



Valaistusjärjestelmän potentiaali kysyntäjoustossa

Tatu Pyykkö

OPINNÄYTETYÖ
Toukokuu 2020

Talotekniikan tutkinto-ohjelma
Sähköinen talotekniikka

TIIVISTELMÄ

Tampereen ammattikorkeakoulu
Talotekniikan tutkinto-ohjelma
Sähköinen talotekniikka

PYYKKÖ, TATU:

Valaistusjärjestelmän potentiaali kysyntäjoustossa

Opinnäytetyö 29 sivua, joista liitteitä 0 sivua
Toukokuu 2020

Kysyntäjousto on isossa roolissa tulevaisuuden energiamurroksessa. Kun sähkön tuotanto muuttuu enemmän sääriippuvaiseksi ja kulutukseen aiheutuu hetkellisiä piikkejä sähköautojen ja lämpöpumppujen yleistyessä, kysyntäjousto auttaa tasapainottamaan sähköverkon taajuutta.

Opinnäytetyön teoriaosiossa tutustuttiin kysyntäjoustomarkkinoihin sekä sisätyöalueiden valaistusstandardiin SFS-EN 12464-1:2011 ja muihin määräyksiin, jotka käsittelevät valaistusta. Itse työssä tutkittiin myymälän valaistusinfran potentiaalia häiriö- tai käyttöreservimarkkinoilla. Eri valaistustilanteista tehtiin Dialux-laskelmat standardin puitteissa.

Yksittäisen kiinteistön valaistusjärjestelmän tehoa voidaan säätää rajallisesti, jotta käyttäjille ei aiheudu valotasojen muutoksesta haittaa. Aggregoinnilla saadaan koottua tarvittava joustoteho, jota voidaan tarjota kysynnänjoustomarkkinoille. Käyttöreservi on optimaalisempi markkinapaikka, sillä siellä joustotehon aktivoitumisvaatimus on 3 minuuttia taajuuden muutoksesta, jolloin on mahdollista toteuttaa pitkäkin aikaramppi valaistuksenohjaukselle. Lisäksi käyttöreservissä on pienempi minimitarjouskoko kuin häiriöreservissä.

Haasteena valaistusjärjestelmän liittämisessä osaksi käyttöreserviä todettiin vaatimus joustoon sekä verkon ylös- että alassäädössä. Tämä on tulevaisuudessa syytä ottaa huomioon valaistusta suunniteltaessa, jos on aikomusta osallistua kysyntäjoustomarkkinoille. Vaikka tässä työssä kyseessä oli suhteellisen pieni esimerkkimyymälä ja sen 67 valaisinta, voitiin todeta, että valaistusinfrassa on tehojoustopotentiaalia kysyntäjoustoon.

Asiasanat: valaistus, kysyntäjousto, käyttöreservi, häiriöreservi

ABSTRACT

Tampereen ammattikorkeakoulu
Tampere University of Applied Sciences
Degree Programme in Building Services Engineering
Electrical Building Services Engineering

PYYKKÖ, TATU:

The Potential of Lighting Systems for Demand-side Management

Bachelor's thesis 29 pages, appendices 0 pages
May 2020

Demand-side management plays a big role in future energy fusion. As electricity production becomes more weather dependent and there are spikes in electricity consumption due to the use of heat pumps and electric car chargers, demand-side management is a cure to stable the frequency of the network.

The theoretical section explores demand-side management markets in Finland and the main requirements for lighting such as SFS-EN 12464.1:2011 Lighting for indoor workspaces. The main work section explores a possibility of a store's lighting systems to participate in demand-side management, either at FCR-N or FCR-D marketplaces. Dialux calculations were made for different lighting situations. In all situation the standards requirements had to be met.

Lighting systems have limited flexibility while maintaining the operating conditions for users. Aggregation provides the necessary flexibility that can be offered to demand-side management markets. FCR-N is a more optimal marketplace, because of the 3-minute requirement after the change in frequency, which makes it possible to implement a long-time ramp for lighting control. Additionally, the operating reserve has a smaller minimum offer size than the FCR-D market.

A challenge for lighting systems to participate in the FCR-N was the requirement for flexibility in both up and down controlling. This should be taken into account in future lighting design if there is an intention to participate in demand-side management markets. Although the example store is a relatively small store with 67 luminaires, it can be stated that lighting systems have a potential for demand-side management.

Key words: lighting, demand-side management, frequency controlled normal operation reserve, frequency controlled disturbance reserve

SISÄLLYS

1	JOHDANTO	5
2	SÄHKÖENERGIAMARKKINAT	6
2.1	Sähkön tukkumarkkinat	7
2.2	Kysyntäjoustomarkkinat	8
2.3	Vakautusreservit FCR-N ja FCR-D	11
2.4	Aggregaattori	13
3	MÄÄRÄYSTEN MUKAISEN VALAISTUSJÄRJESTELMÄN SUUNNITTELU KYSYNNÄNJOUSTOA AJATELLEN	14
3.1	Lait ja asetukset liittyen valaistuksen suunnitteluun	14
3.2	Smart readiness indicator (SRI)	15
3.3	Sisätyökohteiden valaistusstandardi SFS-EN 12464-1:2011	17
4	VALAISTUKSEN POTENTIAALI KYSYNTÄJOUSTOSSA	21
4.1	Esimerkkimyymälän valaistus osana FCR-N käyttöreserviä	22
4.2	Esimerkkimyymälän valaistus osana FCR-D häiriöreserviä	23
4.3	Häiriö- ja käyttöreservin vertailu	24
5	POHDINTA	26
	LÄHTEET	28

1 JOHDANTO

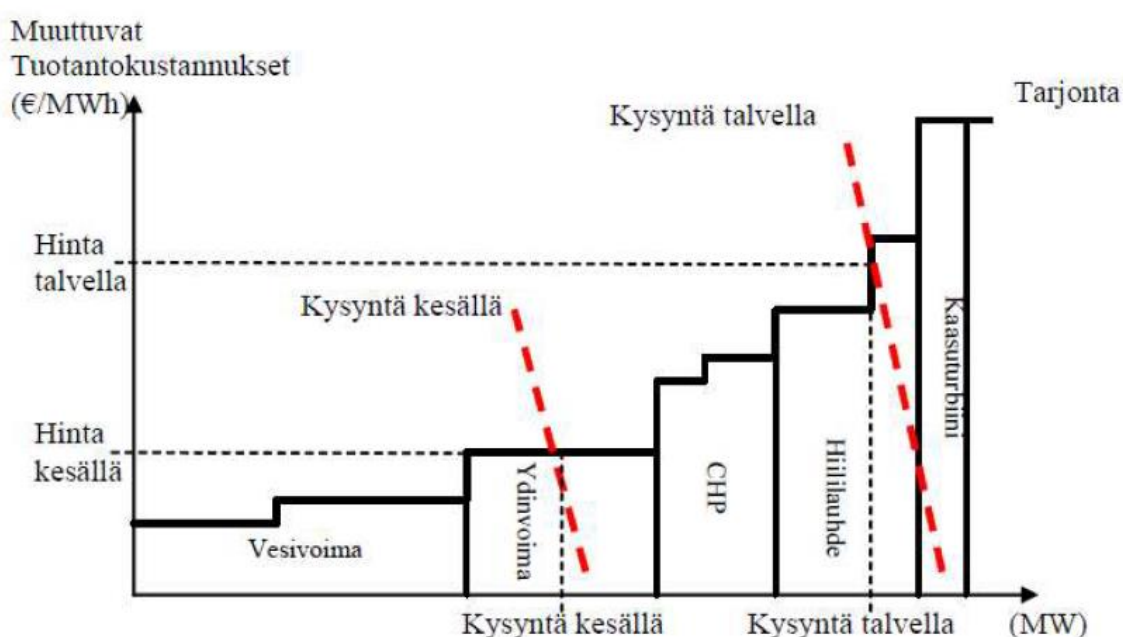
Kysynnänjousto, kysyntäjousto ja kulutusjousto ovat rinnakkaisia käsityksiä, joilla tarkoitetaan samaa asiaa. Kun kuluttaja reagoi sähkönhinnan muutokseen, puhutaan kysynnänjoustosta (Henttu, T. 2014, 20). Sähköverkkoon pitää jatkuvasti tuottaa sähkötehoa yhtä paljon kuin siellä on kulutusta. Kun tulevaisuudessa siirrytään enenevässä määrin uusiutuviin ja sääriippuvaisiin energiantuotantomuotoihin, kuten aurinko- ja tuulivoimaan, tarvitaan verkolle toimijoita taasaamaan verkon epätasapainoa. Epätasapainoa aiheuttaa myös sähköautojen yleistyminen. Verkolle tulee äkillisiä tehontarpeita, kun samanaikaisesti ladataan autoja tehokkailla latauslaitteilla. Sähköverkon taajuus kertoo verkon tehotasapainosta. Ideaalitilanteessa sähköverkon taajuus on 50 Hz. Kun tuotantoa on liikaa kulutukseen nähden, taajuus nousee. Vastaavasti kun kulutusta on enemmän tuotantoon nähden, taajuus laskee. Kuormituksen alentaminen vastaa sähköverkolle samaa asiaa kuin sähköntuotannon lisääminen. (Energiateollisuus ry. Kulutusjousto.)

