



Vaasan yliopisto
UNIVERSITY OF VAASA

Saana Karttunen

Vastus- ja elektrodikattiloiden vertailu sähköteknisestä näkökulmasta

Tekniikan ja innovaatiojohtamisen akateeminen yksikkö
Sähkö- ja energiatekniikka, kandidaatintutkielma
Energia- ja informaatiotekniikan ohjelma

Vaasa 2026

VAASAN YLIOPISTO**Tekniikan ja innovaatiojohtamisen akateeminen yksikkö**

Tekijä:	Saana Karttunen		
Tutkielman nimi:	Vastus- ja elektrodikattiloiden vertailu sähköteknisestä näkökulmasta		
Tutkinto:	Tekniikan kandidaatti		
Koulutusohjelma:	Energia- ja informaatiotekniikan ohjelma		
Opintosuunta:	Sähkö- ja energiatekniikka		
Työn ohjaaja:	Teemu Ovaska		
Valmistumisvuosi:	2026	Sivumäärä:	43

TIIVISTELMÄ:

Suomi on sitoutunut saavuttamaan hiilineutraaliuden vuoteen 2035 mennessä, mikä edellyttää merkittäviä muutoksia energijärjestelmässä. Fossiilisten polttoaineiden käytön vähentyessä tarvitaan vaihtoehtoisia ratkaisuja, jotka mahdollistavat uusiutuvan energian tehokkaan hyödyntämisen. Sähkökattilat ovat nousseet näiden tavoitteiden myötä keskeiseksi ratkaisuksi niiden joustavuuden ja korkean hyötysuhteen ansiosta.

Työn tarkoituksena on avata lukijalle yksinkertaistetusti keskeisimpiä tekijöitä, jotka vaikuttavat vastus- ja elektrodikattiloiden toimintaa sähköteknisestä näkökulmasta ja lopuksi vertailla tietojen perusteella sähkökattiloiden soveltuvuutta eri käyttökohteisiin. Työssä käsitellään tarkemmin kattiloiden muodostamaa sähköistä kuormitusta, tehonsäätöperiaatteita sekä kattiloiden vaikutusta eri jännitetasoilla sähköverkkoon. Tarkastelu rajataan siten, että lämpötekniisiä ilmiöitä ei käsitellä yksityiskohtaisesti. Työn aikana käydään lisäksi läpi sähkökattiloiden vaikutus sähkömarkkinoihin Suomessa, osallisuutta reservimarkkinoille, sekä kattiloiden soveltuvuutta eri käyttökohteisiin.

Työssä vertaillaan lopuksi vastus- ja elektrodikattiloiden eroja ja samanlaisuuksia sähköteknisestä näkökulmasta. Työn tulokset osoittavat, että vastus- ja elektrodikattilat eroavat toisistaan erityisesti sähkötehon muodostumisen, tehonsäätötavan ja teholuokan osalta, mikä vaikuttaa niiden soveltuvuuteen eri käyttökohteissa ja verkkotasolla. Molemmat kattilatyyppit tukevat sähköjärjestelmän joustavuutta ja uusiutuvan energian hyödyntämistä, mutta elektrodikattiloiden merkitys korostuu erityisesti suuritehoisissa sovelluksissa ja sähköjärjestelmän tasapainottamisessa. Sähkökattiloiden yleistyminen lisää kuitenkin sähköverkon kuormitusta, mikä edellyttää verkon kapasiteetin nostamista tulevaisuudessa.

AVAINSANAT: sähkökattila, vastuskattila, elektrodikattila, sähköverkko, tehonsäätö, kysyntäjousto

Sisällys

1	Johdanto	6
2	Sähkökattiloiden historia	8
3	Sähkökattilatekniikka	9
3.1	Vastuskattila	9
3.2	Elektrodikattila	10
4	Sähkökattiloiden muodostama kuormitus ja niiden tehonsäätö	14
4.1	Vastuskattilan kuormituksen ja tehon säätö	14
4.2	Elektrodikattilan kuormituksen ja tehon säätö	16
4.2.1	Upotettujen elektrodien kattila	16
4.2.2	Kattila erillisellä sisäastialla	18
4.2.3	Suihkutusvirtauskattila	19
5	Sähkökattilat osana sähköverkon kuormitusta	21
5.1	Pienjänniteverkko	21
5.2	Keskijänniteverkko	23
5.3	Suurjänniteverkko	25
6	Sähkökattilat jouston mahdollistajina sähköverkossa	27
7	Sähkökattiloiden vaikutus sähkömarkkinoihin	30
8	Sähkökattiloiden vertailu ja käyttökohteet	34
9	Johtopäätökset	37
10	Yhteenveto	39
	Lähteet	40

Kuvat

Kuva 1. Upotettujen elektrodien kattila (Novikov et al., 2023, s.360).	11
Kuva 2. Kattila erillisellä sisäastialla (Novikov et al., 2023, s. 362).	12
Kuva 3. Suihkuvirtauskattila (Novikov et al., 2023, s.365).	12
Kuva 4. Johtokulmasäätö ja jakso-ohjaus (ABB, 2025, s.19).	16
Kuva 5. Elektrodin ja vastaelektrodin sijainnin esitys (Novikov, et al., 2024, s.250).	18
Kuva 6. Suihkutusvirtauskattilan tehon säätö (Vapex, ei pvm.).	20
Kuva 7. Reservituotteet jaoteltuna ryhmiin käyttötarkoituksen mukaan (Kumpulainen, 2025, s.11).	27
Kuva 8. Resesrvituotteiden toimintaperiaatteet ja toiminta kokonaisuutena. (Fingrid, ei pvm. b.)	28
Kuva 9. Reservikohteen aktivointikyvyn mitoitus (Kumpulainen, 2025, s. 33).	29
Kuva 10. Sähkökattiloiden vaikutus sähkön hintaan (Säämäki et al., 2024, s. 15).	31
Kuva 11. Sähkökattilan asennettu kapasiteetti, GW (Säämäki et al., 2024, s.17).	32
Kuva 12. Hinnan kestokäyrä (Säämäki et al., 2024, s.18).	33
Kuva 13. Sähkökattilainvestointeja Suomen kaukolämpöverkkoihin vuoden 2025 alussa (Finess, 2025).	36

Taulukot

Taulukko 1. Koostetaulukko pienjänniteverkon jännitteen laatukriteereistä. (Lakervi & Partanen, 2008, s. 256).	22
Taulukko 2. BID3-simulaatiotulokset skenaarioille, joissa käytetään nykyisiä uusiutuvia energialähteitä (Säämäki et al., 2024, s. 15).	30
Taulukko 3. Tyypilliset teolliset vastuselementtikattilat (Mäki, 2025, s.13).	34
Taulukko 4. Tyypilliset elektrodikattilat kuumaveden tuotannossa (Mäki, 2025, s.31).	35
Taulukko 5. Vastus- ja elektrodikattilan vertailutaulukko.	35

Symbolit

G_e	konduktanssi	S
I	sähkövirta	A
L	elektrodin pituus vedessä	cm
P	sähköteho	W
p	paine	Pa
R	resistanssi	Ω
r_1	elektrodin säde	cm
r_2	vastaelektrodin säde	cm
T	lämpötila	$^{\circ}\text{C}$
U	jännite	V
V_0	vaihejännite	V
σ	veden sähkönjohtavuus	S/cm
σ_w	puhtaan veden sähkönjohtavuus	S/cm

Lyhenteet

aFRR	automatic Frequency Restoration Reserve
FCR-D	Frequency Containment Reserve for Normal operation
FCR-N	Frequency Containment Reserve for Disturbances
FFR	Fast Frequency Reserve
mFRR	manual Frequency Restoration Reserve

1 Johdanto

Kansallisessa ilmasto- ja energiastrategiassaan Suomi on sitoutunut saavuttamaan hiilineutraaliuden vuoteen 2035 mennessä. Tavoitteena on olla maailman ensimmäinen fossiilivapaa hyvinvointiyhteiskunta. Keskeisiä keinoja tavoitteen saavuttamisessa ovat kivihiilen energiakäytön lopettaminen vuoteen 2029 mennessä, öljylämmityksen asteittainen poistaminen 2030-luvun alkuun mennessä sekä turpeen käytön vähentäminen 50 %:lla vuoteen 2030 mennessä. (Säämäki et al., 2024, s. 2–3). Laaditut strategiat ovat osa vihreää siirtymää, jolla tarkoitetaan yhteiskunnan ja talouden rakennemuutosta kohti ekologisesti kestävää toimintaa. Sen tavoitteena on vähentää ilmastonmuutosta aiheuttavia päästöjä, pysäyttää luontokato ja irrottaa talous luonnonvarojen ylikulutuksesta, samalla kun edistetään hyvinvointia ja talouden kilpailukykyä. (Ympäristöministeriö, ei pvm.).

Suomen hiilineutraaliustavoitteen saavuttamisessa keskeistä on siirtyminen uusiutuvan energiaan, sekä fossiilisten polttoaineiden käytön vähentäminen energiainfrastruktuurissa. Kivihiilen ja öljyn käytön sekä turpeen käytön vähentyessä tarvitaan vaihtoehtoisia lämmitysratkaisuja takaamaan tasainen energiansaanti, erityisesti Suomen pitkien ja kylmien talvien aikana. Sähkökattilat tarjoavat joustavan ratkaisun uusiutuvan sähkön integroimiseen lämmöntuotantoon, vastaten tehokkaasti energiajärjestelmän joustavuus- ja kestävyysaasteisiin. Muuntamalla uusiutuvaa sähköä lämmöksi sähkökattilat voivat vähentää fossiilisten polttoaineiden käyttöä sekä tukea sähköverkon vakautta tasapainottamalla uusiutuvan tuotannon vaihtelua ja vastaamalla kausittaiseen energiakysyntään. (Säämäki et al., 2024, s. 2–3).

Vihreän siirtymän onnistunut toteutus sekä sen ympäristö- ja taloushyötyjen saavuttaminen edellyttävät hallituksen tukevia politiikkatoimia sekä kehittyneiden verkkoteknologioiden käyttöönottoa. Esimerkiksi Suomen vuoden 2022 budjettiesityksessä datakeskukset, lämpöpumput ja kaukolämmössä käytettävät sähkökattilat siirrettiin alempaan sähköveroluokkaan vihreän siirtymän edistämiseksi. (Säämäki et al., 2024, s. 2–3).

Työn tavoitteena on vertailla vastus- ja elektrodikattiloita sähköteknisestä näkökulmasta sekä avata lukijalle keskeiset tekijät, jotka vaikuttavat niiden toimintaan ja soveltuvuuteen eri käyttökohteissa. Työssä tarkastellaan kattiloiden toimintaperiaatteita, niiden muodostamaa sähköistä kuormaa, tehonsäätötapoja sekä vaikutuksia sähköverkkoon eri jännitetasoilla. Lämpötekniisiä ilmiöitä ei käsitellä työssä tarkemmin. Lisäksi työssä käsitellään vastus- ja elektrodikattiloiden vaikutuksia Suomen sähkömarkkinoihin sekä niiden mahdollisuuksia osallistua reservimarkkinoille. Lopuksi vastus- ja elektrodikattiloita vertaillaan työn aikana käsiteltyjen sähkötekniisten ominaisuuksien perusteella ja tarkastellaan niiden soveltuvuutta erilaisiin käyttökohteisiin.

2 Sähkökattiloiden historia

Sähkökattiloita on käytetty Euroopassa yli 70 vuoden ajan. Alun perin niitä käytettiin 1960-luvulla hyödyntämään ylijäämäistä vesivoimaa yksinkertaisina huippukuormayksiköinä. Sähkökattiloiden suosio väheni 1980-luvulla, kun maiden väliset sähköverkkoyhteydet lisääntyivät ja sähkön hinnan nousu heikensi lämpövarastointikonseptien taloudellista kannattavuutta. Tuulivoiman lisääntyminen johti noin vuonna 2010 siihen, että elektrodikattiloita alettiin hyödyntää sähköverkon säätämässä. Tanskassa kunnalliset CHP-laitokset veloitettiin asentamaan lämpövarastoja verkon vakauden varmistamiseksi. Näissä tapauksissa kattilan koko tehoa hyödynnettiin verkon alassäätöön. (Novikov et al., 2023, s. 357–358).

