

Jussi Sihvo\*, Joonas Leinonen, Tomi Roinila ja Tuomas Messo

# Jatkuva-aikaiset impedanssimittaukset osana älykkäitä akkujärjestelmiä

## Tiivistelmä:

Tutkimukset ovat osoittaneet, että Li-ion akun sisäistä impedanssia voidaan tehokkaasti hyödyntää akun varaustilan ja elinkaaren analyysiin, jolloin myös akkujärjestelmän luotettavuutta ja turvallisuutta voidaan merkittävästi parantaa. Tässä työssä esitellään kehittyneitä signaalinkäsittelyn menetelmiä Li-ion akun sisäisen impedanssin nopeaan ja luotettavaan mittaukseen. Menetelmässä hyödynnetään laajakaistaista, pseudo-satunnaista binääristä herätesignaalia akun impedanssin nopeaan mittaamiseen. Menetelmässä akkua herätetään (ladataan/puretaan) pieniamplitudisella herätteellä, ja tämän herätteen aiheuttama vaste (virta/jännite) mitataan. Tämän perusteella voidaan laskea suoraviivaisesti akun impedanssi. Menetelmä mahdollistaa impedanssin laskemisen murto-osassa verrattuna aikaan, joka kuluu perinteisellä impedanssispektroskopiolla. Lisäksi, menetelmä on mahdollista toteuttaa erittäin edullisesti, mikä antaa mahdollisuuden implementoida teknologia useiden eri akkusovellusten yhteyteen.

**Avainsanat:** Litium-ioni akku, Akun impedanssi, jatkuva-aikaiset mittaukset, älykkäät akkujärjestelmät, kuntotila, varaustila

**\*Vastaava kirjoittaja: Jussi Sihvo:** Tampere University of Technology, E-mail: jussi.sihvo@tuni.fi

**Joonas Leinonen:** Tampere University of Technology, E-mail: joona.leinonen@tuni.fi

**Tomi Roinila:** Tampere University of Technology, E-mail: tomi.roinila@tuni.fi

**Tuomas Messo:** Tampere University of Technology, E-mail: tuomas.messo@tuni.fi

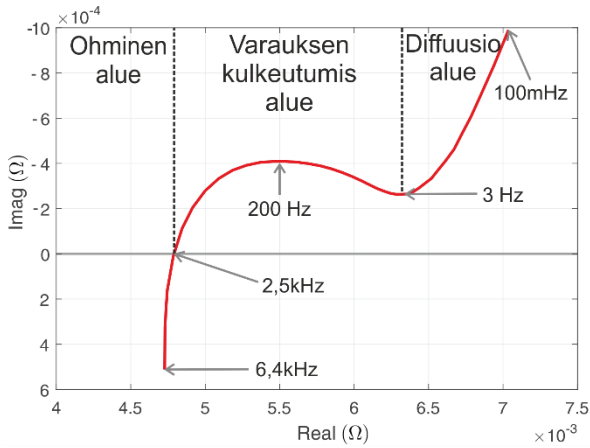
## 1 Johdanto

Li-ion akkuja hyödyntävien sovellusten, kuten esimerkiksi sähköisen liikenteen ja uusiutuvan energian, määrä on merkittävästi kasvanut viimeisten vuosien aikana. On arvioitu, että akkujen globaalit

markkinat ylittävät 100 miljardia euroa vuoteen 2030 mennessä [1]. Tämä on asettanut haasteen kiertotaloudelle, sillä noin 95% akuista päätyy jätteeksi kierrättämisen sijaan. Tutkimukset ovat kuitenkin osoittaneet, että jopa 95% li-ion akuista olisi mahdollisuus uusiokäyttää osittain tai kokonaan [2].

