismukavuutta ja säästöjä*. Noudettu 17.2.2026 osoitteesta <https://www.motiva.fi/tietopankki/kotiautomaatio-tuo-pientaloon-energiatehokkuutta-asumismukavuutta-ja-saastoja/>
- Motiva. (2025c, 6. helmikuuta). *Vedenkulutus kotitalouksissa* [Verkkosivu]. Noudettu 13.10.2025 osoitteesta [https://www.motiva.fi/koti ja asuminen/energiatehokas arki/vedenkulutus](https://www.motiva.fi/koti_ja_asuminen/energiatehokas_arki/vedenkulutus)
- Motiva. (n.d.-d). *Kodin käyttöveden lämmitys*. Noudettu 6.4.2026 osoitteesta <https://www.motiva.fi/tietopankki/kodin-kayttoveden-lammitys/>
- Motiva. (n.d.-e). *Kodin sähkönkäyttö, sähkösovimukset ja kulutuksen ohjaus*. Noudettu 7.6.2026 osoitteesta <https://www.motiva.fi/kodin-sahkonkaytto-sahkosopimukset-ja-kulutuksen-ohjaus/>
- Motiva. (n.d.-f). *Lämpöpumput*. Noudettu 12.1.2026 osoitteesta [https://www.motiva.fi/ratkaisut/uusiutuva energia/lampopumput?view_status=preview](https://www.motiva.fi/ratkaisut/uusiutuva_energia/lampopumput?view_status=preview)
- Nord Pool. (n.d.). *Price calculation*. <https://www.nordpoolgroup.com/en/trading/Day-ahead-trading/Price-calculation/>
- Numminen, S., Silvikko de Villafranca, M., & Hyysalo, S. (2023). *Päälämmityslähteestä monilämmitykseen: Suomalaisista pientaloista on tullut toisiaan täydentävien ja vuorottelevien energiajärjestelmien hybrideitä*. Noudettu 23.6.2026 osoitteesta [https://www.aka.fi/contentassets/bf46225c76ac4862b20f3ad4f724c8ca/12.-2023 numminen et al.pdf](https://www.aka.fi/contentassets/bf46225c76ac4862b20f3ad4f724c8ca/12.-2023_numminen_et_al.pdf)
- Pörssisähkö.net. (n.d.). *Tilastot*. Noudettu 26.5.2026 osoitteesta <https://porssi-sahko.net/tilastot>
- Recharge Infra. (n.d). *Miksi akku latautuu hitaasti pika- ja suurteholatureilla?* <https://rechargeinfra.com/fi/miksi-akku-latautuu-hitaasti-pika-ja-suurteholatureilla/>
- Suomen Standardisoimisliitto SFS ry. (2022). *Yleisestä jakeluverkosta syötetyn sähkön jänniteominaisuudet (SFS-EN 50160)*.

- Salo, A. (2026). *Nykytila-analyysi 2026*. Vaasan Sähköverkko Oy. Sisäinen aineisto [rajattu pääsy].
- STT Info. (2022, 6. lokakuuta). *Lämpöpumppujen käyttö lisääntynyt – öljy painumassa marginaaliin* [tiedote]. Noudettu 23.4.2026 osoitteesta <https://www.sttinfo.fi/tiedote/69953489/lampopumppujen-kaytto-lisaantynyt-oljy-painumassa-marginaaliin>.
- Svarc, J. (2024). *Best Smart EV chargers*. *Clean Energy Reviews*. Noudettu 27.2.2026 osoitteesta <https://www.cleanenergyreviews.info/blog/best-smart-ev-chargers>
- Synergi. (2025). *Sähköautojen älylataus ja optimointi Suomessa 2024* [raportti]. Noudettu 10.10.2025 osoitteesta <https://www.synergi.fi/post/electric-vehicle-smart-charging-report>
- Säämäki, F., Ramesh, R., Skorniakov, I., Kostianen, E., & Pesonen, S. (2025). *The impact of electric boilers to the Finnish energy system*. Aalto-yliopisto. Noudettu 16.2.2026 osoitteesta <https://energia.fi/wp-content/uploads/2025/09/the-impact-of-electric-boilers-to-the-finnish-energy-system.pdf>
- Tilastokeskus. (2021). *Asunnot ja asuinolot 2020: Kotitaloudet ja asuntokunnat rakennustyypeittäin*. Noudettu 6.4.2026 osoitteesta [https://stat.fi/til/asas/2020/01/asas_2020_01_2021-10-14_kat_002_fi.html?utm#:~:text=Table title:%20Suomalaisista%20noin%20puolet%20asuu%20omakoti%2D%20ja,Henkil%C3%B6it%C3%A4:%2068%20948%207C%20%25:%201%2C3%20%7C](https://stat.fi/til/asas/2020/01/asas_2020_01_2021-10-14_kat_002_fi.html?utm#:~:text=Table%20title:%20Suomalaisista%20noin%20puolet%20asuu%20omakoti%2D%20ja,Henkil%C3%B6it%C3%A4:%2068%20948%207C%20%25:%201%2C3%20%7C)
- Tilastokeskus. (2024, 11. huhtikuuta). *Asunnon pääasiallinen lämmitystapa talotyypeittäin, 2012–2022*. Noudettu 13.1.2026 osoitteesta https://pxdata.stat.fi/PxWeb/pxweb/fi/StatFin/StatFin_ktutk/stat-fin_ktutk_pxt_13qk.px/table/tableViewLayout1/
- Tilastokeskus. (2025, maaliskuu 3). *Suomen ajoneuvokanta kasvoi vuonna 2024*. Noudettu 26.3.2026 osoitteesta <https://www.stat.fi/julkaisu/moottoriajoneuvokanta-2024>

Traficom. (2024). *Henkilöliikennetutkimus syksy 2024*. Noudettu 10.10.2025 osoitteesta https://www.traficom.fi/sites/default/files/media/publication/HLT_syksy2024_raportti.pdf

Traficom. (2025, 18. marraskuuta). *Jo joka kahdeksas henkilöauto on ladattava hybridi tai sähköauto*. Noudettu 9.1.2026 osoitteesta <https://www.traficom.fi/fi/ajan-kohtaista/jo-joka-kahdeksas-henkiloauto-ladattava-hybridi-tai-sahkoauto>

Vaasan Sähköverkko Oy. (n.d.). Noudettu 31.1.2026 osoitteesta <https://www.vaasansahkoverkko.fi/>

Vaasan Sähköverkko Oy. (2026). *Energiavirastolle toimitettu rakennetieto* [rajattu pääsy].

Verkkouutiset. (2026, helmikuu 16). *Yhä useampi luopuu pörssihintaisesta sopimuksesta*. Noudettu 11.03.2026 osoitteesta <https://www.verkkouutiset.fi/a/porssisahkon-korkea-hinta-sai-monet-vaihtamaan-sopimusta/#b359b929>