Pienempiä vastuskattiloita on hyödynnetty Suomessa jo pitkään, erityisesti pientalojen lämminvesivaraajissa. Sen sijaan suuritehoiset kaukolämpöverkkoon kytketyt sähkökattilat ovat yleistyneet kiihtyvästi 2020-luvulla. Vuonna 2021 Suomen kaukolämpötuotannosta sähkökattiloiden tuottama lämpö oli 16 GWh, kun taas vuonna 2024 niiden tuotanto oli jo 1538 GWh. (Energiateollisuus ry, 2024, s. 3).

Sähkökattiloiden kannattavuus perustuu yhä enemmän sähkön hinnan vaihteluun. Niiden tehoa voidaan säätää nopeasti 0–100 %, mikä mahdollistaa reagoinnin lyhyen aikavälin hintamuutoksiin. Uusiutuvan energian lisääntyminen on kasvattanut edullisten sähkötuntien määrää, ja pitkän aikavälin hintaennusteiden perusteella jopa noin 40 % tunneista voi olla hyvin edullisia tai jopa nollahintaisia. (Finess, 2025).

Sähkökattiloiden nopea yleistyminen on nousemassa merkittäväksi tekijäksi suomalaisen energiajärjestelmän muutoksessa. Kantaverkkoyhtiö Fingrid arvioi, että sähkökattiloiden yhteenlaskettu teho voi kasvaa jopa 6000 megawattiin vuoteen 2040 mennessä. Näin voimakas kasvu asettaa kuitenkin uusia vaatimuksia sähköverkon kehittämiseksi, sillä siirto- ja jakeluverkon kapasiteetin on seurattava kasvavaa ja yhä nopeammin vaihtelevaa kulutusta. (Sallinen, 2025).

3 Sähkökattilatekniikka

Tässä luvussa käsitellään sähkökattiloiden toimintaperiaatteita. Sähkökattiloita on kahdenlaisia, vastus- ja elektrodikattiloita. Sähkökattiloilla on tyypillisesti korkea hyötysuhde (99 %), ja ne ovat nopeasti säädettäviä sekä matalahäviöisiä. (Finess, 2025). Niiden yhteyteen on yleensä sijoitettu lämpövarasto, mikä lisää systeemin joustavuutta huomattavasti. Sähkön hinnan ollessa matalalla voidaan sähkökattilalla tuottaa lämpöä varastoon, kun taas hinnan ollessa korkealla, lämpöä voidaan purkaa varastosta käyttöön. Lyhyemmän aikavälin varastoinnissa voidaan käyttää vesisäiliöitä, kun taas pidemmän aikavälin varastot voidaan toteuttaa maanalaisina luolavarastoina. (Iso-Trykkäri, 2025, s.36).

3.1 Vastuskattila

Vastuskattila on sähkökattilatyyppejä, joka on toteutettu rakenteellisesti ja sähköisesti yksinkertaisesti. Kattilan toiminta perustuu vastuslämmitykseen, eli niin sanottuun Joulen lämmitykseen. Kun sähkövirtaa johdetaan suuren resistanssin omaavan vastusmateriaalin läpi, syntyy lämpöä, joka siirtyy vastuksen pinnan kautta kattilaveteen ja nostaa veden lämpötilaa. Kattilan hallintajärjestelmä ohjaa vastuksille syötettävää sähkötehoa säätämällä virran määrää, minkä avulla veden lämmitystä ja kattilan käyttötilaa hallitaan. (Rakennustoimisto Nousiainen Oy, ei pvm.).

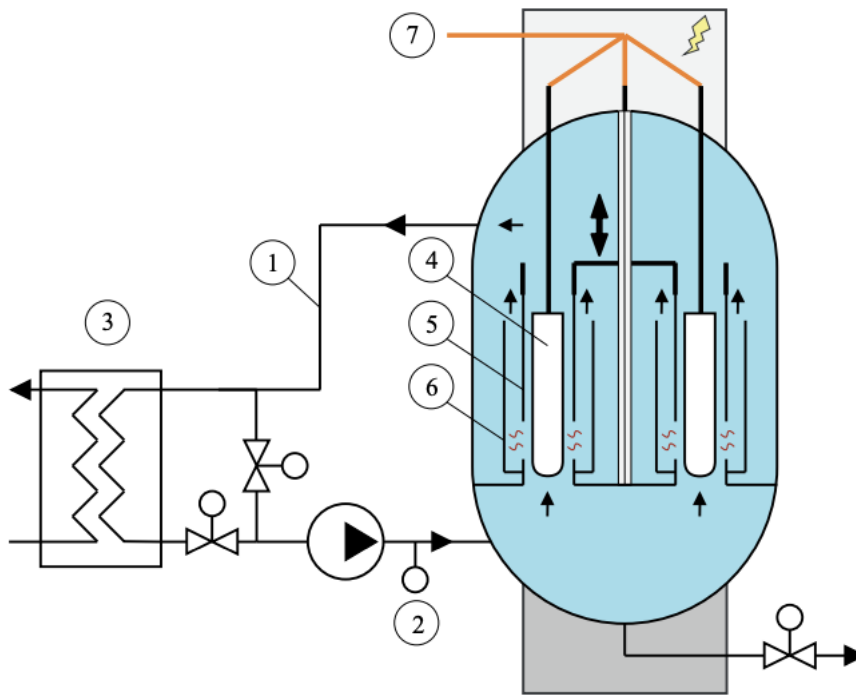
Sähkökattiloiden teholuokat vaihtelevat pienistä, muutaman kilowatin (kW) tehoisista omakotitalomalleista jopa megawattiluokan (MW) teollisiin ja kaukolämpöjärjestelmiin. Tyypillisiä kokoluokkia ovat pienet 3–9 kW:n yksiköt, omakotitaloihin tarkoitetut 12–48 kW:n laitteet ja suuriin kiinteistöihin suunnatut yli 50 kW:n järjestelmät, jotka voivat kasvaa teollisessa käytössä jopa 1600 kW:iin. Teollisissa sähkövastuskattiloissa vastukset ovat tyypillisesti ruostumattomasta teräksestä valmistettuja ja ne on kytketty suoraan sähköverkkoon, minkä vuoksi kuormitus on pääosin resistiivinen. (Oilon, ei pvm., s.11.).

3.2 Elektrodikattila

Elektrodikattilat eroavat perinteisistä sähkökattiloista siten, että lämmön tuottamiseen ei käytetä vastuselementtejä, vaan sähkövirta johdetaan suoraan kattilaveden läpi. Kattilavesi toimii sähköisenä vastuksena, jolloin sähköenergia muuttuu lämpöenergiaksi suoraan vedessä. Perustoimintaperiaate on sama kaikissa elektrodikattiloissa, mutta rakenteellisen toteutuksen ja veden kierron osalta ne voidaan jakaa kolmeen päälajiin ja käyttötarkoitukseen. Näitä ovat kattilat upotetuilla elektrodeilla, kattilat erillisellä sisäastialla ja suihkuvirtauskattilat. Elektrodikattiloita voidaan käyttää kuuman veden tai höyryn tuotantoon, sekä yhdistettyyn kuuman veden ja höyryn tuotantoon. (Zhao et al., 2025, s.3-4; Parat, ei pvm.)

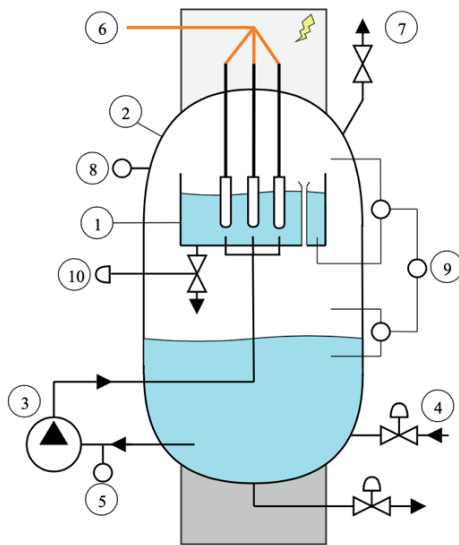
Sähköisesti elektrodikattiloita on kahta päälajia, kelluvalla rungosta eristetyllä tähtipisteellä olevat kattilat tai runkoon suoraan maadoitetut tähtipisteen kattilat. Kolmivaihekuorman tähtipiste on tähtikytkennässä olevien kolmen vaiheen yhteinen liitäntäpiste, joka voidaan kytkeä nollajohtimeen tai jättää kelluvaksi kuorman symmetriasta ja järjestelmän rakenteesta riippuen. Kattilatyyppin mukaan kolmivaihekuorman tähtipiste muodostetaan joko vastaelektrodilla kattilan runkoon tai muusta rungosta eristettyyn nollapisteeseen kattilan sisälle. (Mäki, 2025, s.15).

Rakenteeltaan yksinkertaisin elektrodikattila on upotettuihin elektrodeihin perustuva. Kattila on täytetty kokonaan vedellä. Siinä on yksi tai kaksi elektrodia vaihetta kohden riippuen kattilan koosta. Kattilan toiminta on esitetty Kuvassa 1. Kattilan suljettu vesipiiri (1) täytetään vedellä, jonka sähkönjohtavuutta seurataan säännöllisesti (2), sillä se vaikuttaa suoraan kattilan tehoon. Tuotettu lämpö siirretään kuluttajalle lämmönvaihtimen kautta (3). Sähkövirta kulkee elektrodien kautta veden läpi (4), jolloin vesi lämpenee. Kattilan tehoa säädetään liikkuvilla suojuilla (5), jotka peittävät elektrodeja eri määrin. Mitä enemmän elektrodi on peitetty, sitä pienempi on teho. Elektrodin ja vastaelektrodin välissä on eristävä rakenne (6), jota ohjataan sähköisesti. Mitä suurempi yhteys elektrodien välillä on, sitä suurempi virta kulkee ja sitä enemmän lämpöä syntyy. Kun elektrodit ovat lähes kokonaan suojattuina, kattila toimii pienimmällä teholla. Sähkönsyöttö (7) on sijoitettuna kattilan yläosaan. (Novikov et al., 2023, s. 360).



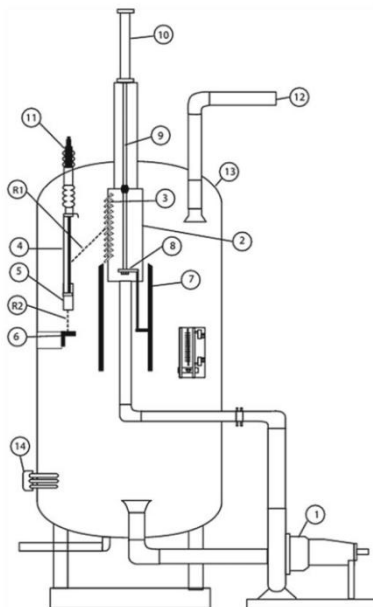
Kuva 1. Upotettujen elektrodien kattila (Novikov et al., 2023, s.360).

Toinen käytetty elektrodikattilatyyppeä on kattila erillisellä sisäastialla (Kuva 2). Siinä on erillinen sisäinen (1) ulkoinen (2) säiliö. Sisäisessä säiliössä sijaitsevat elektrodit, jossa vesi lämmitetään ja valmis vesi lasketaan alasäiliöön. Vesi kiertää kattilassa kiertopiirissä (3), johon lisätään tarvittaessa vettä täyttöjärjestelmästä (4). Kiertopiirin veden sähköjohtavuutta säädetään erikseen (5), koska se vaikuttaa suoraan kattilan toimintaan. Kattila on suunniteltu toimimaan korkealla jännitteellä. Sisäsäiliöön on sijoitettu elektrodit (6), jotka on sähköisesti eristetty ulkosäiliöstä. Muodostuva höyry keskittyy säiliön yläosaan, missä sijaitsee höyrynpoisto (7). Ulkoisen säiliön painetta (8) sekä sisäisen ja ulkoisen säiliön pinnankorkeutta (9) säädetään. Sisäsäiliön alaosassa on reikä, jossa on kuristusventtiili (10). (Novikov et al., 2023, s.361–363).



