

VIHREÄN SIIRTYMÄN TUOTEKEHITYS

- Sähköenergian varastoinnin peruskäsitteet



Miksi sähköenergian varastointi on nyt ajankohtainen asia?

Sähkö on erinomainen ja edullinen tapa siirtää energiaa paikasta toiseen ja yhteiskunnan sähköistyminen on tuonut useita etuja niin kätevyudessa kuin turvallisuudessa. Esimerkiksi sähkövalo korvasi 1900-luvulla polttoaineiden polttamiseen perustuvat valaistusmuodot ja sähkölämmitys on monella tapaa vaivattomampi, turvallisempi ja edullisempi lämmitysmuoto esimerkiksi puutakkaan* tai öljykattilaan verrattuna. Polttamisen väheneminen on parantanut esimerkiksi palo- ja tapaturmaturvallisuutta ja sisäilman laatua.

Sähköenergian huono puoli on, että sen varastoiminen on hankalaa ja kallista. Fossiilisia polttoaineita kuten kivihiiltä tai öljypohjaisia polttoaineita voidaan varastoida vuosikautia, mutta sähköön varastoiminen vaatii kalliita akkujärjestelmiä. Esimerkiksi mökin nestekaasulämmittimen kaasupullo säilyy vuosikautia käyttökuntoisena, ja se kykenee varastoimaan toistasataa kilowattituntia (<https://my.aga.fi/usein-kysytyt-kysymykset/>) energiaa. Vastaavankokoinen akku maksaa viisinumeroisen summan.

Ilmastonmuutoksen torjunta on lisännyt tarvetta sähköenergian varastoimiselle: monelle uusiutuvalle energiamuodolle on tyypillistä, että tuotanto vaihtelee sääolosuhteiden mukaan: tuulivoimalat tuottavat sähköä vain kun tuulee, ja aurinkovoimalat vain päivällä ja tuotanto vaihtelee pilvisyysolosuhteiden mukaan.

Sähköverkko ei kykene varastoimaan energiaa, vaan verkossa on oltava jatkuvasti tehotasapaino: tuotannon on täsmättävä kulutukseen. Hieman pelivaraa antaa sähköverkkoon kytkettyjen pyörivien massojen (generaattorien ja moottorien) pyörimisenergia (<https://www.fingrid.fi/-/custom/sahkojarjestelman-tila-169/>): mikäli sähköverkon kulutus kasvaa äkisti, verkon taajuus ei romahda yhtäkkiä vaan se alkaa laskea pikkuhiljaa, kun pyörivät massat luovuttavat energiaa verkkoon samalla hidastuen. Tällöin järjestelmällä on aikaa reagoida lisäämällä tuotantoa tai vähentämällä kulutusta.

Edelliseen kohtaan liittyy myös yksi tuuli- ja aurinkovoiman haaste: aurinkopaneelien tuottama tasasähkö muutetaan verkkoon syötettäväksi vaihtosähköksi elektronisilla muuttajilla, joissa ei ole tällaista pyörivää massaa taajuusvaihteluja hillitsemään. Sama koskee tuulivoimaa: tuulivoimalassa on kyllä pyörivä generaattori, mutta koska sen pyörimisnopeus vaihtelee tuulen nopeuden mukaan, sen tuottama sähkö syötetään verkkoon taajuusmuuttajan kautta.