Tässä opinnäytetyössä tutustuttiin Fingridin ylläpitämiin kysyntäjoustomarkkinoihin ja tutkittiin kiinteistön valaistusjärjestelmän potentiaalia osallistua näille markkinoille säilyttäen määräysten ja standardien vaatimukset ja ohjeistukset. Oleellisin valaistusstandardi on sisätyökohteiden valaistusstandardi SFS-EN 12464-1:2011. Luvussa 4 esitellään esimerkkimyymälän myyntialueen valaistus. Myymälän valaistuksen osalta tutkittiin, millainen potentiaali tällä olisi osallistua Fingridin ylläpitämiin FCR-N käyttöreserviin tai FCR-D häiriöreserviin, ja millaiset tuotto-odotukset reserviin liittymisellä olisi.

Aggregointi on välttämätöntä valaistuskuormien liittämisessä osaksi reserviä, jotta saavutetaan reservien minimitarjouskoot. Työssä ei oteta kantaa, miten aggregointi tai erilainen tilanneohjaus toteutetaan. Selvitystyö tehtiin Purso Oy:n valaistusyksikölle kartoittamaan valaistusjärjestelmien potentiaalia osana kysyntäjoustomarkkinoita.

2 SÄHKÖENERGIAMARKKINAT

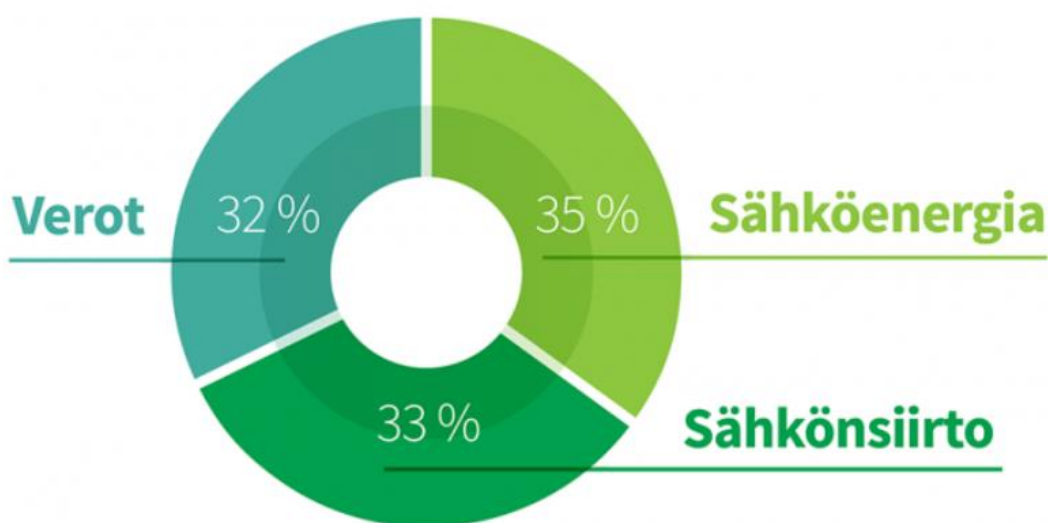
Sähköenergian hintaan vaikuttaa, miten se on tuotettu. Esimerkiksi vesi-, aurinko- ja tuulivoimalla tuotettu energia on pitkällä tähtäimellä halvempaa kuin fossiilisilla polttoaineilla tuotettu energia, sillä edellä mainituissa uusiutuviissa energiantuotantomuodoissa ei ole polttoainekustannuksia. (Henttu, T. 2014, 9.) Kuvassa 1 on esitetty eri tuotantotapojen vaikutus sähkön hintaan.



KUVA 1. Sähkön hinnan muodostuminen tuotantotavan mukaan (Henttu, T. 2014, 14) (Lakervi & Partanen 2008)

Kuva kertoo, missä järjestyksessä on taloudellisesti kannattavinta käynnistää erityyppisiä voimaloita tehon kysynnän kasvaessa. Ydinvoimalla ja vesivoimalla on mahdollista tuottaa koko kesänaikainen kysyntä. Talvella joudutaan turvautumaan näiden lisäksi kaukolämmön kanssa yhteistuotannossa tuotettuun sähköön sekä hiili- ja kaasuvoimaan. Kuva on julkaistu Lakervin ja Partasen vuonna 2008 ilmestyneessä Sähkönjakelutekniikka-kirjassa, jolloin aurinko- ja tuulivoiman käyttö on ollut Suomessa niin marginaalista, ettei niitä ole tässä kuvassa huomioitu.

Polttoaineen lisäksi loppukäyttäjän kWh-hinnassa on mukana energiayhtiön tuotantojärjestelmien huolto ja ylläpito sekä energiayhtiön riskinotto sähköpörssi-markkinoilla. Alueelliselle jakeluverkkoyhtiölle loppukäyttäjä maksaa sähkön siirrostä kWh-perusteisesti. Siirtomaksu pitää sisällään verkon infrastruktuurin ylläpidon ja päivittämisen. Näiden lisäksi loppukäyttäjä maksaa sähköveron ja arvonlisäveron. (Henttu, T. 2014, 9.) Kuvassa 2 esitetään eri osien vaikutukset sähkönhintaan.



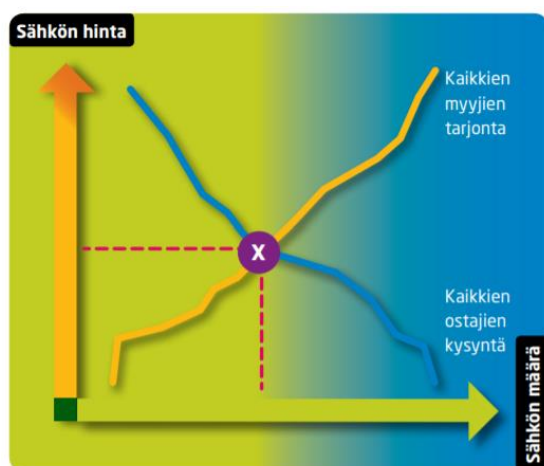
KUVA 2. Kotitalouskäyttäjän sähkönhinnan muodostuminen (Nivos 2019)

Suurien kuluttajien siirtomaksuissa on osana myös tehomaksut, jotka määräytyvät huipputehon mukaan. Esimerkiksi Tampereen Sähköverkolla laskutettava pätöteho määräytyy liukuvan 12 kuukauden aikana mitatun kahden suurimman tehohiipun keskiarvon mukaan €/kW/kk perusteisesti (Tampereen Sähköverkko Oy 2017). Tämä ohjaa suurempia kuluttajia optimoimaan sähkönkulutustaan taseisemmaksi ja hyödyntämään kiinteistön sisäisiä tehonohjauksia.

2.1 Sähkön tukkumarkkinat

Pohjoismaissa käydään sähkökauppaa Nord Pool -sähköpörssissä. Pörssimarkkinamuodon tarkoitus on pitää sähkön hinta kohtuullisena, kun myyjien tarjonta ja ostajien kysyntä kohtaavat (kuva 3). Nord Poolissa sähkökauppaa käyvät sähkön tuottajat, suuret kuluttajayhtiöt ja välittäjäyhtiöt. Nord Poolissa käydään kaup-

paa Elspot-markkina-alueella, jonka tuntihinnat on määritetty päivää ennen osto-tapahtumaa ja Elbas-markkina-alueella, jossa käydään päivän sisäistä kauppaa. Vuorokauden jokaiselle tunnille määritetään hinta erikseen. Elspot-hinta on tukumarkkinoilla toimijoiden paras arvio seuraavan päivän kysynnän ja tarjonnan tilanteesta. Jos arvio on paljon pielessä, tulee päivänsisäisille Elbas-markkinoille paljon kysyntää, jolloin energian hinta nousee. (Henttu, T. 2014, 15–16.)