Li-ion akut tarvitsevat toimiakseen akun valvontajärjestelmän (battery-management-system (BMS)), joka mahdollistaa akun turvallisen, sekä optimaalisen käytön. Akun tilaa indikoidaan akun valvontajärjestelmässä akun tilaparametrien, kuten varaustilan (state-of-charge (SOC)) ja kuntotilan (state-of-health (SOH)) avulla. Varaustila kertoo, kuinka paljon akussa on varausta jäljellä ja kuinka paljon akku pystyy toimittamaan energiaa [3]. Akun kuntotila taas indikoi akun jäljellä olevaa käyttökapasiteettia, sekä akun kykyä toimia sen nykyisessä sovelluksessa [4]. Parametrien tarkka määrittäminen on kuitenkin haasteellista, sillä SOC ja SOH riippuvat myös akussa vallitsevista olosuhteista, kuten lämpötilasta ja akun sisällä tapahtuvista kemiallisista reaktioista [5]. Lisäksi kyseiset parametrit täytyy määrittää epäsuorasti akun jännite-, virta- ja lämpötilamittauksin [6]. Erityisesti akun kuntotilan monitorointi on haasteellista, sillä akun kunto riippuu myös nykyisen kapasiteetin lisäksi hyvin paljon siitä, kuinka ja missä olosuhteissa akkua on aiemmin käytetty ja kuinka kapasiteetti on laskenut. Luotettavaan kuntotilan monitorointiin tarvitaankin läpi akun eliniän kestävää monitorointia, jotta vikaantuneet kennot voidaan havaita ennen kuin niiden kunto on laskenut liikaa [7].

Акун kapasiteetti voidaan mitata purkamalla akku täydestä tyhjäksi ja laskea akusta purettu varauksen määrä. Kyseinen menetelmä kuitenkin vie hyvin paljon aikaa ja kuluttaa akkua turhaan eikä näin ollen sovellu akun kuntotilan mittauksiin. Tutkimukset ovat kuitenkin osoittaneet, että Li-ion akun sisäinen impedanssi vaihtelee paitsi akun kapasiteetin ja kuntotilan, myös varaustilan funktiona [3-8]. Akun impedanssin mittausta tarjoaa siis vaihtoehdoisen tavan määrittää akun kunto- ja varaustila. Akun impedanssi voidaan mitata elektrokemiallisen impedanssispektroskopian (EIS) avulla. EIS-menetelmässä akkua puretaan/ladataan sinimuotoisella virta-herätteellä, jonka tuottama jännitevaste mitataan



**Kuva 1.** Akun impedanssi ja sen eri alueet kuvattuna kompleksitasossa

jännitesensoreilla. Menetelmällä voidaan impedanssi mitata tarkasti ja luotettavasti, mutta tekniikka on huonosti sovellettavissa käytännön sovelluksiin sen hitauden ja kompleksisuuden takia.

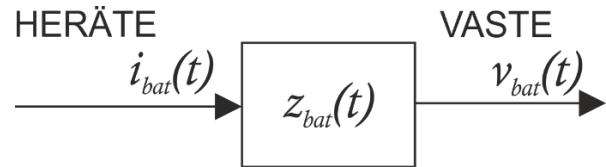
Tässä työssä hyödynnetään laajakaistaista, pseudo-satunnaista binääristä herätesignaalia (PRBS) sekä Fourier-tekniikoita akun impedanssin mittauksiin [11]. Menetelmässä akkua herätetään (ladataan/puretaan) pieniamplitudisella, kaksitasoisella herätesykllillä, jonka avulla akun impedanssi voidaan mitata useilla eri taajuuksilla samanaikaisesti. Näin mittaukset voidaan suorittaa vain murto-osalla ajasta joka kuluisi perinteisiin EIS-menetelmän mittauksiin. Nopeutensa ansiosta PRBS-menetelmää voi käyttää jatkuva-aikaisiin sovelluksiin, joita ovat esimerkiksi akun impedanssin muutosten hyödyntäminen akun varaustilan ja kuntotilan estimointiin. Lisäksi, menetelmä vaatii ainoastaan kaksi eri signaalitasoa, mikä mahdollistaa menetelmän yksinkertaisen ja edullisen toteutuksen esimerkiksi jo akkujärjestelmässä olemassa olevan akun balansointipiirin yhteyteen. Tässä artikkelissa menetelmästä julkaistut tulokset pohjautuu julkaisuissa [9-10] esiteltyihin tuloksiin ja teoriaan.