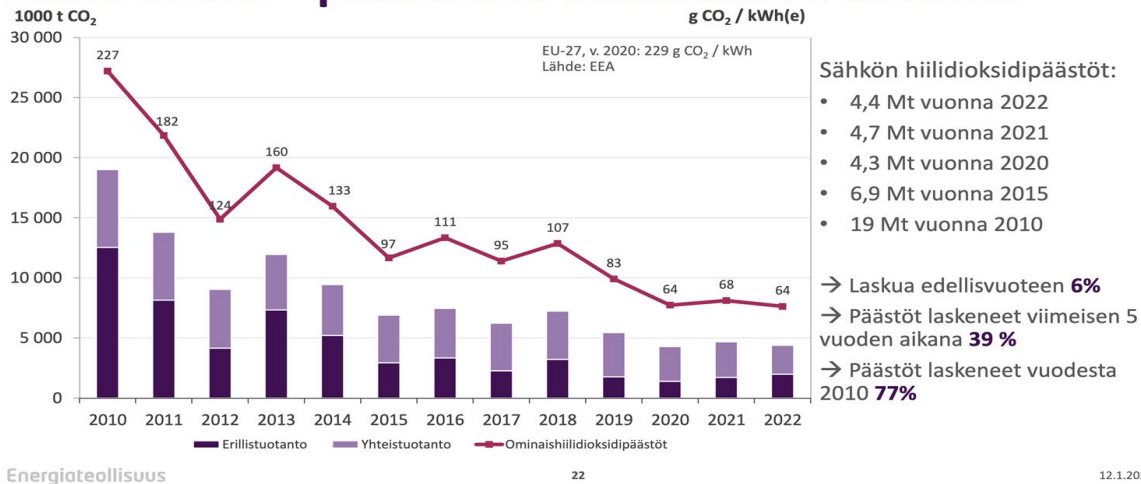
Tuuli- ja aurinkovoiman merkityksen kasvu ja tuotantohintojen lasku yhdessä akkujen hinnan laskun kanssa on tekemässä ja joissain sovelluksissa jo tehnytkin energiavarastoista taloudellisesti mielekkäitä vaihtoehtoja.

Tällä kurssilla perehdytään (vihreän sähkö)energian varastoinnin tekniikkaan, reunaehtoihin ja tulevaisuuteen. Lähdemme liikkeelle energiaan liittyvistä peruskäsitteistä ja jatkamme eri menetelmiin ja teknisiin yksityiskohtiin, lainsäädäntöä ja turvallisuusstandardeja unohtamatta.

Sähköenergian tuotannossa tapahtui 2010-luvulla merkittävä siirtymä, kun fossiilisten polttoaineiden käytöstä luovuttiin merkittävältä osin. Esimerkiksi vuonna 2010 julkaistussa kirjassa

Pieni suuri energiakirja (Jussi Laitinen) mainittiin sähkölämmityksen huonona puolena (s. 84) "sähkön isot päästöt". Nykyään sekä tuotetun että kulutetun (jälkimmäisessä lukemassa on otettu huomioon tuontisähkön päästöt) ovat enää kymmeniä grammoja kilowattituntia kohden (lähde: <https://www.slideshare.net/energiateollisuus/sahkovuosi-2022pptx-255298490>):

Sähköntuotannon hiilidioksidipäästöt edelleen lasku-uralla – päästöissä väliaikainen tasanne



* Tämä ei tarkoita, että esimerkiksi puutakka olisi "huono" lämmitysmuoto: takka on tunnelmallinen ja toimii myös sähkökatkon aikana. Polttopuita voi varastoida liiteriin vaikka useammaksi talveksi, sähköä ei. Harva asia tosimaailmassa on "hyvä" tai "huono", meillä on erilaisia teknisiä ratkaisuja erilaisine hyvine ja huonoine puolineen.

• Energiaan liittyvät yksiköt ja suuruusluokat

Sähkölaskunsa itse maksaville tutuin energian yksikkö on kilowattitunti (kWh). Sähkölaskulla maksetaan sähköenergiasta, sähkön siirrosta ja sähkövero (ja arvonlisävero), ja nämä kaikki perustuvat kulutettuihin kilowattitunteihin (ja perusmaksuun). Kilowattitunnin verran energiaa kuluu, jos 1 kilowatin (kW) laite on päällä tunnin ajan, 4 kilowatin laite on päällä 15 minuutin ajan tai 250 watin laite on päällä 4 tunnin ajan, eli yleisemmin

missä E on energia, P on teho ja t aika. Sekä energia että teho ovat SI-johdannaisyksiköitä, joiden määritelmät (kuten myös etuliitteiden, kilo = 1000, mega = miljoona jne, määritelmät) perustuvat kansainvälisiin sopimuksiin, joista on hyvä suomenkielinen yhteenveto Valtioneuvoston asetuksessa mittayksiköistä: <https://www.finlex.fi/fi/laki/ajantasa/2014/20141015>.