KUVA 3. Sähkön pörssihinnan muodostuminen (Energiateollisuus ry & Fingrid Oyj n.d., 11)

Kun sähköpörssissä toimijat käyvät kauppaa joka tunnille omalla hinnalla, kuluttajille tarkoitetuilla vähittäismarkkinoilla sähkön välittäjä myy sähköä yleensä kiinteään kWh-hintaan. Energiayhtiöt kuitenkin tarjoavat myös kuluttajille mahdollisuuden ostaa sähkönsä tuntikohtaisilla spot-hinnoilla, jolloin kuluttajalla on selkeä mahdollisuus vaikuttaa sähkölaskunsa suuruuteen ajastamalla tehon kulutustaan halvemmille tunneille. Kuluttajalle spot-hinta pitää sisällään pörssihinnan ja energiayhtiön ”välityspalkkion”. (Ollikka, K. 2017.)

2.2 Kysyntäjoustomarkkinat

Kysyntäjoustoa on käytetty jo pitkään muun muassa sähkölämmityksessä, kun kuluttajat ovat ohjanneet lämminvesivaraajia päälle yöaikaan halvemmalla sähköllä. Perinteisesti kysyntäjoustoa on hyödynnetty kiinteistön sisäisessä tehonohjauksessa siirtämällä kulutusta halvemmille tunneille. Kysyntäjoustoa tullaan lähitulevaisuudessa hyödyntämään yhä enemmän myös verkon kuormituksen ta-

saamiseksi, jolloin verkkoyhtiö maksaa kuluttajalle tehon pudotuksesta tai kasvattuksesta. Jatkuvasti säätyvän tehonohjauksen ei ole tarkoitus näkyä tilan käyttäjille. Jos kuorma osallistuu kysyntäjoustoon vain verkon ollessa kriittisessä tilassa, tällöin on mahdollista ohjata tehoa myös siten, että käyttäjät havaitsevat muutoksen.

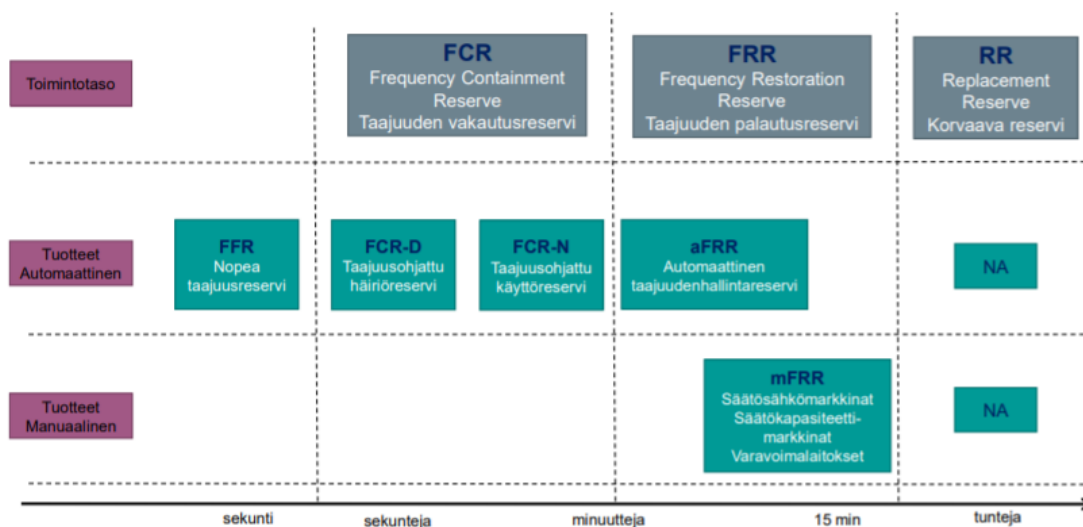
Euroopan parlamentin ja neuvoston direktiivissä 2019/944 puhutaan muun muassa jäsenvaltioiden tehtävistä, miten edistetään aktiivisten käyttäjien osallistumista sähkömarkkinoille. Jäsenvaltioiden on sallittava ja edistettävä loppuasiakaiden osallistumismahdollisuuksia kysyntäjoustoon aggregoinnin välityksellä (ks. luku 2.4) tai itsenäisesti. Tämä direktiivi luo selkeää mielikuvaa siitä, mihin suuntaan sähkömarkkinat ovat kehittymässä. Käyttäjiä eli kuorman haltijoita ohjataan kannustimilla olemaan mukana sähkömarkkinoilla. (Direktiivi 2019/944 artikla 15 ja 17.)

Suomen kantaverkkoyhtiö Fingrid ylläpitää taulukon 1 mukaisia reservejä, eli toisin sanoen markkinoita, joissa sähkömarkkinaosapuolten on mahdollista käydä kauppaa joustavilla resursseillaan ja hyötyä niistä taloudellisesti. Eri markkinapaikoilla on erilaisia vaatimuksia liittyen kuorman kapasiteettiin ja säädettävyyteen. Eri markkinoilla on myös erilaiset tuotto-odotukset. (Korpio, J. 2019, 19.)

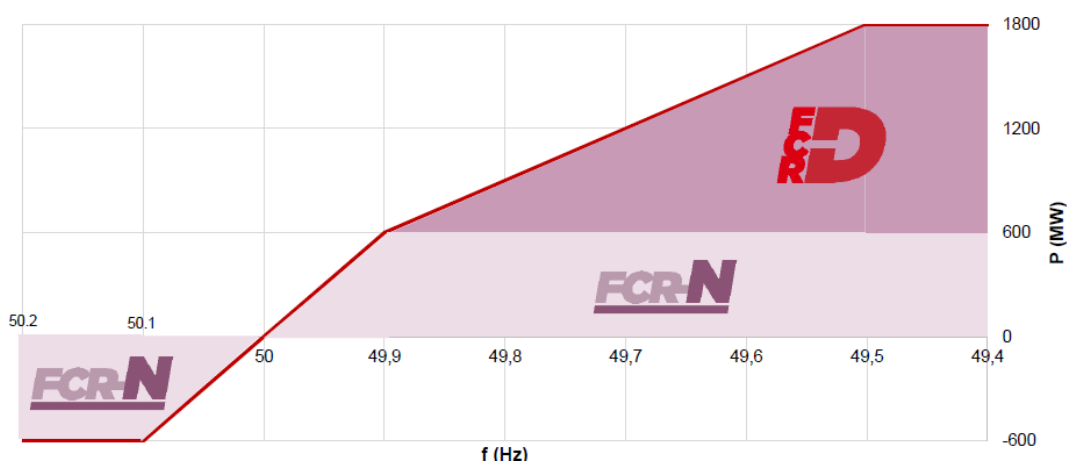
TAULUKKO 1. Fingridin tarjoamat kysyntäjoustop markkinapaikat (Korpio, J. 2019, 20)

Lyhenne	Markkinapaikka	Minimitarjouskoko [MW]	Sulkeutumisaikakohta	Aktivoitumisikkuna
FCR-N	Taajuusohjattu käyttöreservi	0,1	Tuntimarkkinat edellisenä päivänä klo 18.30	0,1 Hz muutos 100 % 3 min
FCR-D	Taajuusohjattu häiriöreservi	1	Tuntimarkkinat edellisenä päivänä klo 18.30	Voimalaitokset: lineaarisesti välillä 49,9 - 49,5 Hz, kun f alle 49,5 50 % 5 s ja 100% 30 s Relekytketyt kuormat: 49,7 Hz 5s TAI 49,6 Hz 3s TAI 49,5 Hz 1s
aFRR	Automaattinen taajuudenhallintareservi	5	Edellisenä päivänä klo 17	100 % 2 min
mFRR	Säätösähkömarkkinat	5	45 min ennen käyttötuntia	100 % 15 min
mFRR	Säätökapasiteetti-markkinat	5	Edellisviikon tiistai klo 12	100 % 15 min
Elspot	Vuorokausimarkkina	0,1	Edellisenä päivänä klo 13	12 h
Elbas	Päivän sisäinen markkina	0,1	30 min ennen käyttötuntia	1 h
	Tehoreservi	10	-	15 min kuormille, 12 h voimalaitoksille

Kuvassa 4 on avattu eri reservien toimintaa. Taajuuden vakautusreservejä FCR-D ja FCR-N käytetään jatkuvaan taajuuden hallintaan. FCR-D häiriöreservi kykenee vain verkon ylössäätöön eli voimalaitoksilla tehoa lisätään tai kuormilla tehoa pudotetaan. FCR-N käyttöreservi säätyy jatkuvasti taajuuden muuttuessa, ja toimii sekä verkon ylössäädössä että alassäädössä. Häiriöreservin tulee aktivoitua sekunneissa ja sitä käytetään vain suurissa taajuuspoikkeamissa. Käyttöreservi on käytössä jatkuvasti ja sen tulee säätyä parin minuutin viiveellä. Kuvasta 5 nähdään vakautusreservien aktivoituminen taajuuden funktiona.