## 2 Impedanssin vaikutus akun tilaan

Accun impedanssille voidaan taajuustasossa kirjoittaa

$$Z_{bat}(j\omega) = \frac{V_{bat}(j\omega)}{I_{bat}(j\omega)} \quad (1)$$

missä  $V_{bat}$  on akun napajännite,  $I_{bat}$  akun läpi menevä virta ja  $\omega$  kulmataajuus. Tyypillisesti kirjallisuudessa akun impedanssi esitetään kompleksitasossa, ja se voidaan jakaa eri alueisiin, jotka muodostuvat tiettyjen kemiallisten reaktioiden tuloksena. LiFePO<sub>4</sub>-akkukennon impedanssi kompleksitasossa, sekä sen eri alueet on esitetty kuvassa 1. Matalat taajuudet



**Kuva 2.** Impedanssin yksinkertainen lohkokkaavio

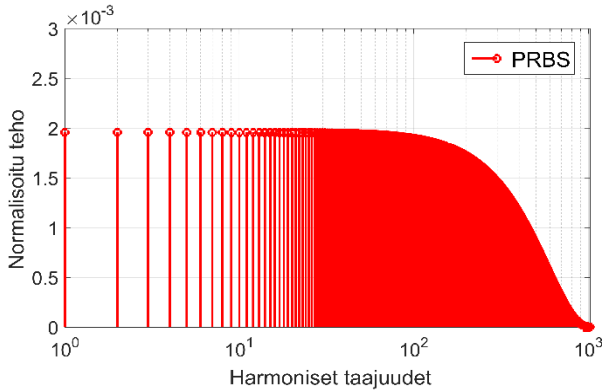
impedanssista muodostaa ns. diffuusioalueen (kuvassa 1 "diffusion"), joka muodostuu litium-ioneiden kulkeutumisesta akun napojen elektrodeissa. Keskitäajuuksilla impedanssia kutsutaan varauksen-kulkeutumisalueeksi (kuvassa 1 "charge-transfer"), joka muodostuu varauksen-kuljettajien kulkeutumisesta elektrolyyttimateriaalin ja elektrodien rajapinnan läpi. Suurilla taajuuksilla impedanssi taas koostuu lähinnä akun varauksenkuljettajien ja elektrodien resistiivisyydestä (Ohmic).

On huomion arvoista, että akun impedanssin riippuvuus varaus- tai kuntotilasta on eri suuruinen riippuen impedanssin alueesta. Esimerkiksi litium-ioni akkujen varaustilan muutokset näkyvät parhaiten impedanssin diffuusioalueella pienillä taajuuksilla [5-6][8-9], kun taas akun kuntotila voidaan havaita ohmisella alueella suurilla taajuuksilla [4-5]. Impedanssin muuttumisen suuruutta voidaan havainnoida mm. impedanssin sähköisen vastinpiirin parametrien muuttumisen kautta [6].

## 3 Impedanssin mittaus ulkoisella herätteellä

Accun impedanssi voidaan ymmärtää siirtofunktiona akun virran (sisäänmeno) ja jännitteen välillä (ulostulo), jolloin akun virta toimii herätteenä akulle tuottaen jännitevasteen. Tilannetta kuvaa kuvan 2 yksinkertainen lohkokkaavio. Herätesignaalilla ja sen ominaisuuksilla on merkittävä vaikutus myös vasteeseen, minkä takia on suotavaa käyttää herätettä, jonka taajuussisältö on tunnettu. Yleensä akun impedanssimittaukseen herätesignaalina on käytetty sinimuotoista herätettä, jolla on tietty amplitudi ja taajuus. Kyseistä menetelmää kutsutaan myös elektrokemialliseksi impedanssispektroskopiaksi (EIS) ja on kirjallisuudessa laajalti käytetty menetelmä [4-6][8]. Sen avulla saadaan hyvinkin tarkkoja tuloksia, mutta menetelmän käytettävyys muissa, kuin laboratorio-olosuhteissa on rajoittunutta pitkälti tekniikan hitauden takia. EIS-menetelmässä joudutaan jokainen taajuuspiste mittaamaan erikseen, mikä vie aikaa varsinkin, jos mitataan todella matalia taajuuksia. Lisäksi sinimuotoisen virta-herätteen toteutus vaatii kompleksisen ja tilaa vievän toteutuksen, mikä lisää sovelluksen kustannuksia.