Kuva 2. Kattila erillisellä sisäastialla (Novikov et al., 2023, s. 362).

Elektrodikattiloita on saatavilla myös suihkutustyyppisinä rakenteina, joissa kattilavesi johdetaan suuttimien kautta elektrodien pinnalle siten, etteivät elektrodit ole jatkuvasti kokonaan veden peitossa (Kuva 3).



Kuva 3. Suihkuvirtauskattila (Novikov et al., 2023, s.365).

Sähkövirta kulkee vesisuihkujen kautta elektrodien välillä, ja veden sähköinen resistanssi aiheuttaa veden lämpenemisen. Suihkutustyyppisen ja upotustyyppisen elektrodikattilan toimintaperiaate on sama, mutta rakenteellinen toteutus poikkeaa toisistaan. Käytännössä upotustyyppiset elektrodikattilat ovat yleisempiä yksinkertaisemman rakenteensa ja vakaamman toiminnan vuoksi. (Zhao et al., 2025, s. 3–4).

4 Sähkökattiloiden muodostama kuormitus ja niiden tehonsäätö

Tässä luvussa tarkastellaan sähkökattiloiden verkkoon muodostamaa sähköistä kuormitusta sekä niiden tehonsäätöperiaatteita. Seuraavissa alaluvuissa käsitellään ensin vastuskattilan kuormituksen muodostumista ja säätöä, jonka jälkeen tarkastellaan elektrodikattiloiden vastaavia ominaisuuksia.

4.1 Vastuskattilan kuormituksen ja tehon säätö

Vastuskattilan muodostama kuormitus on pääosin resistiivinen, sillä kattilan toiminta perustuu sähkölämmityselementteihin, joissa sähköenergia muuttuu lämmöksi vastusten kautta. (Oilon, ei pvm., s.1).

Vastuskattilat on suunniteltu toimimaan 230–690 V jännitealueella, mutta kytketään tyyppillisesti 400 V tai 690 V kolmivaihesyöttöön. Lämmityselementit on jaettu tasaisesti vaiheiden kesken, jolloin kattila muodostaa symmetrisen kuorman. Koska kuormassa ei esiinny merkittäviä induktiivisia tai kapasitiivisia komponentteja, niin loistehon kompensoimista ei tarvitse ottaa huomioon. Kuormituksen resistiivisen luonteen ansiosta tehokerroin on likimain yksi, jolloin kattilan kokonaistehoa voidaan mallintaa tehokaavalla. (Oilon, ei pvm.; Finess, ei pvm.).

$$P = \sqrt{3}UI \quad (1)$$

missä

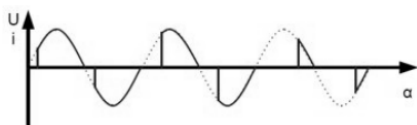
U = Verkon jännite (V)

I = Virta (A).

Kuormitusta voidaan näin ollen tarkastella lineaarisena, sinimuotoisesti syötettynä kolmivaihekuormituksena, jossa virta on jännitteen kanssa samassa vaiheessa eikä merkittävää harmonista säröä synny. (Moles, 2024).

Vastuskattilan tehoa voidaan säätää portaittaisen vastuskytkennän ja ohjausjärjestelmien avulla. Tehoportaat aktivoidaan yksitellen, mikä mahdollistaa kattilan ottaman sähkötehon askelmaisen säätämisen ja vähentää äkillisiä kuormitusmuutoksia sähköverkossa. Tehoportaiden lukumäärä määräytyy kattilan kokonaistehon perusteella. Kattiloissa on myös liitännät ulkoiseen tehonsäätöön, kuten 0–10 V ohjaussignaaliin, jonka avulla kattilan tehoa voidaan ohjata esimerkiksi automaatiojärjestelmän tai lämpöpumpun kautta. (Oilon, ei pvm., s. 8, 13).

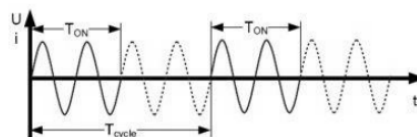
Toinen tapa säätää vastuskattilan lämmitystehoa tapahtuu tyristorikytkennällä, joka mahdollistaa portaattoman tehon säädön 0–100 % alueella. (Bosch, ei pvm.). Kun kattilan tehoa säädetään tyristoriohjauksella, vastukselle syötettävää jännitettä muokataan puolijohdekytkennällä. Kuvassa 4 on esitetty kaksi tyristoripohjaista tehonsäätötapaa. Johtokulmasäädössä (phase angle control) vaihtojännitteen jaksoa leikataan, jolloin teho säätyy portaattomasti, mutta virran aaltomuoto säröytyy. Jakso-ohjauksessa (full wave burst) kokonaisia jaksoja kytketään ja katkaistaan, jolloin virta on johtojaksojen aikana sinimuotoinen, mutta teho säätyy jaksojen lukumäärän perusteella. Tehon säätö tyristorikentällä voi laskea kattilan kokonaistehokertoimen alle yhteen ja aiheuttaa loistehoa, vaikka lämmitysvastus itsessään on resistiivinen. (ABB, 2025). Tyristorikentällä tapahtuva tehonsäätö ei ole kovin yleistä, sillä ne nostavat järjestelmän hintaa tuomatta juurikaan lisäarvoa.



Phase angle

For resistors with high R_{hot}/R_{cold} ratios and transformer loads

- Heating using phase angle control is very dynamic
- Phase angle control always creates harmonics in the line current



Full wave burst

With fix (T_{cycle}) and variable (T_{on}) time bases

- Optimal power factor is close to 100% (zero crossing mode)
- Control is less dynamic and used for heating loads with a long thermal time constant
- No harmonics in the line current
- The typical cycle time ranges from 5s to 20s

Kuva 4. Johtokulmasäätö ja jakso-ohjaus (ABB, 2025, s.19).

4.2 Elektrodikattilan kuormituksen ja tehon säätö

Elektrodikattila muodostama kuormitus on resistiivinen, sillä lämmöntuotto perustuu veden ohmiseen johtumiseen. Kattilan tehokerroin on lähes yksi, eikä merkittävää harmonista säröä synny. Kattila kytketään tavallisesti keskijänniteverkkoon 6–36 kV alueelle. Vaikka elektrodikattilan muodostama kuormitus on resistiivinen, se ei ole ideaalisti lineaarinen, koska veden sähkönjohtavuus riippuu käyttöolosuhteista. Elektrodikattilan kolmen vaiheen elektrodit ovat rakenteeltaan ja sijoittelultaan symmetriset, jolloin kattila itsessään muodostaa symmetrisen kolmivaihekuormituksen, jossa teho jakautuu tasaisesti kolmen vaiheiden kesken. (Parat, 2021, s. 10; Zhao et al., 2025). Erilaisissa käytännön toteutuksissa kuormituksen luonteessa voi esiintyä epäsymmetrioita ja muita kattilan kuormitukseen vaikuttavia ilmiöitä. Elektrodikattilan tehon säätö on täysin portaaton, joka mahdollistaa nopean reagoinnin kuormitusmuutoksiin. (Parat, 2021, s.10).

4.2.1 Upotettujen elektrodien kattila

Upotetuilla elektrodeilla varustettu kattila kytketään kolmivaihejärjestelmään, jolloin sen sähkötehoa voidaan mallintaa yhtälöllä

$$P = \sqrt{3}UI = \frac{U^2}{R} \quad (2)$$

Elektrodin kautta kulkeva sähkövirta voidaan mallintaa yhtälöllä 3

$$I = \frac{2\pi L\sigma V_0}{\ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right)} \quad (3)$$

missä

L = Elektrodin pituus vedessä (cm)

σ = Veden sähkön johtavuus (s/cm)

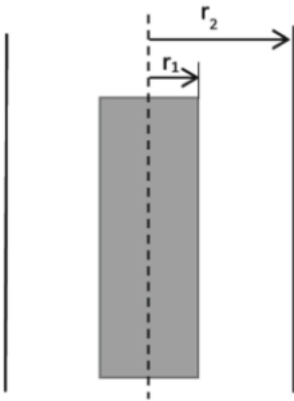
V_0 = Vaihejännite (V)

r_1 ja r_2 = Elektrodin ja vastaelektrodin säde (cm).

Yhdistämällä yhtälöt 2 ja 3 sähkötehoksi saadaan

$$P = \frac{2\pi\sigma U^2}{\ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right)} L \quad (4)$$

Vaikuttavia muuttujia upotettujen elektrodien kattilan sähkötehoon ovat jännite U ja virta I . Virran suuruuteen vaikuttavat veden sähköjohtavuus, elektrodin paljaan jännitteisen osan pituus L , sekä elektrodin ja vastaelektrodin keskinäiset etäisyydet Kuvan 5 mukaisesti. (Novikov et al., 2024 s. 249–251).



Kuva 5. Elektroodin ja vastaelektroodin sijainnin esitys (Novikov, et al., 2024, s.250).

Kattilan sähkötehoa säädetään eristävien suojalevyjen avulla. Elektroodin ja neutraalin vastaelektroodin väliin sijoitetaan suojalevyjä, kun suojalevyt vedetään pois, elektrodi on täysin paljaana ja kattila tuottaa maksimitehoa. Kun vastaavasti taas suojalevyjä siirretään elektroodin päälle, näkyvä pinta-ala pienenee, jolloin myös kulkeva virta pienenee ja lämmitysteho laskee. (Novikov et al., 2023, s.360).

4.2.2 Kattila erillisellä sisäastialla

Erillisellä sisäastialla varustetun kattilan sähkötehoa voidaan mallintaa yhtälöllä 5

$$P = \frac{U^2}{R} = G_e U^2 \quad (5)$$

missä

R = Veden resistanssi (Ω)

G_e = Veden konduktanssi (S).

Kattilaveden konduktanssin voidaan arvioida olevan suoraan verrannollinen veden johdotteeseen (σ) ja normalisoituneeseen vedenpinnan korkeuteen (L)

$$G_e \propto L \cdot \sigma \quad (6)$$

Elektrodikattilassa vesi toimii sähköä johtavana väliaineena elektrodien välillä, jolloin kattilan kuorma määräytyy veden sähkönjohtavuuden perusteella. Veden sähkönjohtavuus on verrannollinen sen tiheyteen ja lämpötilaan

$$\sigma \propto \sigma_w(\rho, T) \quad (7)$$

missä

σ_w = Puhtaan veden sähkönjohtavuus (*s/cm*)

ρ = paine (Pa)

T = lämpötila ($^{\circ}C$).

Sähköteho määräytyy siis sekä elektrodien upotussyvyyden että veden sähkönjohtavuuden perusteella. Veden johtokyky riippuu lämpötilasta ja paineesta, ja niiden kasvaessa sähköteho kasvaa. Kattilaveden laadun seuranta on keskeistä tehon hallinnan sekä turvallisen ja ennustettavan käytön kannalta. (Nielsen, R., Pedersen, T., 2023 s. 591).

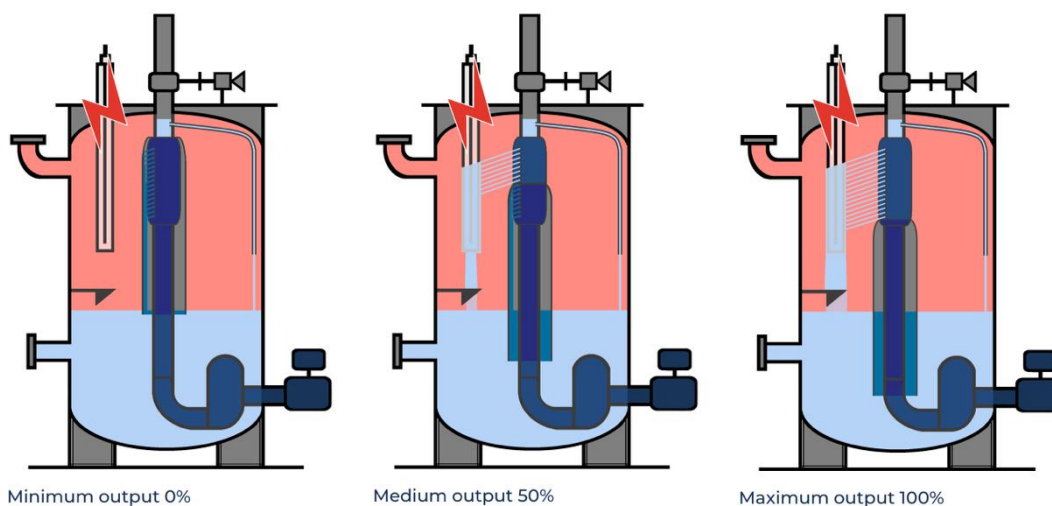
Tehon säätö tapahtuu muuttamalla elektrodien upotussyvyyttä vedessä. Mitä suurempi osa elektrodipinnasta on veden peitossa, sitä suurempi on kattilan ottama sähköteho. Vastaavasti upotussyvyyden pienentäminen vähentää kosketuspinta-alaa ja alentaa kattilan tehoa. (Filter, Powering Industry, 2025).