KUVA 4. Pohjoismaissa käytössä olevat reservit (Fingrid Oyj 2019, 4)



KUVA 5. Vakautusreservien aktivoituminen taajuuden funktiona (Fingrid Oyj 2019, 9)

Taajuuden palautusreservien aFRR ja mFRR tarkoitus on suuremmissa heilautteluissa palauttaa taajuus normaalialueelle (49,9-50,1 Hz) ja vapauttaa aktivoituneet taajuuden vakautusreservit takaisin käyttöön. Korvaavia reservejä ei ole käytössä Pohjoismaisessa sähköjärjestelmässä. Niiden tarkoitus on palauttaa aktivoituneet taajuuden palautusreservit takaisin valmiuteen häiriötilanteiden jälkeen. (Fingrid Oyj 2019, 6–8.)

2.3 Vakautusreservit FCR-N ja FCR-D

Vakautusreserveille on mahdollista osallistua vuosi- tai tuntimarkkinoilla. Reservinhaltija tekee näihin oikeuttavan sopimuksen Fingridin kanssa. Vuosimarkkinoilla on koko vuoden kiinteä hinta ja tuntimarkkinoilla Fingrid käyttää tarjoukset

hintajärjestyksessä. Tuntikaupat Fingrid vahvistaa edellisen vuorokauden iltana. Vuosimarkkinahinnat ja määrät Fingrid määrittää jokaiselle vuodelle edeltävänä syksynä avoimen tarjouskilpailun perusteella. (Fingrid Oyj. n.d. Taajuusohjattu käyttö- ja häiriöreservi...) Markkinat toimivat siten, että jokainen toimija saa saman hinnan, mikä on ollut korkein hyväksytty tarjous.

Käyttöreservi FCR-N on tuottavin markkinapaikka. Vuonna 2019 korvaustaso oli 13,50 €/MW,h vuosimarkkinoilla. Käyttöreservi aktivoituu useita kertoja tunnissa ja minimitarjouskoko on 0,1 MW. Häiriöreservi FCR-D aktivoituu muutamia kertoja päivässä ja minimitarjouskoko on 1 MW. Vuonna 2019 häiriöreservin korvaustaso oli 2,40 €/MW,h vuosimarkkinoilla. (Fingrid Oyj. n.d. Taajuusohjattu käyttö- ja häiriöreservi...)

TAULUKKO 2. Vakautusreservien kokonaismäärät ja vuosimarkkinankorvaustasot eri vuosina (Fingrid Oyj. n.d. Taajuusohjattu käyttö- ja häiriöreservi...)

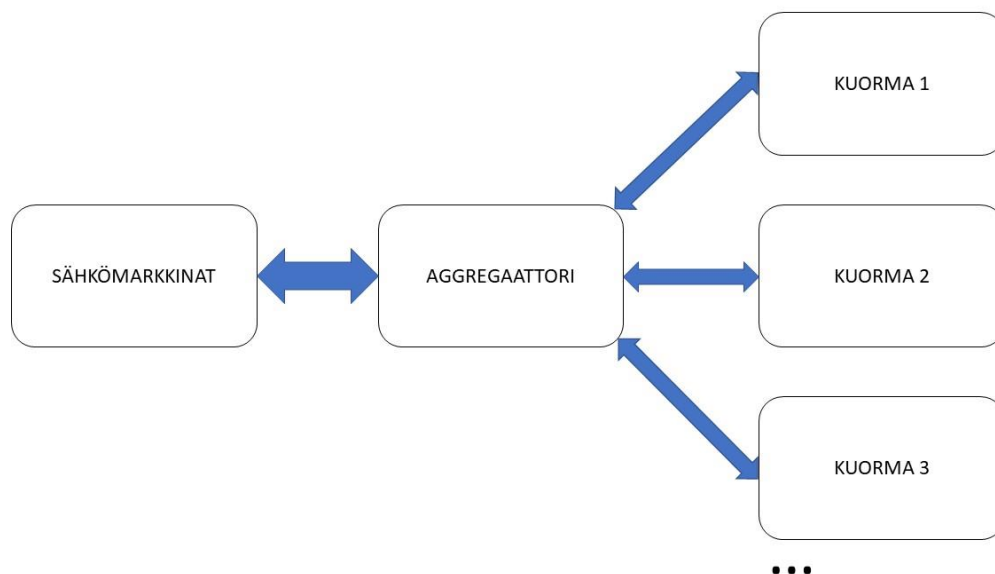
	FCR-N hinta (€/MW,h)	FCR-N määrä (MW)	FCR-D hinta (€/MW,h)	FCR-D määrä (MW)
2011	9,97	71	1,48	244,3
2012	11,97	72,7	2,8	346,9
2013	14,36	73,5	3,36	299,8
2014	15,8	75,4	4,03	318,7
2015	16,21	73,6	4,13	297,5
2016	17,42	89	4,5	367
2017	13,00	55,0	4,7	455,7
2018	14,00	72,6	2,8	435,0
2019	13,50	79	2,40	445,6
2020	13,20	87,1	1,90	458,3*

*josta 38 MW yhdellä portaalla aktivoituvaa kuormaa, johon sovelletaan 100 MW:n hankintarajaa

Kun mietitään valaistusta ja käyttöreserviä, yhtenä ongelmana on vaatimus sekä ylös- että alassäätötoiminnassa. Valaistus suunnitellaan yleensä käytettäväksi sataprosenttisesti tai lähes sataprosenttisesti. Käyttöreserviin osallistumista ajatellen valaistus tulisi suunnitella normaalia käyttöä tehokkaammaksi, jotta myös normaalin käytön aikana olisi mahdollista nostaa tehoa.

2.4 Aggregaattori

Minimitarjoukseen ollessa 100 kW käyttöreservissä, tarvitaan suuri yksittäinen kuorma, jotta kuorma voisi itsenäisesti osallistua näille markkinoille. Aggregaattori on sähköverkolla toimija, joka kokoaa pienempiä tehokuormia isommaksi kokonaisuudeksi, ja tarjoaa tätä kokonaisuutta reservimarkkinoille. Kuvassa 6 on avattu aggregaattorin toimintaperiaatetta.



KUVA 6. Aggregaattorin toimintaperiaate

Aggregaattori voi hallinnoida kysynnänjoustoresurssinaan kuormia, mikrotuotantoa, energiavarastoja ja/tai suurempia asiakkaita. Sähkömarkkinoille aggregaattori voi sopimusten mukaan myydä kysynnänjoustoresurssia Fingridin kysynnänjoustomarkkinoille, jakeluverkkoyhtiölle jännitteen säätöön ja/tai sähkömarkkinoille Nord Pooliin. (Henttu, T. 2014, 23.)

3 MÄÄRÄYSTEN MUKAISEN VALAISTUSJÄRJESTELMÄN SUUNNITTELU KYSYNNÄNJOUSTOA AJATELLEN

Jos rakennuksen valaistusta ajatellaan hyödynnettävän kysynnänjoustossa, on sen täytettävä kaikissa tilanteissa olemassa olevien määräysten ja standardien vaatimukset liittyen valaistusolosuhteisiin. Jotta valaistusta voidaan hyödyntää kysyntäjoustossa, on sitä pystyttävä ohjaamaan ja säätämään. Valaistuksen ohjauksella on myös suuri vaikutus kiinteistön energiatehokkuutta ja älykkyyttä mittaessa.

Valaistus on suunniteltava siten, että se täyttää voimassa olevat standardit. Oleellisin valaistusstandardi on SFS-EN 12464-1:2011 Työkohteiden valaistusstandardi, joka käsittelee työympäristöjen valaistusolosuhteita. Tätä standardia käydään läpi luvussa 3.3, jossa keskitytään vaadittuihin valaistusvoimakkuuksiin.

3.1 Lait ja asetukset liittyen valaistuksen suunnitteluun

Ympäristöministeriön asetuksessa 1009/2017 §7 on maininta valaistusolosuhteista. Asetuksen mukaan valaistus on suunniteltava siten, että sen ryhmittely ja ohjaus palvelevat tiloissa tapahtuvaa toimintaa, ja että sisätiloissa ylläpidetään näkötehtävän edellyttämää valaistusta tilojen suunniteltuna käyttöaikana.

Työturvallisuuslaissa 2002/738 §34 on maininta työpaikan valaistuksesta. Työpaikalla on oltava työtehtävän edellyttämä sekä työntekijälle sopiva ja riittävän tehokas valaistus. Pykälässä kehoitetaan hyödyntämään mahdollisuuksien mukaan myös luonnonvaloa.

Valtioneuvoston päätöksen 1993/1405 liitteessä otetaan kantaa valaistukseen yleisellä tasolla näyttöpäätetyössä. Päätöksen mukaan yleisvalaistuksen ja kohdevalaistuksen on taattava riittävä ja tarkoituksenmukainen valo työpisteelle. Lisäksi valaistuksen on luotava tarkoituksenmukainen kontrasti kuvaruudun ja taustan välille työn tyyppi ja käyttäjän näkövaatimukset mukaan huomioiden.