Mikäli impedanssin mittaukset halutaan yhdistää osaksi



**Kuva 3.** PRBS:n taajuustason energiaspektri

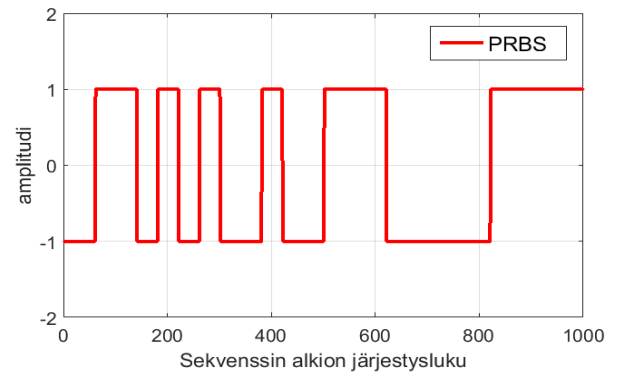
akkujärjestelmää, täytyy mittausmenetelmän olla paitsi nopea ja luotettava, myös digitaalisesti ja fyysisesti kevyt toteuttaa. Niin sanottujen laajakaistamenetelmien avulla impedanssimittauksia voidaan merkittävästi nopeuttaa. Laajakaista-menettelmissä herätesignaali sisältää energiaa useammalla kuin yhdellä taajuudella, jolloin kyseiset taajuudet voidaan mitata samanaikaisesti. Tällainen signaali voidaan muodostaa esimerkiksi eri taajuuksisten siniaaltojen summana [10], mutta menetelmä on siniaaltojen käytöstä johtuen edelleen digitaalisesti varsin raskas toteuttaa. Systeemin identifiointimenetelmistä on kuitenkin historiassa tutkittu myös niin sanottuja pseudo-satunnaisia-binäärisiä-signaaleja (pseudo-random-binary-sequence (PRBS)) [11]. Kyseiset signaalit omaavat laajakaistamenetelmien nopeuden, mutta ne ovat myös yksinkertaista toteuttaa, sillä heräte voidaan karakterisoida vain kahdella eri signaalitasolla. Kyseisiä menetelmiä on myös akun impedanssin mittaamiseen tutkittu [12-13]. Tutkimuksissa on kuitenkin raportoitu menetelmän epätarkkuutta johtuen, sekä akun epälineaarisuuksista, sekä akun toimintapisteen muuttumisesta kesken mittausten. Kuitenkin oikein toteutettuna ja suunniteltuna on osoitettu, että PRBS-menetelmällä voidaan saada varsin tarkkoja tuloksia [9-10].

### 3.1 PRBS –heräte

PRBS –heräte on tarkkaan suunniteltu binäärinen sekvenssi, jolla on energiaa useilla eri taajuuskomponenteilla. Lisäksi, ideaalitapauksessa, taajuuskomponenttien energiat ovat yhtä suuret mikä lisää mitatun taajuusvasteen mittausvarmuutta. PRBS signaalin generointialgoritmi voidaan esittää muodossa

$$s_{PRBS}(n + i) = \sum_{r=1}^n C_r s_{PRBS}(i - r) \quad \text{mod } 2, \quad (2)$$

missä  $s_{PRBS}$  on itse signaali ja parametri  $C$  sisältää  $n$  asteisen primitiivisen polynomin kertoimet. Signaalin seuraava alkio määritetään aina käyttäen signaalin  $n$ -



**Kuva 4.** PRBS:n aikatason esitys

edellistä alkioita, mistä johtuen sekvenssin  $n$ -ensimmäistä alkioita täytyy alustaa alkuarvoihin. Alkuarvoiksi käy kaikki muut numeroiden 0 ja 1 kombinaatiot paitsi puhdas nollavektori. Koska muodostuva PRBS on binäärinen, täytyy aritmetiikka kaavassa (2) toteuttaa moduulissa 2. Huomionarvoista on, että  $C$  voi olla minkä tahansa polynomin kertoimet, joka on astetta  $n$  ja primitiivinen moduulissa 2. [11]

#### 3.1.1 Herätesignaalin suunnittelu

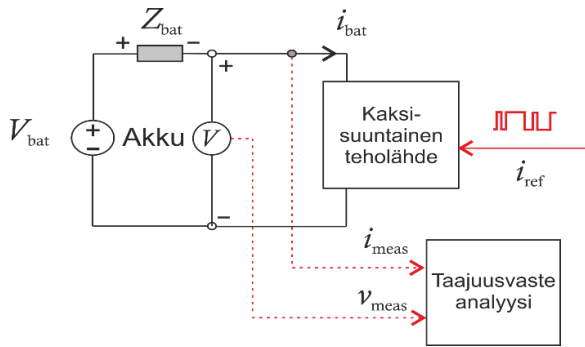
PRBS sekvenssin ominaisuuksia aika- ja taajuustasossa on esitetty kuvissa 3 ja 4. Tärkeimmät parametrit PRBS taajuussisällön kannalta ovat PRBS:n pituus ja generointitaajuus. PRBS:n pituus  $N$  muodostuu kaavasta