4.2.3 Suihkutusvirtauskattila

Suihkutyypinen elektrodikattila tuottaa höyryä suihkuttamalla vettä suuttimien kautta elektrodeille. Sen sähköinen kuorma määräytyy suuttimien läpi virtaavan veden määrän perusteella. Suuttimille vettä syöttävää kiertopumppua ohjataan taajuusmuuttajalla. Pumpun nopeuden muuttaminen muuttaa veden virtausta, mikä vaikuttaa suoraan elektrodien läpi kulkevaan virtaan ja siten kattilan lämpötehoon. (Novikov at el., 2023, s. 363–364). Kattila on suunniteltu siten, että kuorma jakautuu tasaisesti kaikille kolmella vaiheelle, jolloin ne toimivat mahdollisimman symmetrisenä kuormana. (Vaptec, ei pvm.).

Käytännössä suihkuttaminen kolmelle vaihe-elektrodille aiheuttaa kuitenkin luonnollista epäsymmetriaa vesisuihkujen muodostamisessa resistansseissa. (Mäki, 2025, s. 35).

Kattilan tehoa säädetään muuttamalla elektrodeille johdettavan veden virtausmäärää (Kuva 6). Kattilan pumput kierrättävät jatkuvaa vesivirtaa kattilan alaosasta siihen liittyville elektrodeille ja vastaelektrodeilla suutinlevyjen kautta. Vesisuihkujen ollessa tukittuina, vesi palautuu kattilan pohjalla, jolloin kattilan tehon tuotto on nolla. Vastaavasti kun kaikki vesisuihkut saavuttavat elektrodin ja vastaelektrodin, pääsee sähkö virtaamaan ilman esteitä veden läpi ja tuottamaan maksimaalisen tehon. (Vapec, ei pvm.).



Kuva 6. Suihkutusvirtauskattilan tehon säätö (Vapec, ei pvm.).

5 Sähkökattilat osana sähköverkon kuormitusta

Suomessa kulutus- ja jakeluverkkoliityntöjen tekniset vaatimukset määrittelee Fingrid. Kulutuksen järjestelmätekniiset vaatimukset -asiakirjan tavoitteena on varmistaa liittyjän sähkölaitteiston yhteensopivuus sähköverkon kanssa. Sähkölaitteiston on oltava sellainen, että se kestää sähköjärjestelmässä esiintyvät jännite- ja taajuusvaihtelut. Sen ei tule aiheuttaa haittaa muille verkkoon liitetyille laitteille. Lisäksi verkonhaltijalla on oltava käytössään riittävät tiedot liittyjän vaikutusten arvioimiseksi. (Fingrid, 2018).

Kuten luvussa 4 huomattiin, on sähkökattiloiden muodostama kuormitus pääosin resistiivinen, sillä lämmöntuotto perustuu sähköenergian muuttumiseen lämmöksi joko lämmitysvastusten tai veden ohmisen johtumisen kautta, sekä symmetrinen, sillä teho jakautuu tasaisesti sähköverkon kolmen vaiheen kesken. Virta on tällöin pääosin samassa vaiheessa jännitteen kanssa, minkä vuoksi tehokerroin on lähellä yhtä ja verkosta otettava teho on pätötehoa. Kattiloiden tehoa voidaan säätää nopeasti, mikä tekee niistä sähköverkon näkökulmasta joustavia ja hyvin ohjattavia kuormia. Vastuskattiloissa säätö toteutetaan yleensä tehoportain kytkemällä vastuksia päälle ja pois, kun taas elektrodikattiloissa tehosäätö perustuu elektrodien aktiivisen pinta-alan muuttamiseen.

Tässä luvussa tarkastellaan vastus- ja elektrodikattiloiden vaikutusta pien-, keski- ja suurjänniteverkossa.

5.1 Pienjänniteverkko

Pienjänniteverkkoon (0,4 kV) liitetyn sähkökattilan vaikutus näkyy ensisijaisesti paikallisen jakeluverkon kuormituksessa ja jännitetasossa. Pienjänniteverkon toiminta perustuu säteittäiseen rakenteeseen, mikä tarkoittaa, että kaikki asiakkaiden kulutus kulkee samaa johtoreittiä pitkin kohti muuntajaa. Tämän vuoksi jokaisen johto-osan virta määritetään kuormituslaskennassa huipputehotilanteen perusteella. Kattila tarvitsee tyypillisesti myös oman jakelumuuntajan pienjänniteverkossa (Elovaara & Haarala, 2010, s. 56–57; Mäki, 2025, s.32).

Verkkoon aiheutunut vaikutus sähkökattilasta ilmenee virran kasvuna, jännitteen alenemana sekä verkon komponenttien lämpökuormituksen lisääntymisenä. Koska jännite-taso on suhteellisen matala, aiheuttaa jo kohtalainen teho suuria virtoja, jolloin kattilan kytkeminen verkkoon nostaa kyseisen haaran virtaa merkittävästi. Esimerkiksi 200 kW teho 400 V verkossa aiheuttaa noin 290 A virran. Virtalämpöhäviöiden muoto on RI^2 ja siirrettävä teho on muotoa UI . Tästä seuraa, että mitä suurempia tehoja on siirrettävä, sitä suurempia jännitteitä on käytettävä. Tämän vuoksi pienjänniteverkossa sähkökattilan teho on käytännössä rajallinen. Siirtomatkan pidentyminen johtaa yleensä myös korkeamman siirtojännitteen käyttöön. (Elovaara & Haarala, 2010, s. 54).

Jännitteenalenema on yksi sähkökattilan merkittävistä vaikutuksista pienjänniteverkossa, koska kattila on suoraan riippuvainen kuormavirransuuruudesta sekä syöttöjohtimen impedanssista. Jännitteenalenema lasketaan jakeluverkossa johdon alku- ja loppupään jännitteiden itseisarvojen erotuksella. Standardin SFS-EN 50160 mukaan pienjänniteverkon jännitetason tulee pysyä noin +10 % / -15 % vaihteluvälissä (Taulukko 1). Mikäli jännite-taso alittaa standardin mukaiset rajat, katsotaan sähkön laatu heikentyneeksi. (Lakervi & Partanen, 2008, s. 38–39).

Taulukko 1. Koostetaulukko pienjänniteverkon jännitteen laatukriteereistä. (Lakervi & Partanen, 2008, s. 256).

Jännitteen ominaisuus	Korkea laatu	Normaallilaatu	Standardin SFS-EN 50160 mukainen laatu	Huomatus
Taajuus	50 Hz ± 0,5 %	50 Hz ± 1 %	99,5 % vuodesta: 50 Hz ± 1 % 100 % ajasta 50 Hz + 4 %/-6 %	Mittaus 10 s jaksoina
Jännitetason vaihtelu	220–240 V ja ka. 225–235 V	207–244 V	95 %: $U_n \pm 1 \%$ kaikki: $U_n + 10 \%$ / -15 %	Mittaus tehollisarvojen 10 min keskiarvoina viikon ajan
Nopeat jännite-muutokset	$P_{st,3max} \leq 1$ ja $P_{it,max} \leq 0,8$	$P_{it,max} \leq 1$	95 % P_{it} -arvoista ≤ 1	Manuaalisesti myös kuvan 1 avulla
Harmoniset yliaallot	THD $\leq 3 \%$	$u_n \leq$ taulukon 9.1 arvot ja THD $\leq 6 \%$	95 % $u_{it} \leq$ taulukon 9.1 arvot ja THD $\leq 8 \%$	Mittaus 10 min jaksoina viikon ajan
Epäsymmetria	$u_{ush} \leq 1 \%$	$u_{ush} \leq 1,5 \%$	95 % $u_{ush} \leq 2 \%$	Mittaus 10 min jaksoina viikon ajan
Signaalijännitteet	\leq julkaisun kuvan 2 rajakäyrä	\leq julkaisun kuvan 2 rajakäyrä	99 % \leq julkaisun kuvan 2 rajakäyrä	Mittaus 3 s jaksoina 1 vrk

Vastuslämmitykseen perustuvat sähkökattilat ovat tavallisesti pienemmän teholuokan ratkaisuja ja ne liitetään pienjänniteverkkoon. (Finess, ei pvm.). Näin ollen tulee niiden noudattaa SFS-EN 50160 -standardeja. Kappaleessa 4.1 huomattiin, että vastuskattila käyttäytyy lineaarisena ja vakaana kuormana, mikä tekee sen vaikutuksesta pienjänniteverkkoon ennustettavan jännitteenlaadun seurannan kannalta. Vastuskattila toteuttaa teknisten ominaisuuksiensa ansiosta SFS-EN 50160 -standardin mukaisen harmonisen särön ($THD \leq 8\%$) ja epäsymmetrian ($\leq 2\%$) rajat (Taulukko 1). Näin ollen vastuskattilan vaikutukset kohdistuvat lähinnä jännitealenemaan ja lämpökuormitukseen. Elektrodi-kattila on pienjännitetasolla harvinaisempi sen suuren virrantarpeen vuoksi, minkä takia ne liitetään käytännössä aina keskijänniteverkkoon.

Pienjänniteverkon suojaukselle on asetettu tiukat rajat, vaikka jakelun keskeytymisen aiheuttamat kustannukset eivät ole kovin suuria aina. Tiukat rajat johtuvat siitä, että ihmisten ja laitteiden sallitut minimietäisyydet ovat pienemmät pienjännitteisistä laitteista kuin suurempijännitteisistä. (Lakervi & Partanen, 2008, s. 159).

5.2 Keskijänniteverkko

Keskijänniteverkon jännitetaso on Suomessa tavallisesti 20kV, joissakin kaupungeissa on käytössä myös 10 kV jännitetaso. Keskijänniteverkkoon liitytään pääsääntöisesti silloin, kun tehon tarve ylittää 0,7 MVA. Keskijänniteliittymä on tarkoitettu lähinnä yrityksille, joiden sähkön käyttö tai tuotto on suurta, kuten kauppakeskukset, teollisuuslaitokset, aurinkopuistot ja energiavarastot. Keskijänniteverkko vaikuttaa hyvin olennaisesti verkon käyttövarmuuteen, ja jopa 90 % käyttäjien kokemista keskeytyksistä johtuu keskijänniteverkossa tapahtuvista vioista. (Lakervi & Partanen, 2008, s. 125; Caruna, 2024).

Vastuskattilat toimivat tyypillisesti matalalla jännitteellä ja yksittäisten vastusten teho voi vaihdella muutamasta kilowatista aina muutamaan sataan kilowattiin. Tehon lisääminen kasvattaa sähkökeskuksen ja muuntajan virran kokoa, mikä kasvattaa kustannuksia. Näin ollen keskijänniteverkossa elektrodikattilat ovat edullisempi ja yleisempi vaihtoehto.

(Kolhinen et al., 2024, s. 11). Elektrodikattilat ovat tyypillisesti useiden megawattien suuria kuormia, sekä ne liitetään suoraan keskijänniteverkkoon. Elektrodikattilan tapauksessa kuormitus ei ollut täysin staattinen, vaan teho riippui veden johtavuudesta ja elektrodien välisestä jännitteestä. Tehoa voidaan säätää hyvin nopeasti elektrodikattilassa, mikä lisää dynaamisten jännitepoikkeamien riskiä verrattuna puhtaaseen vastuskattilaan. Toisaalta resistiivisen kuormituksen ja tehonsäätökyvyn ansiosta kattilantehon ei tarvitse olla suoraan verrannollinen verkkojännitteen kanssa. (Mäki, 2025, s. 42.; Parat, ei pvm.).