Tehon SI-yksikkö on watti ja tehon joule. Sähkötekniikassa puhutaan yleensä wattitunneista kerrannaisyksiköineen (kilowattitunnit ja megawattitunnit ja jopa terawattitunnit), koska näin saadaan helpommin hahmotettava ja mielekkäämmän kokoinen yksikkö. Esimerkiksi 1 kWh olisi jouleina $1000 \text{ W} \times 1 \text{ h} = 1000 \text{ W} \times 3600 \text{ s} = 3,6 \text{ MJ}$ (megajoule).

Tarkkoja arvoja ei tarvitse osata ulkoa (eikä siitä ole aina hyötyäkään kun ne vaihtelevat tapauskohtaisesti), mutta **suuruusluokista** on hyvä olla käsitys takaraivossa. Esimerkiksi

energiansäästöratkaisujen parissa työskentelevän tulee tietää, onko tavallisen sähkölämmitteisen omakotitalon sähkönkulutus vuodessa suuruusluokaltaan 2 MWh, 20 MWh vai 200 MWh. Oikea vastaus on 20 MWh. Jos omakotitalo on suuri ja/tai vanha, kulutus voi olla 30 MWh tai enemmän, ja jos se on pieni ja käytössä on esimerkiksi maalämpöpumppu ja poistoilmalämpöpumppu (ja asukkaita on yksi ja hän ei läträä pitkään suihkussa), kulutus voi olla alle 10 MWh. Mutta suuruusluokka pysyy samana! Suuruusluokkien ymmärtäminen on keskeistä siksi, että se auttaa päätöksenteossa sekä sen huomaamisessa, onko omissa laskelmissa virhe.

Hyötysuhde

Energian käytössä ja varastoinnissa keskeinen termi on **hyötysuhde**. Hyötysuhde kertoo, paljonko käytetystä energiasta/tehosta saadaan siihen käyttöön, johon se halutaan. Esimerkiksi jos powerbankin hyötysuhde on 85 %, saadaan sinne latausportista syötetystä 20 Wh energiasta ulos $85 \% \times 20 \text{ Wh} = 17 \text{ Wh}$.

Kodin sähköjärjestelmien hyötysuhteen merkitystä Suomessa arvioitaessa kannattaa ottaa huomioon, että hukkaenergia tulee käytettyä hyväksi asunnon lämmityksessä syys-huhtikuussa.

Hyötysuhteen optimoiminen oikeassa paikassa on avain energiansäästöön. Esimerkiksi voimalaitoksen 500 MW generaattorissa 0,05 % parannus hyötysuhteeseen tarkoittaa 250 kW lisää sähkötehoa, jota voidaan myydä verkkoon. Sama parannus kännykän laturissa ei heilauta asukkaan sähkölaskua minnekään – ja on lämmityskautena nettovaikutukseltaan nolla muutenkin.

Tämä ei tarkoita, etteikö pienelektroniikan hyötysuhteita tulisi parantaa. Esimeriksi toissa vuosikymmenen puhelimen laturit kuluttivat noin 1 W hukkaenergiaa seinässä ollessaan vaikkei niitä olisi edes kuormitettu. Nykyaikaisten laturien hukkaenergia kuormittamattomina on suuruusluokaltaan muutamia milliwatteja.