Edellä mainitut ympäristöministeriön asetus, työturvallisuuslaki ja valtioneuvoston päätös eivät tarkemmin ota kantaa valaistuksen ohjauksiin eivätkä valaistustasoihin. Lait ja asetukset käytännössä ohjaavat suunnittelijan valaistusstandardien pariin.

Ympäristöministeriön asetuksen 1010/2017 pykälässä § 32 vaaditaan suunnittelussa otettavaksi huomioon mahdollisuudet, miten pystyttäisiin pienentämään sähkön huipputehoa ja miten tämän ohjausta voitaisiin parantaa. Tämä vaikuttaa oleellisesti myös valaistuksen suunnitteluun.

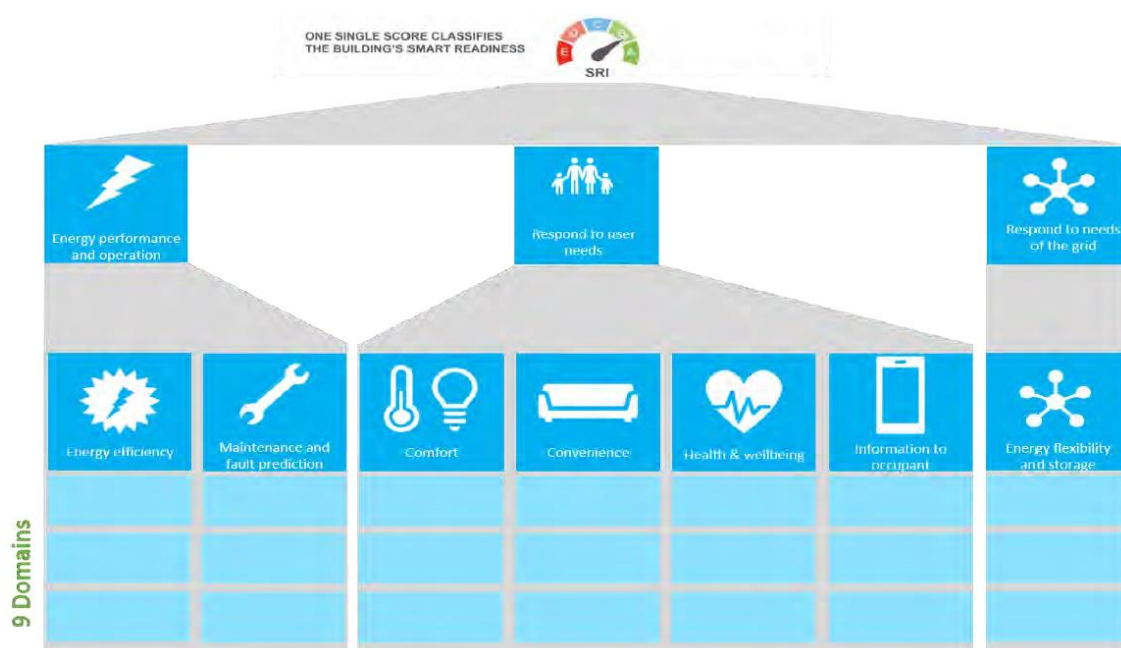
Ympäristöministeriön asetuksessa uuden rakennuksen energiatehokkuudesta mainitaan valaistuksen ohjauksien vaikutuksista energiatehokkuuteen ja kerrotaan, miten valaistus otetaan huomioon E-lukua laskettaessa. E-luvun laskentaan on laskettava valaistuksen aiheuttama vuotuinen lämpökuorma (kWh/m^2). Valaistuksen lämpökuormalla ja valaistuksen nimellisellä teholla neliömetriä kohti tarkoitetaan näissä yhteyksissä samaa asiaa. Laskennassa otetaan kertoimina huomioon rakennuksen käyttötunnit vuorokaudessa, rakennuksen käyttöpäivät viikossa ja keskimääräinen valaistuksen käyttöaste. Asetuksessa määritellystä W/m^2 -arvosta voidaan poiketa, jos todellinen arvo voidaan valaistussuunnitelmalla todentaa. Valaistuksen huomioimisesta E-luvun laskennassa on tehty opas. Oppaan liitteistä löytyy kertoimia eri ohjauksista, joilla voidaan myös alentaa valaistuksen W/m^2 -arvoa. (Liljeström, K. & Vähä-Ruohola M. 2018.)

3.2 Smart readiness indicator (SRI)

SRI-arvo on Euroopan komission alulle panema indikaattori. SRI ei ole vielä valmis indikaattori, eikä mikään taho vaadi SRI-luvun laskentaa, mutta tämänlaiselle luvulle on paikkansa nykyisessä rakentamiskulttuurissa, joko itsenäisesti omaan tai integroituna E-lukuun.

Indikaattori tarkastelee rakennusten energiatehokkuutta ja älykkyyttä. Perustana pidetään valmiutta mukautua käyttäjän tarpeisiin, valmiutta helpottaa huoltamista ja tehostaa toimintaa sekä valmiutta mukautua sähköverkolla tapahtuviin muu-

toksiin. Valmiutta mitataan seitsemässä luokassa, joiden vaikutukset jaetaan kolmeen kategoriaan. Kuvassa 7 on havainnollistettu indikaattorin osa-alueiden vaikutukset kokonaisuuteen.



KUVA 7. SRI-arvon muodostuminen (Virtanen, M. 2019, 13)

Kuvan seitsemässä kategoriassa huomioidaan yhdeksän osa-aluetta: lämmitys, jäähdytys, lämmin käyttövesi, ohjattu ilmanvaihto, valaistus, dynaaminen rakennuskuori, sähkö, sähköauton lataus sekä seurannan ja ohjattavuuden mahdollisuudet (Virtanen, M. 2019, 11–12). Kuvasta nähdään, että kysynnänjousto määrittää noin 33 % SRI:n arvosta (Respond to the needs of the grid). SRI-arvo on prosenttiluku, joka tulee kolmen pääkategorian keskiarvosta. Kolmeen kategoriaan saadaan prosenttiluku näihin linkitettyjen alakategorioiden prosenttilukujen keskiarvosta.

Suomessa on testimielessä määritelty SRI-luku monille erityyppisille rakennuksille, esimerkkeinä ostoskeskus Sello ja koulutuskeskus Väre. Sello sai SRI-laskennassa 92 %, mikä on erittäin hyvä tulos 100 %:sta. Väre sai vain 52 % vaikka kyseessä on nykyaikainen ja erittäin energiatehokas rakennus. Suurimpana erona näiden välillä oli nimenomaan mahdollisuudet mukautua sähköverkolla tapahtuviin muutoksiin sekä omavaraisuus energiantuotannossa. (Virtanen, M. 2019, 20–22.)

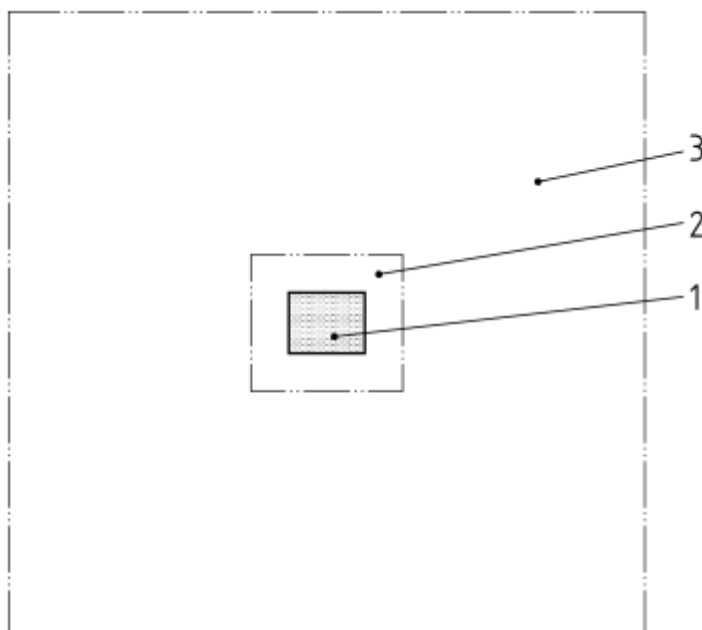
3.3 Sisätyökohteiden valaistusstandardi SFS-EN 12464-1:2011

Sisätyökohteiden valaistusstandardissa annetaan ohjeita erilaisten sisätyöalueiden valaistusvaatimuksiin. Riittävän ja tarkoituksenmukaisen valaistuksen tarkoitus on parantaa työskentelyn tehoa, työntekijän näkökykyä ja työntekijän näkömukavuutta. Standardissa ei oteta kantaa siihen, miten valaistus on toteutettu, eli valo voidaan tuottaa päivänvalolla, keinovalolla tai näiden yhdistelmällä. Standardissa ei esitetä ratkaisumalleja, vaan annetaan lopputulokselle tavoitellut ohjearvot. (SFS-EN 12464-1 2011, 6–10.) Suomessa kansalliset säädökset ja määräykset valaistuksen suhteen ovat hyvin puutteellisia, joten tämä standardi on käytännössä valaistussuunnittelussa velvoittava dokumentti.