Uusi sähköliittymä sähkökattilaa varten edellyttää liitettävyydestarkastelua, jossa arvioidaan huipputehoarvion perusteella kuormituksen vaikutukset jännitetasoon, muuntajien ja johtojen kuormitukseen, oikosulkuvirtoihin ja verkon kapasiteettiin. Alle 5–7 MVA liittymät toteutetaan pääsääntöisesti kytkemöliityntänä ja yli 5–7 MVA liittymät sähköasemaliityntänä. (Caruna, 2024, s. 2–3).

Sähkökattilan liittämässä sähköverkkoon on tärkeää ottaa suunnitteluvaiheessa huomioon liittymisjohdon pituus, poikkipinta-ala, reitti sekä liitetäänkö kattila kytkemöön vai suoraan sähköasemalle. Etenkin pitkillä liittymisjohdoilla sähkökattila voi aiheuttaa paikallisen jännitekuopan. Kattiloiden vaikutus keskijänniteverkossa kohdistuu liittymispisteen jännitetasoon. Suurempi virta lisää johdon RI^2 -häviöitä syöttöjohdossa ja aiheuttaa mitattavan jännitealeneman verkon päätepisteeseen. (Lakervi & Partanen, 2008, s.136–137; Caruna, 2024, s.2–3).

Sähkökattiloiden suuri ja usein jatkuva pätöteho kasvattaa syöttävän päämuuntajan kuormitusastetta suoraan nimellistehon suhteessa. Liitettävyydestarkastelussa arvioidaan, ettei muuntajan jatkuva kuormitus ylitä sallittuja lämpörajoja ja että kuormitusvaraa jää myös muulle verkon käytölle. Yksittäinen muuntaja saa olla teholtaan enintään 1600 kVA. (Caruna, 2024, s. 2–6). Elektrodikattilan kuorman luonteen ja nopean tehonsäädön vuoksi muuntajalle kohdistuu nopeampia kuormitusmuutoksia, mahdollisesti suurempaa dynaamista räsitusta sekä korostunutta herkkyyttä jännitepoikkeamille. Teollisuudessa elektrodikattilaa syöttävä muuntaja on usein varustettu käämikytkimellä, joka säätelee kulutuksen automaattisesti haluttuun kiskojännitteeseen, kompensoi syöttävän siirtoverkon jännitevaihteluita toimintavasteaikansa rajoissa ja muuntajan jännitealenemaa.

Tämä auttaa tasoittamaan käyttöä, mutta ei poista suuritehoisen kuorman aiheuttamaa termistä kuormitusta muuntajalle ja kaapeloinnille. (Mäki, 2025, s. 42.).

5.3 Suurjänniteverkko

Suurjännitteiset jakeluverkot toimivat 110–400 kV alueella. Sähkökattilan aiheuttaman kuormituksen vaikutus siirtyy yksittäisen jakeluverkon sijasta koko alue- tai kantaverkon tasolle, missä kuormituksen keskeiset vaikutusmekanismit liittyvät jännitetason hallintaan, sekä dynamiikkaan ja järjestelmän kokonaistasapainoon. Suomen kantaverkossa taajuudenhallinnasta ja järjestelmän käyttövarmuudesta vastaa Fingrid, jonka liittymisehdoissa ja järjestelmäteknisissä vaatimuksissa edellytetään, että suuret kulutusliittymät eivät aiheuta haitallisia tai hallitsemattomia tehomuutoksia verkkoon. (Caruna, 2025, s.2–3; Fingrid, ei pvm. a).

Sähkökattiloiden vaikutus sähköjärjestelmään riippuu ensisijaisesti niiden tehosta ja sääntönopeudesta. Suuritehoiset ja nopeasti säädettävät elektrodikattilat voivat aiheuttaa merkittäviä ja nopeampia muutoksia tehotasapainoon kuin pienemmät vastuskattilat. Sen takia tässä kappaleessa otetaan kantaa vain elektrodikattiloiden vaikutukseen suurjänniteverkossa, vaikka elektrodikattilaa ei liitetä suoraan suurjänniteverkkoon, vaan sähkö syötetään suurjänniteverkossa sähköaseman muuntajan kautta keskijänniteverkkoon, johon elektrodikattilat ovat liitettynä. Tällöin niiden vaikutus välittyy kantaverkkoon sähköjakelujärjestelmän kautta. (Parat, ei pvm.).

Elektrodikattila voi olla useiden kymmenien megawattien kokoinen kuorma, jolloin sen vaikutukset näkyvät sähköön kulutuksen ja tuotannon välisenä tasapainona. Mikäli pätötehon kuormaa kasvatetaan nopeasti ilman vastaavaa tuotannon lisäystä, verkon taajuus laskee. Vastaavasti pätötehon kuorman pienentyessä taajuus nousee. Jotta verkko toimii, on taajuuden pysyttävä vakiona lähellä nimellistaajuutta (49,9–50,01 Hz). (Elovaara & Haarla, 2010, s. 347).

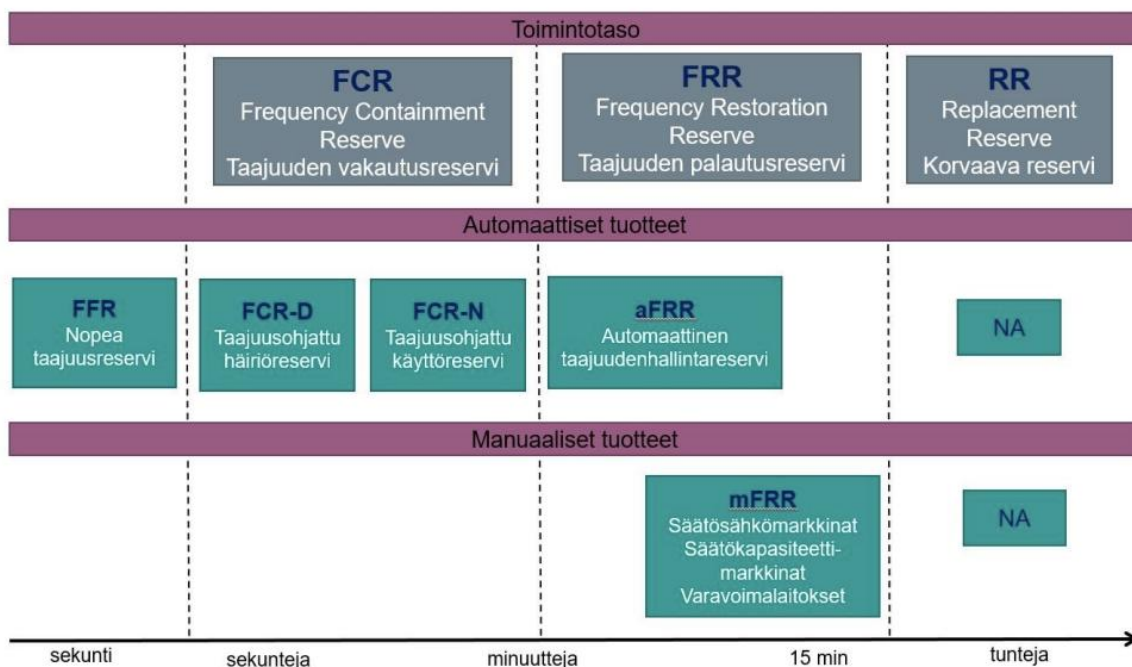
Elektrodikattilat toimivat yleensä sähköverkkojärjestelmää vakauttavina resursseina, koska niiden tehoa voidaan säätää nopeasti jännitteen ja markkinatilanteen mukaan. Tällainen dynaaminen tehonsäätö auttaa tasapainottamaan alueellista tuotannon ja kulutuksen vaihtelua. (Parat, ei pvm.).

Elektrodikattilan suuri pätötehon kulutus vaikuttaa suurjänniteverkossa myös tehonsiirtoon. Suurjänniteverkossa siirtojohdon reaktanssi on huomattavasti suurempi kuin resistanssi, minkä takia tehonsiirto vaatii kulmaeron johdon päiden jännitteiden välille. Kulmataajuus on kulman derivaatta, minkä takia teho ja taajuus liittyvät toisiinsa, ja taajuus ja sen muutokset kertovat verkon tehotasapainosta. Kulmaeron kasvaessa myös loistehon kulutus ja siirtohäviöt kasvavat, mikä pienentää käytettävissä olevaa siirtokapasiteettia. (Elovaara & Haarla, 2010, s. 349–350).

Näin ollen siirtoraja ei määräydy ainoastaan johtimien lämpenemisen perusteella, vaan myös verkon stabiiliuden kannalta. Mikäli kulmaero kasvaa liian suureksi, järjestelmän stabiilisuusmarginaali pienenee ja verkon kyky siirtää lisätehoa heikkenee. Häiriötilanteessa, esimerkiksi yhden siirtoyhteyden irrotessa, tehon siirto jakautuu uudelleen verkossa, mikä voi kasvattaa kulmaeroja ja kuormitusta jäljelle jäävissä johdoissa. Suuritehoisen kuorman, kuten elektrodikattilan, vaikutus näkyy tällöin kantaverkossa lisääntyneenä kuormituksena, jolloin siirtorajat voivat tulla vastaan ennen termisiä rajoja. (Elovaara & Haarla, 2010, s. 349–351).

6 Sähkökattilat jouston mahdollistajina sähköverkossa

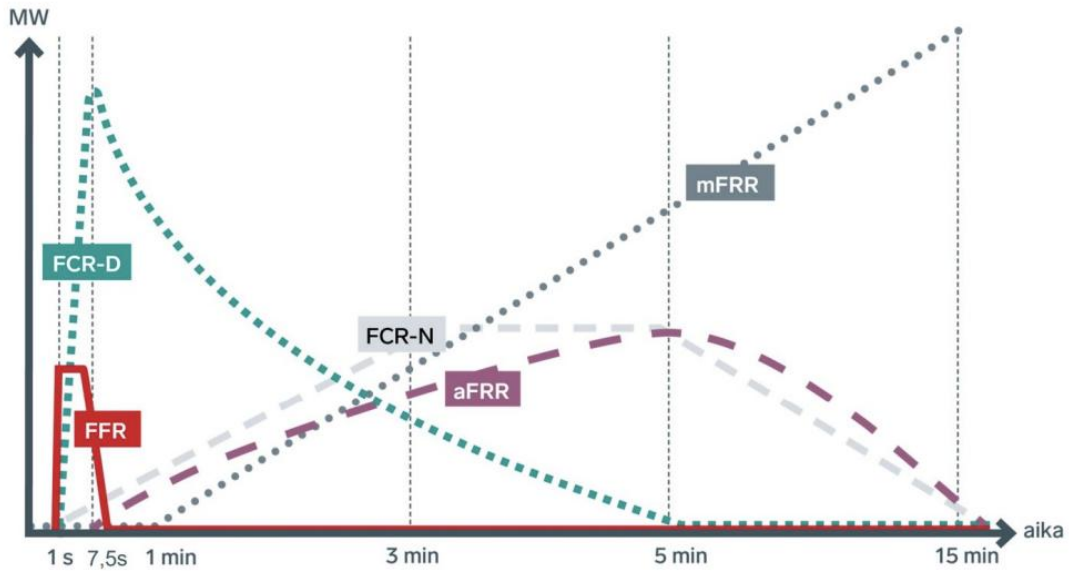
Sähkökattilat voivat osallistua sähköverkon tukipalveluihin muuttamalla kulutustaan järjestelmän tarpeen mukaan. Kysyntäjousto tarkoittaa, että kattila voi tarvittaessa joko vähentää tai lisätä ottamaansa sähkötehoa ja siten tukea verkon tehotasapainoa. (Novikov et al., 2023, s. 355–356). Kuvassa 7 on esitetty Suomessa käytettävät reservituotteet ja eri reservien toiminta-ajat.



Kuva 7. Reservituotteet jaoteltuna ryhmiin käyttötarkoituksen mukaan (Kumpulanen, 2025, s.11).