Hyötysuhde riippuu myös määritelmästä: mikä määritellään hyöty- ja mikä hukkaenergiaksi? Esimerkiksi perinteisen lauhdevoimalan (kuten kivihiihivoimalan tai ydinvoimalan, jonka hukkalämpö lasketaan mereen) hyötysuhde on hieman yli 30 %. Jos hukkalämpöä voidaan hyödyntää myös kaukolämpönä, kokonaishyötysuhde voi olla reilusti yli 50 % (<https://www.energy.gov/eere/iedo/combined-heat-and-power-basics>). Käyttämällä maakaasu- tai öljyvoimalassa kombiteknikkaa (kaasuturbiini, höyryturbiini ja lämmön talteenotto), voidaan päästä jopa yli 90 % hyötysuhteeseen.

-
-

Virta, jännite ja teho

Kurssilla ei edellytetä esitietovaatimuksia sähkötekniikan syvällisestä teoriasta (kuten vaihtosähköpiirien käsittelystä osoitinlaskennalla). Perusasiat jännitteestä, virrasta ja tehosta on ymmärrettävä käsitteellisellä tasolla, jotta etenkin akkujärjestelmien toiminnan hahmottaa.

Sähkövirralla tarkoitetaan varauksenkuljettajien liikettä johdekappaleessa, kuten esimerkiksi sähköjohdossa olevassa kuparissa tai hehkulampun wolframisessa hehkulangassa. Sähkövirran

tunnus on I ja sen SI-yksikkö on ampeeri (A), joka on SI-perusyksikkö. Sähkövirta kulkee kappaleessa, kun se kytketään **jännitelähteeseen**, kuten pistorasiaan, akkuun tai aurinkopaneeliin. Jos sama hehkulanka kytketään auton käynnistysakkuun ja pistorasiaan, pistorasiaan kytketyn läpi kulkee merkittävästi suurempi virta, koska pistorasian **jännite** on suurempi kuin akun jännite.

Jännite (tunnus U , Pohjois-Amerikassa V) on sähkötekniinen suure, joka kuvaa kahden pisteen välistä sähköistä potentiaaliero. Jännitteen yksikkö on voltti (V). Edellä mainitussa tapauksessa pistorasian jännite on 230 V ja akun 12 V, joten hehkulangan läpi kulkee suurempi virta pistorasiassa. Samasta syystä pistorasiasta saatava sähköisku on hengenvaarallinen, kun taas 12 V akusta saatavan "sähköiskun" huomaa vain, jos sen saa kieleensä.

Eri aineilla on erilainen kyky johtaa sähkövirtaa. Ja mitä paksumpi ja lyhyempi kappale on, sitä paremmin sähkövirta kulkee sen läpi. Kappaleen kykyä vastustaa sähkövirran kulkua kutsutaan resistanssiksi (yksikkö ohmi, Ω), joka määritellään kappaleen yli olevan jännitteen ja sen läpi kulkevan virran suhteena:

Esimerkiksi jos johdonpätkä kytketään 1,5 voltin paristoon ja sen läpi kulkee 0,1 ampeerin virta, on johdonpätkän resistanssi $1,5 \text{ V} / 0,1 \text{ A} = 15 \Omega$.

Esimerkkejä sähkövirtojen suuruusluokista:

- salama: 30 kA
- sähköauton suurteholataus: 600 A
- auton starttimoottori: 300 A
- taloyhtiön pääsulake: 160 A
- omakotitalon pääsulake: 35 A
- sähköauton vaihtosähkölataus: 16 A
- vedenkeitin: 10 A
- puhelimen laturi: 1 A
- ihmiselle vaarallinen sähkövirta: 30 mA (arvio)
- 5 W (230 V) ledilamppu: 20 mA
- palovaroitin valmiustilassa: 10 μ A

Suureen virallinen nimi fysiikassa ja SI-standardeissa on **sähkövirta**, mutta sähkötekniikassa puhutaan yleisesti lyhyemmin pelkästä **virrasta**, koska sekaannuksen vaaraa ei ole: jos "virta on 10 A", on selvää että kyseessä ei ole purossa liplattava vesivirta.