Standardin valaistusvaatimuksia ohjaa kolme perustarvetta: näkömukavuus, näkötehokkuus ja turvallisuus. Näkömukavuus on tunne, jolloin työntekijä kokee valaistuksen vaikuttavan positiivisesti hyvinvointiin. Näkömukavuudella on epäsuora vaikutus parempaan tuottavuuteen ja työn laatuun. Näkötehokkuus antaa työntekijälle eväitä suoriutua näköä vaativasta tehtävästä myös vaativimmissa olosuhteissa ja pitempiä aikoja. Valaistuksella on myös suuri vaikutus turvallisuudentunteeseen. Tärkeimmät tekijät, joihin valaistusta suunniteltaessa voidaan vaikuttaa, ovat luminanssijakauma, valaistusvoimakkuus, valon suuntaus, valon vaihtelevuus, valon väri, valon värintoisto-ominaisuudet, häikäisy ja mahdollinen välkyntä. (SFS-EN 12464-1 2011, 14.)

Jotta valaistuserot ovat subjektiivisesti havaittavissa, suositellaan käytettäväksi valaistusvoimakkuusasteikkona seuraavia luksitasoja: 20-30-50-75-100-150-200-300-500-750-1000-1500-2000-3000-5000. Standardissa määritetään näkötehtävästä riippuen erilaisille työalueille vaadittu keskimääräinen luksitaso (E_m). Standardin ohjearvotaulukoissa annettujen arvojen on täytyttävä työalueen tarkastelutasolla riippumatta valaistusjärjestelmän iästä tai kunnosta. Ohjearvosta voidaan perustellusti poiketa molempiin suuntiin yhden asteikon portaan verran, mikäli näköolosuhteet poikkeavat tavanomaisesta. (SFS-EN 12464-1 2011, 16 & 18.)

Standardin mukaan valaistus on tarkoituksenmukaista suunnitella nimenomaan työaluetta ajatellen. Jos valaistusta suunniteltaessa ei ole tietoa työpisteiden sijainnista, suunnitellaan tilaan ohjearvon mukainen työalueen valaistusvoimakkuus 0,4 tasaisuudella. (SFS-EN 12464-1 2011, 18.) Käytännössä lähtötiedot ovat usein hyvinkin puutteelliset, jolloin joudutaan tekemään oletuksia ja monesti lopputuloksesta ei saada niin energiatehokasta kuin olisi ollut mahdollista.



KUVA 8. Työalue, lähialue ja tausta-alue (SFS-EN 12464-1 2011, 20)

Kuva 8 havainnollistaa valaistussuunnittelun alueita. Työalue on tummennettu. Työalueen välitön lähiympäristö on vähintään 0,5 metriä leveä vyöhyke työalueen ympärillä. Tausta-alue on 3 metriä leveä lähialuetta ympäröivä alue tilan asettamissa rajoissa. Esimerkiksi, jos työalueelle suunnitellaan 500 lx valaistusvoimakkuus, on lähialueelle minimi sallittu yksi porras pienempi eli 300 lx. Tausta-alueella täytyy olla vähintään 1/3 lähialueen valaistusvoimakkuudesta, eli tässä tapauksessa vähintään 100 lx. Taulukossa 3 on lähialueen minimivalaistusvoimakkuudet verrattuna työalueeseen. (SFS-EN 12464-1 2011, 20-22.)

TAULUKKO 3. Työalueen ja lähialueen valaistusvoimakkuuksien suhde (SFS-EN 12464-1 2011, 21)

Työalueen valaistusvoimakkuus E_{task} lx	Välittömän lähiympäristön valaistusvoimakkuus lx
≥ 750	500
500	300
300	200
200	150
150	E_{task}
100	E_{task}
≤ 50	E_{task}

Työalueen valaistusvoimakkuuden tasaisuuksille annetaan standardin taulukoissa arvoja. Välittömässä lähiympäristössä eli lähialueella tasaisuuden on oltava vähintään 0,40 ja tausta-alueella tasaisuuden on oltava vähintään 0,10. (SFS-EN 12464-1 2011, 22.)

Standardin mukaan valaistus on suunniteltava tilaan energiatehokkaalla tavalla täyttäen kuitenkin standardin vaatimukset. Standardi neuvoo energiatehokkuuteen läsnäolo- ja päivänvalo-ohjausta hyödyntämällä. Standardin taulukoissa annetut luksitasot ovat keskimääräisen valaistusvoimakkuuden ylläpidettäviä vähimmäisvaatimuksia. (SFS-EN 12464-1 2011, 32.)

Standardi ei ota kantaa valaistuksen ohjaukseen kysynnänjouston mukaan, kunhan standardin taulukoiden mukaisissa tiloissa täyttyy koko ajan valaistusvoimakkuuden vähimmäisvaatimukset. Standardissa on kuitenkin maininta valon vaihtelevuuden merkityksestä ihmisen hyvinvoinnille, ja siitä kuinka tulevaisuuden valaistusstandardissa olisi mahdollisesti otettu tämä huomioon ja annettu suositellut vaihteluvälit taulukoihin. (SFS-EN 12464-1 2011, 34.)

TAULUKKO 4. Standardin taulukko koskien liiketiloja (SFS-EN 12464, 54)

Viitenro.	Tila, tehtävä tai toiminta	\bar{E}_m lx	UGR_L –	U_o –	R_a –	Erityisvaatimukset
5.27.1	Myyntialue	300	22	0,40	80	
5.27.2	Kassa-alue	500	19	0,60	80	
5.27.3	Pakkauspöytä	500	19	0,60	80	

Taulukon 4 mukaan standardi ei ota kantaa liiketiloissa muuhun kuin myyntialueen yleisvalaistukseen, kassa-alueen työalueeseen ja pakkauspöydän työalueeseen. Standardissa ei oteta kantaa esimerkiksi liiketilan hyllyjen pystypintojen valaistukseen, millä taas on suuri merkitys asiakkaan mielikuvaan ja viihtyvyyteen liikkeessä. Tästä syystä monella liikkeellä on omat suunnitteluohjeistukset, miten heidän tilansa tulee valaista ja vaatimukset ovat paljon korkeammalla kuin olemassa olevassa standardissa.

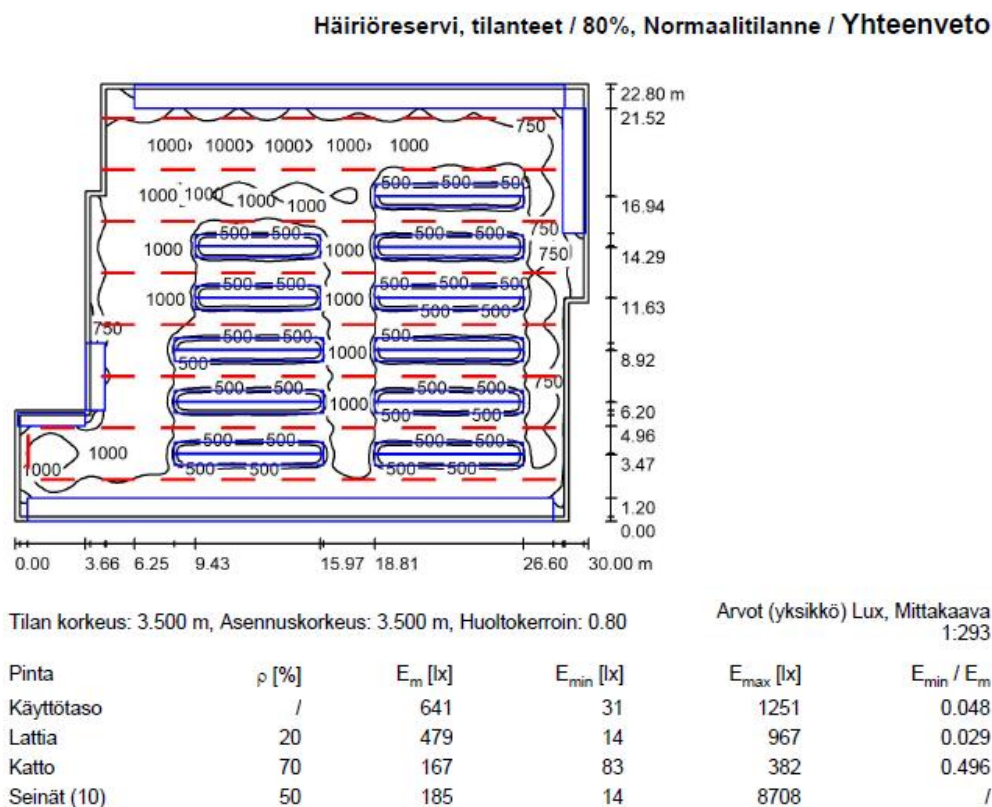
UGR (Unified Glare Rating) kertoo kiusahäikäisystä. Kiusahäikäisyä aiheuttaa usein kirkkaat valaisimet. Tämä on seikka, johon on syytä kiinnittää huomiota valaistussuunnittelussa, jos valaistusta ohjataan kysyntäjouston mukaan paljon kirkkaammaksi.