Nopeinten reagoivat reservituotteet löytyvät Kuvan 7 vasemmasta reunasta ja oikealta puolelta löytyvät hitaimmin reagoivat. Kuvassa 8 on mallinnettu reservituotteiden aktivoitumisaikoja taajuuspoikkeaman sattuessa. Nopeat taajuusreservit (FRR, Fast Frequency Reserve) reagoivat kaikkein nopeiten ja manuaaliset taajuuden palautusreservit (mFRR, manual Frequency Restoration Reserve) hitaimmin. Nopeasti aktivoituvat reservit toimivat ensimmäisenä vasteena taajuuspoikkeamaan. Kun hitaammat reservit ovat

ehtineet mukaan ottamaan säätövastuun, nopeammat reservit voivat palata alkuperäiseen valmiustilaansa ja varautua seuraavaan mahdolliseen häiriöön. (Fingrid, ei pvm. b).



Kuva 8. Reserbituotteiden toimintaperiaatteet ja toiminta kokonaisuutena. (Fingrid, ei pvm. b).

Sähkökattilat sopivat ominaisuuksiltaan taajuusohjattuihin käyttö- (FCR-N, Frequency Containment Reserve for Normal operation) ja häiriöreserveiksi (FCR-D, Frequency Containment Reserve for Disturbances) ylös- ja alassäätöön. Taajuusohjattu käyttöreservi pyrkii pitämään taajuuden normaalitaajuusalueella 49,9–50,1 Hz, kun taas taajuusohjattu häiriöreservi pitää taajuuden 49,5–50,5 Hz välillä taajuuden poiketessa normaalitaajuusalueelta. Kun huomioidaan sähkökapasiteetin vähimmäiskoko, niin myös automaattisen taajuuden palautusreservin (aFRR, automatic Frequency Restoration Reserve) ja manuaalisen taajuuden palautusreservin (mFRR) reservimarkkinoille osallistuminen on mahdollista. Sekä aFRR- että mFRR-reservit pyrkivät ylläpitämään tuotannon ja kuluksen tehotasapainoa, sekä palauttamaan taajuuden nimellisarvoon 50,0 Hz. Näin ollen sähkökattilat soveltuvat kaikkiin reserveihin ominaisuuksiltaan. (Fingrid, ei pvm. b).

Sekä vastus- että elektrodikattilat voivat osallistua yleensä sekä ylös- että alassäätöön muuttamalla niiden kulutusta sähköjärjestelmän tarpeen mukaan. Elektrodikattilat soveltuvat kuitenkin laajemmin nopeisiin reservituotteisiin, sillä niiden teho on säädettävissä 0–100 %, sekä niiden vasteaika voi olla alle 30 sekuntia. Vastuskattiloiden porrastettu säätö voi rajoittaa niiden käyttöä, mikäli tehoportaita ei ole riittävästi säätöä varten. (Kumpulainen, 2025, s.36; Parat, ei pvm.).

Sähkökattiloiden ikä, teho ja aktivointikyky täydellä reserviteholla on myös huomioitava reservimarkkinoille osallistuessa. Kattilan tehon täytyy olla riittävän suuri, jotta se ylittää reservituotteen vähimmäissäätökokoon, sekä sen on pystyttävä muuttamaan tehoa tarpeeksi nopeasti. Esimerkiksi vanhemmat elektrodikattilat eivät välttämättä ehdi reagoimaan tarpeeksi nopeasti taajuusohjattuihin reserveihin. Reserviyksikön on pystyttävä täyttämään Kuvan 9 mukaiset vähimmäisvaatimukset yhtäjaksoiseen aktivointikykyyn täydellä reserviteholla. (Kumpulainen, 2025, s. 36).

	Nopea taajuusreservi	5–30 s
	Taajuusohjattu häiriöreservi	20 min
	Taajuusohjattu käyttöreservi	1h (sekä ylös- että alassäätöön)
	Automaattinen taajuuden palautusreservi	1 h
	Säätösähkömarkkinat	1 h
	Säätökapasiteetti -markkinat	3 h

Kuva 9. Reservikohteen aktivointikykyyn mitoitus (Kumpulainen, 2025, s. 33).

7 Sähkökattiloiden vaikutus sähkömarkkinoihin

Sähkön hinta Suomessa perustuu Nord Poolin vuorokausimarkkinaan, jossa Suomi muodostaa yhden yhtenäisen hinta-alueen. Suomen sähkömarkkinoille on ominaista matala tukkusähkön hinta, mutta korkea hintavaihtelu. Erityisesti kylminä talvina kun lämmityskysyntä kasvaa ja verkon tasapainottaminen vaikeutuu, on koettu merkittäviä hintapiikkejä. (Säämäki et al., 2024, s. 4).

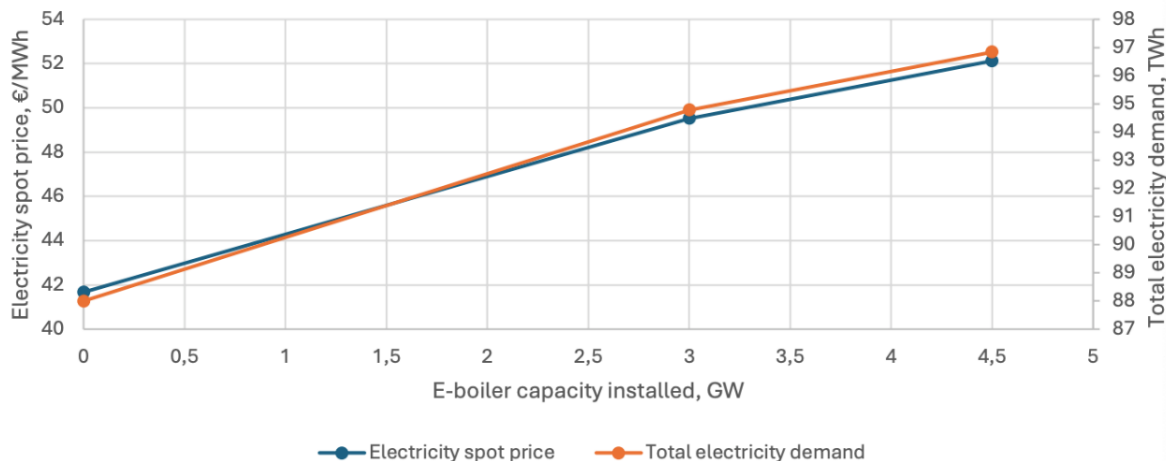
Kaukolämpöjärjestelmät ovat keskeisessä roolissa Suomessa kattaen noin 46 % asuin- ja palvelurakennusten lämmitystarpeista. Näissä järjestelmissä on alettu käyttää yhä kasvavassa määrin sähkökattiloita. Sähkökattilat voivat merkittävästi parantaa kaukolämmön tuotantoa sähkön hinnan ollessa alhainen, joka on yleistä Suomessa tuulivoiman tuotantopiikkien aikana. Sähkökattilat mahdollistavat nopean kysyntäjoustop ja verkon tasapainottamisen. (Säämäki et al., 2024, s. 2, 10). Taulukossa 2 on esitetty kolme eri skenaariota: perusskenaario, sekä skenaariot, joissa sähkökattilakapasiteettia on nostettu 3 GW:iin ja 4,5 GW:iin. Taulukossa 2 tarkastellaan kapasiteetin lisäyksen vaikutuksia sähkön spot-hintaan, uusiutuvan energian tuotantoon (TWh), kokonaisenergiantuotantoon (TWh), sähkön kysyntään (TWh), sekä uusiutuvien energialähteiden tuloihin (€/MWh).

Taulukko 2. BID3-simulaatiotulokset skenaarioille, joissa käytetään nykyisiä uusiutuvia energialähteitä (Säämäki et al., 2024, s. 15).

Scenario	E-boiler capacity, GW	Electricity spot price, €/MWh	Renewable energy production, TWh	Total energy production, TWh	Electricity demand, TWh	Renewables revenue, €/MWh
base	0	41.67	26.62	92.72	88.00	34.96
1a	3	49.53	28.00	95.29	91.34	36.76
2a	4.5	52.12	28.15	95.77	92.52	37.62

Suurempi sähkökattilakapasiteetti lisää sähkön kysyntää ja nostaa sähkön hintaa, mutta samalla se kasvattaa uusiutuvan energian tuotantoa ja tuloja. Kuvassa 10 on mallinnettu Taulukon 2 tietojen perusteella sähkökattilakapasiteetin lisäämisen vaikutuksia sähkön

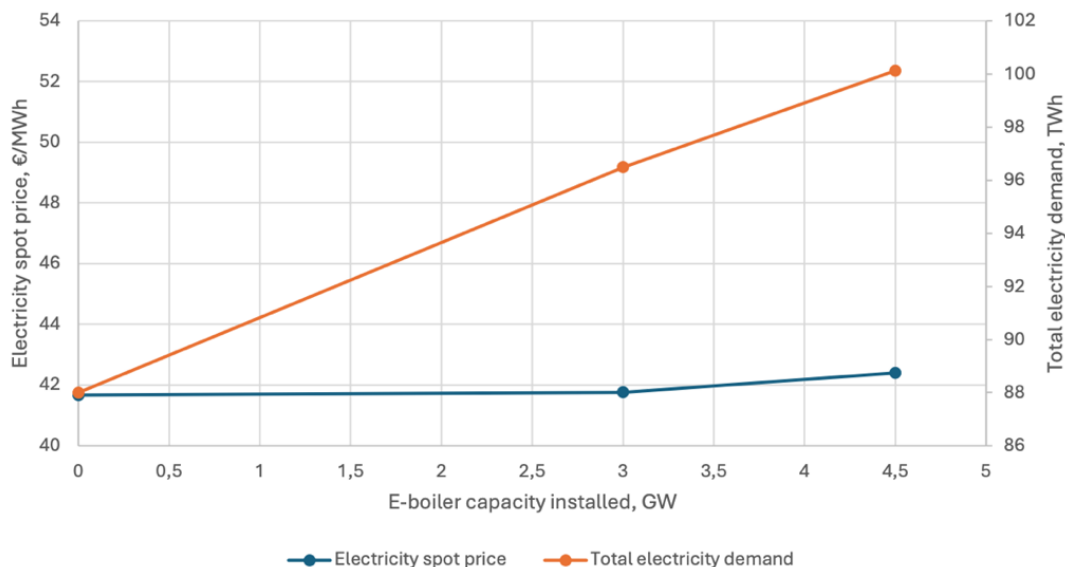
spot-hinta ja kysyntään. Kuvan 10 x-akselilla esitetään sähkökattilakapasiteetti (GW) ja y-akseleilla sähkön spot-hinta (€/MWh) sekä sähkön kysyntä (TWh).



Kuva 10. Sähkökattiloiden vaikutus sähkön hintaan (Säämäki et al., 2024, s. 15).

Sähkökattilakapasiteetin tuottama hintavaikutus on lähes lineaarinen sähkön spot-hintaan, mutta sen hintavaikutus pienenee kapasiteetin kasvaessa. Tämä johtuu siitä, että aluksi markkinoilla on paljon halpoja ylijäämätunteja, joita sähkökattilat käyttävät tehokkaasti pois. Kun halvat tunnit on hyödynnetty, ei lisäkapasiteetti enää löydä yhtä paljon halpaa sähköä, jolloin kapasiteetin kasvattamisen vaikutus sähkön hintaan ja kysyntään alkaa tasaantua. (Säämäki et al., 2024, s. 15).