Sähkölaitteen kuluttama teho on sen jännitteen ja virran tulo:

Esimerkiksi jos jännite on 230 V ja virta 20 mA, teho on $230 \text{ V} \times 20 \text{ mA} = 4,6 \text{ W}$.

Tasasähkö ja vaihtosähkö

Paristot, akut ja aurinkopaneelit tuottavat jännitteen, joka pysyy vakiona tai muuttuu erittäin hitaasti – esimerkiksi täyden litiumioniakkukennon jännite voi olla 4,2 V, ja tyhjäksi (niin tyhjäksi kuin valmistaja sallii) puretun vain 2,5 V. Tällaista jännitettä kutsutaan tasajännitteeksi. Vastaavalla

tavalla vakiona pysyvää virtaa kutsutaan tasavirraksi. Yleisnimitys tasajännitteelle ja tasavirralle on tasasähkö: puhutaan esimerkiksi tasasähkömoottoreista tai tasasähköjärjestelmästä, koska toimivassa sähköjärjestelmässä on sekä jännite että virta. Lyhenne tasasähkölle on **DC** (direct current). Jos jännite/virta ei pysy vakiona vaan vaihtelee säännönmukaisesti, sitä kutsutaan vaihtosähköksi, **AC** (alternating current).

Pistorasiassa oleva jännite on vaihtojännite: jännite vaihtelee 50 Hz taajuudella +325 voltista -325 volttiin. Jos tällainen jännite kytketään lämmitysvastukseen, se kuumentaa sitä samalla teholla kuin 230 voltin vaihtojännite – eli pistorasiasta saatavan jännitteen **tehollisarvo** on 230 volttia.

Vaihtojännitteeseen liittyy monia syvällisiä käsitteitä, kuten esimerkiksi loisteho: jos kuorma on *induktiivinen* (kuten sähkömoottori), jännitteen ja virran välille syntyy vaihe-eroa (virta on jännitettä jäljessä), jolloin syntyy loistehoksi nimetty ilmiö: kaava $P=UI$ ei pidä paikkaansa sellaisenaan, vaan siihen pitää lisätä korjauskerroin.

Vaihtosähköllä on kaksi etua verrattuna tasasähköön: ensinnäkin vaihtojännitteen jännitetasoa voidaan muuntaa hyvällä hyötysuhteella (yli 99 %) käyttämällä muuntajaa. Toiseksi, voimaloiden sähkögeneraattorit tuottavat luonnostaan vaihtojännitettä. Jännitetason helppo muuttaminen on tärkeää häviöiden pienentämiseksi, kuten seuraavassa kohdassa nähdään.

Sähkönsiirron häviöistä

Koska teho on jännitteen ja virran tulo ($P=UI$) ja jännite on resistanssin ja virran tulo ($U=RI$), saadaan sijoittamalla $P=UI=(RI)I=RI^2$. Eli jos johtimen läpi kulkeva virta I **kaksinkertaistuu**, johtimessa lämmöksi kuluva teho **nelinkertaistuu***. Vastaavasti jos virta saadaan pudotettua **puoleen**, johtimen tehohäviö putoaa **neljäsosaan**. Koska teho on jännitteen ja virran tulo, saadaan sama teho siirrettyä 50 % pienemmällä virralla, jos siirtojännite kaksinkertaistetaan. Tämän takia pitkän matkan sähkönsiirrossa käytetään Suomessa jopa 400 kV jännitettä! Suuren jännitteen käyttö pienentää tarvittavaa johdinpaksuutta.

* Todellisuudessa häviö kasvaa hieman enemmän kuin nelinkertaiseksi, koska suurempi häviöteho kuumentaa johdinta, joka puolestaan kasvattaa johtimen resistanssia, jolloin tehohäviö kasvaa hieman.

VIHREÄN
SIIRTYMÄN
TUOTEKEHITYS