4 VALAISTUKSEN POTENTIAALI KYSYNTÄJOUSTOSSA

Tässä luvussa esitellään esimerkkimyymälän valaistus ja käydään läpi erilaisia skenaarioita, millä tavoin valaistusrasituksen olisi mahdollista osallistua käyttö- tai häiriöreservimarkkinoille. Esimerkkikohteena on pieni myymälä ja tämän myyntialueen valaistus. Ansaintalaskelmissa on koottu tarvittavat määrät samantasoisia myymälöitä yhteen, jotta on saavutettu kyseisen reservin minimitarjouskoko. Esimerkkimyymälän myyntialueella on 67 kappaletta 74 W säädettäviä LED-valaisimia. Uusia valaisimia ei yleensä myymälöissä käytetä heti 100 % teholla. Esimerkissä valaisimia käytetään normaalitilanteessa 80 %. Taulukossa 5 esitetään myymälän valaistuksen tehonkulutus normaalitilanteessa. Eri tilanteiden valotasot laskettiin Dialux 3.14 -ohjelmalla tavoitteena pysyä kaikissa tilanteissa standardin raameissa. Kuvasta 9 selviää myymälän pohjakuva sekä valaisin- ja hyllysijoittelu.

TAULUKKO 5. Myymälän valaistuksen teho normaalitilanteessa

Teho (W)	Käyttö (%)	kpl	Kokonaisteho (kW)
74	80 %	67	3.97



KUVA 9. Esimerkkimyymälän Dialux-laskennan yhteenvedo normaalitilanteessa

4.1 Esimerkkimyymälän valaistus osana FCR-N käyttöreserviä

Kappaleessa 2.2 ja taulukossa 1 esitellään reservien markkinapaikat ja näiden aktivoitumisvaatimukset. Suurin taloudellinen hyöty saadaan käyttäjälle, jos kuorma saadaan liitettyä osaksi käyttöreserviä, jossa minimitarjouskoko on 0,1 MW. Aktivoituminen tapahtuu taajuuden muuttuessa 0,1 Hz viimeistään 3 minuutin viiveellä. Tämä tarkoittaa käytännössä sitä, että taajuuden kasvaessa tai lasiessa 0,1 Hz, kuormalla joko lasketaan tai nostetaan tehoa tarjouskoon mukaan ja kuorman muutoksen on oltava valmis 3 minuutin sisällä taajuuden muutoksesta. 3 minuutin aikaikkuna antaa myös hyvät valmiudet toteuttaa aikaramppi valotasojen muutokselle minimoitaessa käyttäjien häirintää.

Verkon alassäädössä kuormalla tehoa kasvatetaan. Alassäätötilanteessa kuormaa on teknisesti mahdollista kasvattaa taulukon 6 arvojen mukaan. Joustoteho saadaan miinustamalla normaalitilanteen kokonaisteho säätötilanteen kokonaistehosta.

TAULUKKO 6. Myymälän valaistus verkon alassäätötilanteessa FCR-N

Teho (W)	Käyttö (%)	kpl	Kokonaisteho (kW)	Joustoteho (kW)
74	100 %	67	4.96	0.99

Verkon ylössäädössä kuormalla tehoa pudotetaan. FCR-N käyttöreserviin osallistuvan kuorman on kyettävä joustamaan saman verran sekä ylös- että alassäädössä. Verkon ylössäätötilanteessa valaistus ohjataan taulukon 7 mukaisesti.

TAULUKKO 7. Myymälän valaistus verkon ylössäätötilanteessa FCR-N

Teho (W)	Käyttö (%)	kpl	Kokonaisteho (kW)	Joustoteho (kW)
74	60 %	67	2.98	-0.99

Eri tilanteista tehtiin Dialux laskelmat kriittisille alueille (taulukko 8). Kaikissa tilanteissa standardin vaatimukset täyttyvät. Vaakatason mittaukset ovat laskennasta käyttötason korkeudelta.

TAULUKKO 8. Valaistusvoimakkuudet käyttöreservin eri toimintatilanteissa

Mittaus	Standardi (lx)	Normaalitilanne (lx) 80%	Verkon alassäätö (lx) 100%	Verkon ylössäätö (lx) 60%
Hyllyväli	300	640	800	480
Hyllyn pystypinta	-	310	390	230
Kassa-alue	500	920	1150	690

Standardi antaa myyntialueelle ja kassa-alueelle minimivalaistusvoimakkuudet, jotka täyttyvät joka tilanteessa. Pystypinnalle standardi ei määrittele vaatimuksia. Standardin raameissa valaistusta voitaisiin säätää alaspäin vielä merkittävästi, mutta jotta pystytään tarjoamaan saman verran tehoa ylös- ja alassäätöön on tyydyttävä tähän joustoon.

Minimissään 102 tämän tasoista myymälää voisi yhdessä tarjota joustoa käyttöreservimarkkinoille ylittäen minimitarjouskoon 0,1 MW. 102 myymälän tarjouskoko on noin 100,98 kW ylös- ja alassäätöön.

Fingrid on laskenut nettisivuillaan yksinkertaistetun esimerkin käyttöreservin vuosi- ja markkinoille 2018 vuoden korvaushinnoilla ja 7000 h pysyvyydellä (Fingrid. Ansaintamallit). Laskenta on korvaus reservin ylläpidosta. Yksinkertaistettu laskenta esimerkin 102 myymälälle vuoden 2020 hinnoilla laskettiin seuraavasti:

$$0,1 \text{ MW} * 13,20 \text{ €/MW} , h * 7000 \text{ h} = 9240 \text{ €/vuosi}.$$

4.2 Esimerkkimyymälän valaistus osana FCR-D häiriöreserviä

FCR-D häiriöreserviä käytetään vain verkon ylössäädössä, eli verkolla taajuuden laskiessa kuormilla pudotetaan tehoa. Häiriöreserville minimitarjouskoko on 1 MW, eli 10-kertainen verrattuna käyttöreserviin. Taajuuden laskiessa 49,97 hertsiin kuorman tehon on pudottava 5 sekunnin sisään. Nopea valotasojen muutos ei ole tilan käyttäjille mielekästä.

Dialuxilla mallinnettiin valaistustilanne, jolloin standardin vaatimukset vielä juuri täyttyvät ja käytetään tätä himmennysprosenttia teholaskuissa (taulukko 9).

TAULUKKO 9. Valaistusvoimakkuudet häiriöreservin eri toimintatilanteissa

Mittaus	Standardi (lx)	Normaalitilanne (lx) 80%	Verkon ylössäätö (lx) 45%
Hyllyväli	300	640	360
Hyllyn pystypinta	-	310	170
Kassa-alue	500	920	520

Kassa-alueen valaistusvoimakkuus laski 45 %:lla 520 luksiin. Tätä alemmas ei valotasoa voi päästää standardin rajoissa.

Normaalitilanteessa teho pysyy samana kuin käyttöreserviesimerkissä. Jousto-teho saadaan taulukon 10 arvoilla.

TAULUKKO 10. Myymälän valaistus verkon ylössäätötilanteessa FCR-D

Teho (W)	Käyttö (%)	kpl	Kokonaisteho (kW)	Joustoteho (kW)
74	45 %	67	2.23	-1.74

Jotta saavutetaan minimitarjouskoko häiriöreservimarkkinoille, täytyisi tämän ta-soisia myymälöitä aggregoida vähintään 575 kappaletta. Tällöin saavutetaan mi-nimi tarjouskoko 1 MW.