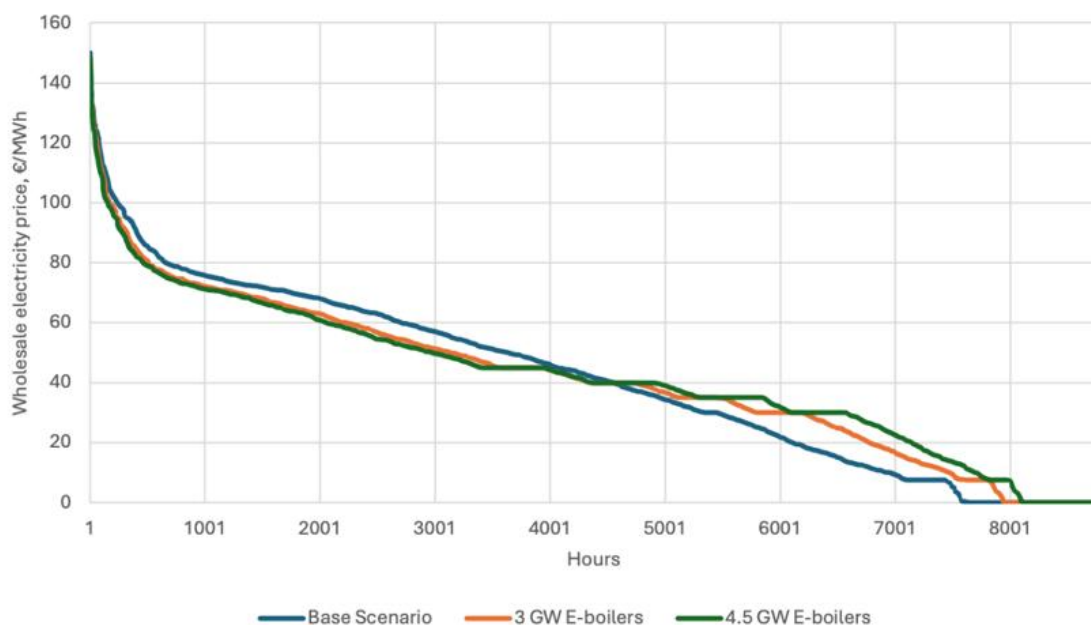
Lisäämällä uusiutuvan energian tuotantoa saadaan lievennettyä hintojen nousua ja vakuutettua markkinoita. Kun uusiutuvan energian tuotantoa lisätään 2,2 GW:lla ja 3 GW:lla samalla kun sähkökattilakapasiteettia nostetaan 3 GW:iin ja 4.5 GW:iin, saadaan sähkön spot-hinta pysymään lähes muuttumattomana. Kuvassa 11 x-akselilla esitetään sähkökattilakapasiteetti (GW), ja y-akseleilla esitetään sähkön keskimääräinen spot-hinta (€/MWh) sekä sähkön kokonaiskysyntä (TWh), kun uusiutuvan energian tuotantoa on lisätty. (Säämäki et al., 2024, s. 16-17).



Kuva 11. Sähkökattilan asennettu kapasiteetti, GW (Säämäki et al., 2024, s.17).

Sähkökattilakapasiteetin kasvu lisää kokonaiskysyntää lähes lineaarisesti, kun taas keskimääräinen sähkön spot-hinta pysyy melkein ennallaan. Sähkön hinta pysyy vakaana, koska lisääntynyt uusiutuva energia kompensoi sen kysynnän kasvun, jonka sähkökattiloiden käyttö aiheuttaa. Tämän seurauksena sähkön hinta ei kasva lineaarisesti, toisin kuin Kuvassa 10. Sähkökattilat tukevat uusiutuvalla energialla tuotettua sähköä, sillä ne kuluttavat sähköä erityisesti silloin, kun esim. tuulituotanto on korkea. Kattilat mahdollistavat myös merkittävän määrän uutta tuulivoimaa ilman että, markkinahinta romahtaa tai uusiutuvan energian kannattavuus heikkenee. (Säämäki et al., 2024, s. 17).

Sähkökattilat vaikuttavat myös hintavolatiliteettiin lyhentämällä erittäin matalien ja korkeiden hintojen jaksoa, sekä pidentämällä keskialueen hintatasoa (30–45 €/MWh). Tämä johtuu siitä, että sähkökattiloita aktivoidaan käyttöön hinnan perusteella. Ilmiötä on mallinnettu Kuvassa 12 jossa esitetään sähkön tukkuhinnan jakauma tunneittain (x-akseli: tunnit järjestettynä kalleimmasta halvimpaan, y-akseli: €/MWh) kolmessa eri skenaariossa: perusskenaario sekä skenaariot, kun sähkökattilakapasiteettia on nostettu 3 GW:iin ja 4,5 GW:iin.



Kuva 12. Hinnan kestokäyrä (Säämäki et al., 2024, s.18).

Hintajakauma loivenee loppua kohti selvästi, mikä viittaa parempaan tuotannon ja kulutuksen tasapainoon sekä vakaampaan sähkön tukkuhintaan. Vastaavasti hintajakauman jyrkkä alku kertoo tilanteesta, jossa kysyntä on suurta suhteessa tarjolla olevaan tuotantoon sekä sähkön käyttö kalleinta. Kasvattaessa sähkökattilakapasiteettia kalleimman ja halvimman sähkön käyttöaika lyhenee. Näin ollen kapasiteetin kasvu tasoittaa hintajakaumaa, sillä se vähentää korkeimpien hintapiikkien tuntien määrää. Myös erittäin halpojen tuntien määrä vähentyy, koska sähkökattilat hyödyntävät näitä tunteja lämmön- tuotannossa. (Säämäki et al., 2024, s. 18).

8 Sähkökattiloiden vertailu ja käyttökohteet

Sähkökattiloiden käyttökohteet voivat vaihdella aina omakotitaloista suuriin teollisuuslaitoksiin ja kaukolämpöverkkoihin. Niiden suosio perustuu hyvään hyötysuhteeseen, päästöttömyyteen, toimintavarmuuteen ja vähäisiin huoltokustannuksiin sekä joustavuuteen. (Finess, 2024). Vastuskattilat soveltuvat hyvin pienempiin teholuokan kohteisiin, kun taas elektrodikattilat soveltuvat paremmin suurempaa tehoa vaativiin kohteisiin. (Kolhinen at el., 2024, s. 53).

Vastuskattiloita käytetään tavallisesti rakennusten lämmityksessä sekä pienemmän mitakaavan teollisuuskäytössä, joissa tarvitaan kohtuullisia lämpötehoja tai kaukolämpöä ei ole välttämättä saatavilla, mutta sähköverkko on. Esimerkiksi kiinteistöjen vesikiertisiin lämmitysjärjestelmiin, lattialämmitykseen tai varalämmitykseen ilmalämpöpumpun rinnalle vastuskattilat sopivat hyvin. (Rakennustoimisto Nousiainen Oy, ei pvm.). Taulukossa 3 on esitetty teollisuudessa käytettäviä vastuskattiloita.

Taulukko 3. Tyypilliset teolliset vastuselementtikattilat (Mäki, 2025, s.13).

Valmistaja	Parat Halvorsen	Zander & Ingeström	Bosch Industrial	Boiler Tech	Jäspi (Kaukora)
Tyyppi	IEL	ZVK, ZHWB	ELHB	BT-HW	FIL SG
Sähköteho (kW)	15–5000	30–1200, 150–3000	250–5500	500–15 000	150–1600
Sähkötehoalue (%)	2–100% *	Ei ilmoitettu	0-100	~0–100	~ 5–100%
Jännite (V)	230, 400, 690	400, 400/690	380/400/690	400–690	400

Elektrodikattiloita käytetään tyypillisesti taas suuritehoisissa kohteissa kattilan suuren tehon tarpeen vuoksi, kuten kaukolämpöjärjestelmissä ja teollisuuden höyryntuotannossa. Niiden rakenne mahdollistaa tehokkaan toiminnan korkeilla jännitteillä ja suurissa teholuokissa, minkä vuoksi ne soveltuvat erityisesti sähköjärjestelmän kuormanhallintaan ja uusiutuvan energian tuotannon vaihteluiden tasapainottamiseen. (Parat, ei pvm.). Taulukossa 4 on esitetty markkinoilla olevia elektrodikattiloita.

Taulukko 4. Tyypilliset elektrodikattilat kuumaveden tuotannossa (Mäki, 2025, s.31).

Valmistaja	Acme Engineering	Parat Halvorsen	Zander & Ingeström	Vapac AG	Vapor Power
Tyyppi	CEJW	IEH	ZBVA	EEH	BBJ-
Max. Sähköteho (MW)	2,5–68	5–60	5–45	1–60	0,8–34
Sähkötehoalue (%)	10–100	0/10–100	0–100	0/10–100	0–100
Jännite (kV)	4,16–25	6–24	6–22 kV	6–24	4,16–14,4

Taulukkoon 5 on koottu vastus- ja elektrodikattiloiden tärkeimmät eroavaisuudet ja samanlaisuudet.

Taulukko 5. Vastus- ja elektrodikattilan vertailutaulukko.

Ominaisuus	Vastuskattila	Elektrodikattila
Sähkötehon muodostuminen	Sähköenergia muuttuu lämmöksi vastuselementeissä (Joulen laki)	Sähkövirta kulkee veden läpi, teho riippuu veden sähkönjohtavuudesta ja käyttöolosuhteista
Kuorman luonne	Resistiivinen	Resistiivinen
Tehonsäätö	Portaittain tai tyristoriohjauksella	Portaaton
Liityntä	Pienjänniteverkko	Keskijänniteverkko
Teholuokka	Pienet–keskisuuret tehot	Keskisuuret–erittäin suuret tehot
Käyttöjärjestelmä	Kiinteistö- ja pienteollisuuskäyttö	Kaukolämpö ja teollinen lämmöntuotanto
Rooli energijärjestelmässä	Peruslämmitys ja vararatkaisut	Kysyntäjousto, reservimarkkinat ja järjestelmän tasapainotus

Sähkökattiloiden käyttö on lisääntynyt erityisesti kaukolämmöntuotannossa. Useilla paikkakunnilla tuotetaan yhä fossiilisilla polttoaineilla kaukolämmön huippu- ja varavoimaa, ja esimerkiksi kesäajan kuorma on liian pieni katettavaksi biopolttoaineella. Sähkökattiloita voidaan hyödyntää näissä tilanteissa korvaamaan kesäajan kuorma, sekä tukemaan kaukolämmöntuotantoa, kun sähkö on halpaa. Kuvassa 13 on esitetty sähkökattiloiden investointeja Suomen kaukolämpöverkkoihin vuonna 2025. (Finess, 2025).

Päätettyjä sähkökattilainvestointeja Suomen kaukolämpöverkkoihin vuoden 2025 alussa

Helsinki	220 MW
Espoo	150 MW
Vantaa	180 MW
Tampere	160 MW
Jyväskylä	120 MW
Muu Suomi	630 MW
Yhteensä	1460 MW

Kuva 13. Sähkökattilainvestointeja Suomen kaukolämpöverkkoihin vuoden 2025 alussa (Finess, 2025).

9 Johtopäätökset

Työn perusteella keskeisin ero vastus- ja elektrodikattiloiden välillä ei liity niiden perusteiseen resistiivisiin kuormina, vaan siihen, miten mm. niiden sähköteho muodostuu ja miten kattilat vaikuttavat sähköjärjestelmään eri teholuokissa.

Vastuskattiloiden käyttö rajoittuu pienempiin teholuokkiin muutamista kilowatista aina 15 000 kW:iin, jolloin niiden vaikutus kohdistuu paikallisiin pienjänniteverkkoihin. Niiden liittäminen sähköverkkoon ei yleensä aiheuta merkittäviä haasteita, minkä vuoksi ne soveltuvat hyvin kiinteistö- ja pienteollisuuskäyttöön. Suuremman teholuokan (1-68 MW) elektrodikattilat kytketään taas suoraan keskijänniteverkkoon. Ne toimivat yleensä osana sähköjärjestelmän kuormanhallintaa, kaukolämpöjärjestelmiä ja teollisuuden prosesseja, joissa korkea jännitetaso mahdollistaa suurten tehojen siirron ilman kohtuuttomia virtoja. Elektrodikattiloiden vaikutus kohdistuu suoraan keskijänniteverkkoon, sekä muuntajien kautta suurjänniteverkkoon.