$$N = 2^n - 1, \quad (3)$$

missä  $n$  on kaavassa (2) käytetty primitiivisen polynomin asteluku. Tällöin puhutaan myös  $n$ -bittisestä sekvenssistä. Generointitaajuus  $f_{gen}$  on PRBS:n peräkkäisten alkioiden näytteistystaajuus. Generointitaajuus määrittää myös suurimman taajuuskomponentin, jolla PRBS:illä on energiaa ja joka herätteellä voidaan mitata. Käytännön mittauksissa PRBS:n jokaista alkioita tulee myös erikseen näytteistää. Tämän näytteistystaajuuden on Nyquist-teoreeman mukaan oltava vähintään kaksinkertainen generointitaajuuteen verrattuna, jotta PRBS:n taajuussisältö pysyy mahdollisimman muuttumattomana. Tästä tosin aiheutuu PRBS:n taajuuskomponenttien energian pieneneminen suurilla taajuuksilla, kuten kuvassa 3 on esitetty. Tästä johtuen luotettava taajuussisältö rajoittuu todellisuudessa noin puoleen generointitaajuudesta. Yhdessä  $N$  ja  $f_{gen}$  muodostavat sekvenssin taajuusresoluution kaavalla

$$f_{res} = \frac{f_{gen}}{N}, \quad (3)$$

joka määrittää myös pienimmän taajuuden, joka voidaan mitata. Siitä saadaan myös teoreettinen



Kuva 5. Mittausten periaatekuva

mittauksiin tarvittava vähimmäisaika, joka on  $t_{meas} = \frac{1}{f_{res}}$ . Taajuusresoluutiolla on siis varsinkin akun impedanssin mittauksiin merkittävä vaikutus, sillä impedanssi sisältää tietoa myös hyvin pienillä taajuuksilla varsinkin akun varaustilasta. Toisaalta lyhyttä mittausaikaa voidaan vaatia sovelluksen puolesta varsinkin reaali-aikasovelluksissa. Lisäksi, hyvin pienillä taajuuksilla akun diffuusioalueella myös akun epälineaarisuudet nousevat dominoivaksi, jolloin mittaustuloksiin tulee epätarkkuutta. Kompromissi sallitun mittaustuloksen ja mitattavan taajuuskaistan välillä voidaankin siis määrittää taajuusresoluution avulla.

Sovelluskohtaisesti tärkeä parametri on myös sekvenssin amplitudi, joka akkumittauksissa käytännössä määrittää akun virran. Suurempi amplitudi parantaa mittausten luotettavuutta, mutta aiheuttaa myös häviöitä ja voi aiheuttaa myös epälineaarisuuksia mitattavaan vasteeseen tehden siitä epäluotettavan. Verrattuna muihin sovelluksiin, akkusovelluksissa amplitudin täytyy olla varsin suuri, jotta mitään vaihtelua napajännitteessä voidaan havaita. Lisäksi sekvenssin DC-taso tärkeää asettaa nolaksi kuten kuvassa 4, jotta akun toimintapiste voidaan pitää mittausten ajan mahdollisimman muuttumattomana.

## 4 Mittaukset

Käytännön mittaukset toteutettiin laboratorioolosuhteissa, missä akun impedanssin taajuusvaste mitattiin litium-rauta-fosfaatti kennosta (LiFePO<sub>4</sub>). Akun kapasiteetti oli 2.3Ah ja nimellisjännite 3.3V. Mittausten lohkokaavio on esitetty kuvassa 5, missä PRBS -heräte syötetään järjestelmään kaksisuuntaisen tehollähteen virtaohjeena, joka tällöin vastaa myös akun virtaa. Järjestelmän jännite- ja virtamittaukset suoritettiin samalla näytteistyskellä ja saman pituisina kuin PRBS heräte. Akun impedanssi mitattiin akkukennosta eri varaustiloissa 10% resoluutiolla välillä 20% - 100%. Akkua purettiin mittausten välillä 1C:n suuruisella virralla, joka vastaa akun kapasiteetin suuruista virtaa. Varaustilaa monitoroitiin yksinkertaisella varauksen summausmenetelmällä [6].