Häiriöreservin vuosimarkkinoiden ansaintamalliesimerkissä käytetään samaa laskuperiaatetta kuin käyttöreservin, eli 7000 h pysyvyys ja vuosimarkkinan hinta (Fingrid. Ansaintamallit).

$$1 \text{ MW} * 1,90 \text{ €/MW, h} * 7000 \text{ h} = 13\,300 \text{ €/vuosi}$$

4.3 Häiriö- ja käyttöreservin vertailu

Myymälän valaistuksen hyödyntäminen käyttöreservissä on käyttäjiä ajatellen parempi vaihtoehto kuin sen hyödyntäminen häiriöreservissä. Käyttöreservissä voidaan käyttää ohjauksessa pitkiäkin aikaramppeja, eli valaistus voidaan säätää pitkällä aikavälillä (max. 3 min.) mahdollisimman lineaarisesti määriteltyn valotasoon. Tämä ei ole häiriöreservissä mahdollista. Lisäksi käyttöreservin minimi-tarjouskoko on selkeästi pienempi, jolloin reservin tarjoajan ei tarvitse hallinnoida niin montaa kohdetta kuin häiriöreservissä.

Tietynlaisella valaistuksella on myös paikkansa häiriöreservissä. Esimerkiksi kasvihuoneiden valaistus on monta kertaa tehokkaampaa kuin myymälän ja siellä ei valotasojen nopeasta laskusta ole samanlaista haittaa kuin myymälässä.

5 POHDINTA

Opinnäytetyössä tutustuttiin laajasti erilaisiin kysynnäjoustomahdollisuuksiin ja saatiin kysynnäjoustomarkkinoista kiteytettyä tiivis teoriaosio. Määräykset ja standardit antavat tavoitteet valaistusvaatimuksiin ja valaistuksenohjaukseen. Tulevaisuudessa näissä tullaan varmasti ottamaan kantaa enemmän tehonohjauksiin ja kykyyn joustaa sähköverkolla tapahtuviin muutoksiin.

Reservimarkkinoista tutustuttiin tiiviimmin vakautusreserveihin FCR-N käyttöreserviin ja FCR-D häiriöreserviin. Nämä ovat valaistuksen näkökulmasta optimaalisimmat markkinapaikat. Esimerkkimyymälän valaistusjärjestelmää tutkittaessa tultiin siihen johtopäätökseen, että FCR-N käyttöreservi on tämänlaiselle valaistuskuormalle paras markkinapaikka. Käyttöreservin aktivoitumisaika on 3 minuuttia, jolloin valaistuksen ohjaukseen on mahdollista toteuttaa pitkäkin aikaramppi, jolloin käyttäjien häiritseminen minimoituu.

Työssä päästiin minimitiedoilla käsittelemään hyvin valaistustehoja myymälässä ja soveltamaan näitä Fingridin nettisivuilta löytyviin materiaaleihin. Tästä työstä rajattiin erilaiset ohjausratkaisut pois ja keskityttiin tehopotentiaaliin myymälän valaistuksessa. Kohde on suhteellisen pieni myymälä 67 valaisimen kanssa. Skaalattuna isompiin kohteisiin on mahdollista saada suurempaakin joustokapasiteettia pienemmällä aggregoinnilla. Esimerkiksi Kesellä on kauppoja Suomessa 1 592 kappaletta (Kesko 2020). Joukossa on pieniä K-Marketteja ja suuria K-Citymarketteja. Joustopotentiaalia siis löytyy kauppakiinteistöistä ja Fingridin puolelta rahallinen kannustus on olemassa. Eri tahojen yhteistyö on avainasemassa tämänlaisessa kehityksessä.

Kuten todettu, valaistuksen liittäminen osaksi kysyntäjoustomarkkinoita vaatii aggregointia. Jotta valaistusinfraa voitaisiin hyödyntää isommassa mittakaavassa osana kysyntäjoustomarkkinoita, vaatii se saumatonta yhteistyötä ja yhteistyöhalukkuutta aggregaattorilta, kiinteistön omistajalta ja Fingridiltä. Ei ole varmaa, miten kysyntäjoustoreservien markkinapaikat kehittyvät tulevaisuudessa, mutta EU:n direktiivissä 2019/944 on jo velvoite jäsenvaltioille edistää loppuasiakkaiden

osallistumismahdollisuuksia kulutusjoustoon joko aggregoinnin välityksellä tai itsenäisesti. Tämän kaltainen valaistuksen hyödyntämien tulee mahdollisesti olemaan normaalia tulevaisuudessa suurien kiinteistöjen rakentamisessa ja saneerausissa. Potentiaalia löytyy niin kauppakiinteistöistä kuin teollisuudesta.

LÄHTEET

Direktiivi 2012/27/EU. Euroopan parlamentin ja neuvoston direktiivi energiatehokkuudesta. Euroopan unionin virallinen lehti 14.11.2012. Luettu 17.3.2020. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/fi/TXT/?uri=CELEX:32012L0027>

Energiateollisuus ry & Fingrid Oyj. n.d. Hyvä tietää sähkömarkkinoista. Luettu 17.3.2020. https://www.fingrid.fi/globalassets/dokumentit/fi/julkaisut/uusi_versio_sahkomarkk.pdf

Fingrid Oyj. n.d. Ansaintamallit. Luettu 8.4.2020. <https://www.fingrid.fi/sahkomarkkinat/reservit-ja-saatosahko/kuinka-osallistua-reservimarkkinoille/ansaintamallit/>

Fingrid Oyj. 2019. Reservituotteet ja reservien markkinapaikat. Julkinen esitysmateriaali. <https://www.fingrid.fi/globalassets/dokumentit/fi/sahkomarkkinat/reservit/reservituotteet-ja-reservien-markkinapaikat.pdf>

Fingrid Oyj. n.d. Kysyntäjousto, markkinapaikat. Luettu 24.3.2020. <https://www.fingrid.fi/sahkomarkkinat/markkinoiden-yhtenaisyyssahkomarkkinoiden-tulevaisuus/kysyntajousto/#markkinapaikat>

Fingrid Oyj. n.d. Taajuusohjattu käyttö- ja häiriöreservi (FCR-N ja FCR-D), vuosisimakinahinnat ja toteutuneet tuntikaupat. Luettu 3.4.2020. <https://www.fingrid.fi/sahkomarkkinat/sahkomarkkinainformaatio/reservimarkkinainformaatio/Taajuusohjattu-kaytto-ja-hairioreservi-vuosimakinahankinta-ja-toteutuneet-tuntikaupat/>

Henttu, T. 2014. Valaistuksen käyttö kysynnän jouston resurssina. Teknillinen tiedekunta. Sähkömarkkinoiden koulutusohjelma. Lappeenrannan teknillinen yliopisto. Diplomityö.

Kesko. 2020. Luettu 16.2.2020. <https://www.kesko.fi/yritys/kesko-lyhyesti/>

Korpio, J. 2019. Sähkönjakeluverkko kysyntäjoustopon mahdollistajana. Sähkötekniikan korkeakoulu. Aalto yliopisto. Diplomityö.

Liljeström K. & Vähä-Ruohola M. 2018. Laskentaopas. Valaistuksen tehontiheyden ja tarpeenmukaisuuden huomioiminen E-luvun laskennassa.

Nivos Oy. Sähkö. Sähkönsiirron hinnastot. Sähköhinnan muodostuminen. Luettu 30.4.2020. <https://www.nivos.fi/sahko/sahkonsiirron-hinnastot>

Ollikka, K. 2017. Smart Energy Transition. Miten sähkömarkkinat toimivat? Luettu 17.3.2020. <http://smartenergytransition.fi/fi/miten-sahkomarkkinat-toimivat/>

SFS-EN 12464-1. 2011. Valo ja valaistus. Työkohteiden valaistus. Helsinki: Suomen standardisointimisto SFS. Luettu 17.3.2020. Vaatii käyttöoikeuden. <https://online-sfs-fi.libproxy.tuni.fi/fi/index/tuotteet/SFSsahko/CEN/ID2/1/174269.html.stx>

Työturvallisuuslaki 23.8.2002/738

Tampereen Sähköverkko Oy. 1.10.2017. Verkkopalveluhinnasto. Tehopohjaiset tuotteet. Luettu 3.4.2020. https://www.sahkolaitos.fi/globalassets/tiedos-tot/ohjeet-ja-opasteet/sahkoverkko/hinnastot-ja-sopimusehdot/2017-10-01---verkkopalveluhinnasto---tehopohjaiset-tuotteet_tarkistettu.pdf

Valtioneuvoston päätös näyttöpäätetyöstä 22.12.1993/1405

Virtanen, M. 2019. Smart Readiness Indicator (SRI) kiinteistön älykkyyden mitarina. Sähköisen talotekniikan rakennuttajaseminaari. 27.8.2019. https://www.sahkoala.fi/kiinteistoala/fi_FI/rakennuttajaseminaari/files/102693259806523684/default/Rakennuttajaseminaari_2019_SRI_Markku_J_Virtanen.pdf

Ympäristöministeriön asetus uuden rakennuksen energiatehokkuudesta 1010/2017

Ympäristöministeriön asetus uuden rakennuksen sisäilmastosta ja ilmanvaihdosta 1009/2017