Molemmat kattilatyypit tukevat sähköjärjestelmän joustavuutta ja uusiutuvan energian hyödyntämistä. Niitä voidaan käyttää erityisesti tilanteissa, joissa sähkön hinta on alhainen ja uusiutuvaa energiaa on runsaasti tarjolla. Sähkökattiloiden yleistyminen kasvattaa sähkönkysyntää erityisesti edullisina tunteina, mikä vähentää erittäin halpojen tuntien määrää ja tasoittaa sähkönhinnan vaihtelua. Samalla ne mahdollistavat uusiutuvan energian tuotannon lisäämisen ja tehokkaan hyödyntämisen esimerkiksi kaukolämmön tuotannossa. Elektrodikattiloiden nopea ja portaaton tehonsäätö tekee niistä kuitenkin paremmin soveltuvan kysyntäjousto- ja reservimarkkinoille, kun taas vastuskattiloiden porrastettu tehonsäätö rajoittaa niiden käyttöä kaikkein nopeimmissa säätötilanteissa. Pienemmissä kohteissa vastuskattilat tarjoavat kuitenkin yksinkertaisen ja kustannustehokkaan ratkaisun.

Vastus- ja elektrodikattilat eivät ole toisiaan korvaavia teknologioita, vaan ne täydentävät toisiaan eri käyttökohteissa. Vastuskattilat tarjoavat yksinkertaisen ja luotettavan ratkaisun pienemmissä sovelluksissa, kun taas elektrodikattilat mahdollistavat suuritehoisen

ja joustavan lämmöntuotannon osana laajempaa energiajärjestelmää. Tulevaisuudessa elektrodikattiloiden rooli tulee korostumaan enemmän sähköjärjestelmän tasapainottamisessa ja uusiutuvan energian liittämässä sähköjärjestelmään. Samalla niiden lisääntyminen kasvattaa sähköverkon kuormitusta, mikä asettaa haasteita verkon kapasiteetin kehittämiseksi.

10 Yhteenveto

Tässä kandidaatintyössä tarkasteltiin vastus- ja elektrodikattiloita sähköteknisestä näkökulmasta. Työssä käytiin läpi kattiloiden toimintaperiaatteet, sähkötehon muodostuminen, kuorman luonne ja tehonsäätömenetelmät, sekä kattiloiden vaikutus sähköverkkoon eri jännitetasoilla ja sähkömarkkinoihin. Lisäksi tarkasteltiin sähkökattiloiden roolia osana reservimarkkinoita, sekä kattiloiden käyttökohteita.

Työn perusteella sähkökattiloiden muodostama kuormitus on pääosin resistiivinen ja hyvin hallittava. Sähköverkon kuormituksen hallinnan merkitys energijärjestelmässä kasvaa uusiutuvan energian lisääntyessä. Vastus- ja elektrodikattiloiden erot syntyvät sähkötehon muodostumisen, tehonsäätötavan ja teholuokan osalta, mikä vaikuttaa niiden soveltuvuuteen eri käyttökohteissa sekä eri jännitetason sähköverkossa. Vastuskattilat soveltuvat paremmin pienempiin ja paikallisiin kohteisiin, kun taas elektrodikattilat ovat keskeisessä roolissa suuritehoisessa lämmöntuotannossa ja sähköjärjestelmän kuormituksen hallinnassa.

Työssä havaittiin, että sähkökattilat voivat toimia tehokkaana joustomekanismina sähköverkossa. Hyödyntämällä alhaisen hinnan sähköä ja osallistumalla kysyntäjoustoön sähkökattiloiden käyttö edistää uusiutuvan energian tehokasta hyödyntämistä sekä vähentävää energijärjestelmän riippuvuutta fossiilisista polttoaineista. Samalla sähkökattiloiden yleistyminen tukee uusiutuvan energian tuotantoa, mutta lisää sähköverkon kuormitusta, mikä edellyttää verkon kehittämistä ja huolellista suunnittelua erityisesti suurempien teholuokkien osalta.

Lähteet

- ABB. (2025). *DCT880 power controller for industrial heating applications*. Noudettu 13.3.2026 osoitteesta https://library.e.abb.com/public/7a775f4a72a6479a8367a1eb8a6a3999/3ADW000603R_en_J_DCT880%20Power%20Controller%20Sales%20presentation.pdf?x-sign=xdiYrHvx-PELGfrGZjmXxTFZ%2bGYahmupra5%2f2RcS7NB1qJXID5fqozVVVtelhZ5yr
- Bosch. (ei pvm.). *Electric boiler for heating and hot water ELHB*. Noudettu 13.3.2026 osoitteesta <https://www.bosch-industrial.com/global/en/ocs/commercial-industrial/electric-boiler-for-heating-and-hot-water-elhb-20939747-p/>
- Caruna. (2024). *Keskijänniteliittymien tekninen ohje*. Noudettu 15.3.2026 osoitteesta https://caruna.fi/sites/default/files/docs/Keskij%C3%A4nniteliittymien_tekninen_ohje.pdf
- Caruna. (2025). *Suurjänniteliittymien tekninen ohje*. Noudettu 15.3.2026 osoitteesta https://caruna.fi/sites/default/files/docs/Suurj%C3%A4nniteliittymien_tekninen_ohje.pdf
- Elovaara, J., & Haarla, L. (2010). *Sähköverkot I*. Otatieto.
- Energiateollisuus ry. (2025). *Kaukolämpövuosi 2024: Ennakkograafit*. Noudettu 18.3.2026 osoitteesta https://energia.fi/wp-content/uploads/2025/01/Kaukolampovuosi-2024_ennakkograafit.pdf
- Filter, Powering Industry. (2025). *Electrode boilers: Clean, smart, and efficient heating solutions*. Noudettu 23.1.2026 osoitteesta <https://filter.eu/electrode-boilers-clean-smart-and-efficient-heating-solutions/>
- Finess. (2024). *Sähkökattilat ja niiden rooli kilpailuetuna teollisuudessa*. Noudettu 28.2.2026 osoitteesta <https://www.sttinfo.fi/tiedote/70763239/sahkokattilat-ja-niiden-rooli-kilpailuetuna-teollisuudessa?publisherId=69820076&lang=fi>
- Finess. (2025). *Sähkökattilainvestointien kannattavuus Suomessa edelleen kasvussa*. Noudettu 23.1.2026 osoitteesta <https://finess.fi/sahkokattilainvestointien-kannattavuus-edelleen-kasvussa/>

- Finess. (ei pvm.). *Sähkökattilat 35–90 000 kW*. Noudettu 23.1.2026 osoitteesta <https://finess.fi/wp-content/uploads/2025/11/finess-energy-vastuskattilat-500-15000kw.pdf>
- Fingrid. (2018). *Kulutuksen järjestelmätekniset vaatimukset*. Noudettu 2.4.2026 osoitteesta <https://www.fingrid.fi/kantaverkko/liitynta-kantaverkkoon/tekniset-vaatimukset/kulutuksen-jarjestelmatekniset-vaatimukset/>
- Fingrid. (ei pvm. a). *Suomen sähköjärjestelmä*. Noudettu 2.4.2026 osoitteesta <https://www.fingrid.fi/kantaverkko/kehittaminen/suomen-sahkojarjestelma/>
- Fingrid. (ei pvm. b). *Sähköjärjestelmän reservit*. Noudettu 2.4.2026 osoitteesta <https://www.fingrid.fi/sahkomarkkinat/reservit/sahkojarjestelman-reservit/#reservituotteiden-toimintaperiaatteet>
- Iso-Trykkäri, E. (2025). *Sähkökattilat osana Suomen kantaverkon markkinaehtoista siirtojenhallintaa* [Diplomityö, Aalto-yliopisto]. Aaltodoc. <https://aaltodoc.aalto.fi/server/api/core/bitstreams/9b9989c8-624f-4dee-a3e7-760186e152c1/content>
- Kolhinen, A.-M., Takala, J., Rautio, H., Jaakkola, A., Laine, M., Närhi, K., Pitkäniemi, S., Rantanen, S., Puranen, N., & Keski-Opas, J. (2024). *Sähköistämällä energiatehokkuutta teollisuudessa: Selvitysraportti*. Motiva Oy. Noudettu 16.3.2026 osoitteesta <https://www.motiva.fi/wp-content/uploads/sites/2/2026/01/Selvitysraportti-%E2%80%93Sahkoistamalla-energiatehokkuutta-teollisuudessa.pdf>
- Kumpulainen, E. (2025). *Akkuvarastot ja sähkökattilat reservimarkkinoilla* [Opinnäytetyö, Savonia-ammattikorkeakoulu]. Theseus. Noudettu 8.3.2026 osoitteesta https://www.theseus.fi/bitstream/handle/10024/896162/Kumpulainen_Eetu.pdf?sequence=2
- Lakervi, E., & Partanen, J. (2008). *Sähköjakelutekniikka*. Otatieto.
- Moles, I. (2024). *Harmonics and what you can do about it*. Danfoss. Noudettu 28.1.2026 osoitteesta <https://www.danfoss.com/en/about-danfoss/articles/dds/harmonics-and-what-you-can-do-about-it/>

- Mäki, P. (2025). *Sähkökattilat jouston lähteenä* [Diplomityö, LUT-yliopisto]. LUTPub. Noudettu 28.2.2026 osoitteesta https://lutpub.lut.fi/bitstream/handle/10024/171043/Diplomityo_Maki_Petri.pdf?sequence=1
- Nielsen, R. J., & Pedersen, T. E. (2023). Electrode boiler model for ancillary service simulation. Teoksessa *Proceedings of the 15th International Modelica Conference 2023, Aachen, October 9–11* (s. 589–598). Linköping University Electronic Press. <https://doi.org/10.3384/ecp204589>
- Novikov, P., Teslenko, O., Beldii, V., Lenchevsky, E., & Bunke, O. (2023). Review of technologies of thermal energy generation using high voltage electrode boilers in the context of their application as energy load regulator. Teoksessa A. Zaporozhets (toim.), *Systems, Decision and Control in Energy V*. Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-031-35088-7_18
- Novikov, P., Teslenko, O., Beldii, V., Lenchevsky, E., Shtifzon, O. (2024). Dynamic Model of a High-Capacity Electric Boiler with an Immersed Electrode. Noudettu 5.3.2026 osoitteesta https://www.researchgate.net/publication/384204605_Dynamic_Model_of_a_High-Capacity_Electric_Boiler_with_an_Immersed_Electrode
- Oilon. (ei pvm.). *Lämpöparoni sähkökattilat: Kiinteistöille ja teollisuudelle*. Noudettu 13.4.2026 osoitteesta <https://oilon.com/wp-content/uploads/2021/12/Lampo-paroni-FI.pdf>
- Parat. (2021). *Parat IEH Finnish* [PDF-dokumentti, ei enää saatavilla]. Noudettu 5.1.2026 osoitteesta <https://parat.no/media/s0wngnggt/parat-ieh-finnish-2021.pdf>
- Parat. (ei pvm.). *Korkeajännitteinen elektrodikattila*. Noudettu 13.4.2026 osoitteesta <https://parat.no/products/ieh-high-voltage-electrode-boiler>
- Rakennustoimisto Nousiainen Oy. (ei pvm.). *Mitä sähkökattilat ovat ja miten ne toimivat?* Noudettu 10.4.2026 osoitteesta <https://raktsto-nousiainen.fi/mita-sahkokattilat-ovat-ja-miten-ne-toimivat/>
- Sallinen, P. (2025). Sähkökattiloiden maihinnousu. *Energiauutiset*. Noudettu 30.3.2026 osoitteesta <https://www.energiuutiset.fi/kategoriat/markkinat/sahkokattiloiden-maihinnousu.html>

- Säämäki, F., Ramesh, R., Skorniakov, I., Kostianen, E., & Pesonen, S. (2024). *The impact of electric boilers to the Finnish energy system*. Energiateollisuus. Noudettu 10.3.2026 osoitteesta <https://energia.fi/tiedotteet/raportti-sahkokattilat-tasapainottavat-sahkomarkkinoita/>
- Vaptec. (ei pvm.). *Jet type electrode boilers*. Noudettu 18.3.2026 osoitteesta <https://www.vaptec.com/en/industrial-electrode-boilers/jet-type>
- Ympäristöministeriö. (ei pvm.). *Mitä on vihreä siirtymä?* Noudettu 29.4.2026 osoitteesta <https://ym.fi/mita-on-vihrea-siirtyma>
- Zhao, Z., Hu, R., Zhang, Y., Dong, H., & Du, Q. (2025). Current research status and prospects of electrode boilers under the background of the “Dual Carbon” goals. *Energies*, 18(4), 769. <https://doi.org/10.3390/en18040769>