Taulukko 1. mittausten menetelmien parametrit

	EIS	PRBS
Amplitudi	0.7A – 2A	1.15A
Taajuusalue	0.2Hz – 3kHz	0.2Hz – 3kHz
Generointitaajuus	-	3kHz
Sekvenssin pituus		32767
Näytteistystaajuus	-	6kHz

PRBS -herätteen suunnittelu on täysin riippuva akkukennon ominaisuuksista. Taajuusalue, jolla impedanssin muutokset ja trendit ovat suurimpia, riippuu paljon akkukennon kemiasta. Taajuusalue riippuu myös siitä, halutaanko akun impedanssista mitata kaikki kuvassa 1 esiintyvät alueet vai ainoastaan jokin tai jotkut niistä. Tässä artikkelissa mittausalue valittiin ulottumaan diffuusioalueelta ohmiselle alueelle, mikä kyseiselle LiFePO<sub>4</sub>-kennolle vastaa taajuusaluetta 100mHz – 3kHz varmuusrajoineen. Vastaavat mittaukset suoritettiin myös EIS-menetelmällä käyttäen samaa taajuusaluetta. Suunnitteluparametrit sekä PRBS-, että EIS-menetelmille mittauksia varten on esitetty taulukossa 1.

### 4.1 Mittausdatan jatkokäsittely

Jännite- ja virtamittaukset muunnetaan taajuustasoon diskreetin Fourier-muunnoksen (DFT) avulla, joka voidaan matemaattisesti ilmaista

$$F_i = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} f_k e^{-\frac{j2\pi i}{N}k}, \quad (4)$$

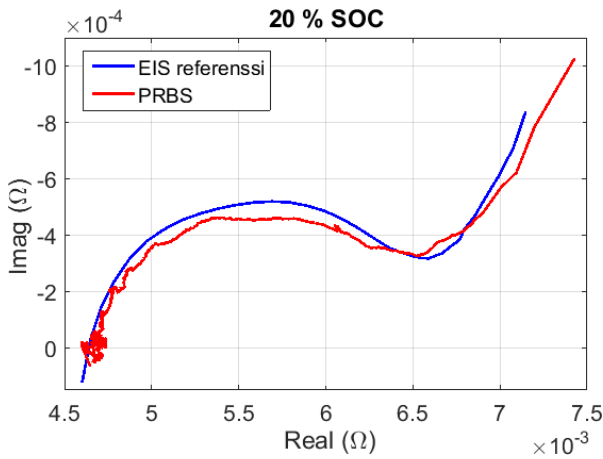
missä  $F$  on muunnettu taajuustason signaali,  $f$  muunnettava aikatason ja  $N$  muunnettavan signaalin pituus. Lisäksi mittaustuloksiin lisääntyvän mittauskohinan poistoon käytettiin liukuvan-keskiarvon-suodatinta (moving-average-filter (MAF)) [10][14]. Kohinan poistoon voi myös käyttää peräkkäisten herätteitten keskiarvotusta, mutta tällöin mittausten kokonaisaika kasvaa ja menetelmän käytettävyys jatkuva-aikaisissa sovelluksissa heikkenee [9].

### 4.2 Mittaustulokset ja analysointi

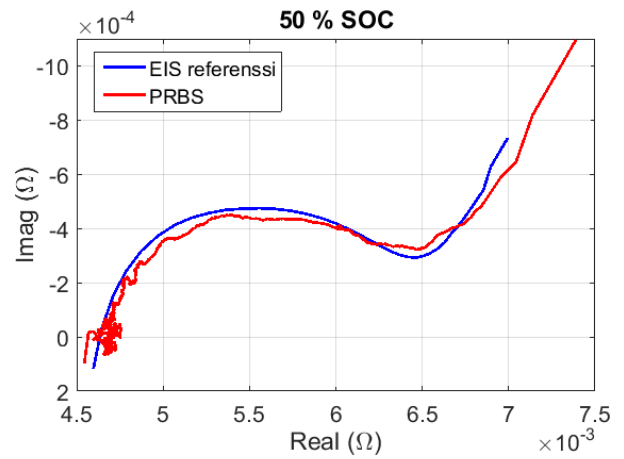
PRBS-menetelmällä saadut mittaustulokset rinnastettuna EIS-referenssimittauksiin on esitetty kuvissa 6-8, joista menetelmien vastaavuus voidaan hyvin todentaa. Ainoastaan diffuusioalueen vasteissa erot ovat

Taulukko 2. Mittauksiin kulunut aika eri heräte-signaaleilla

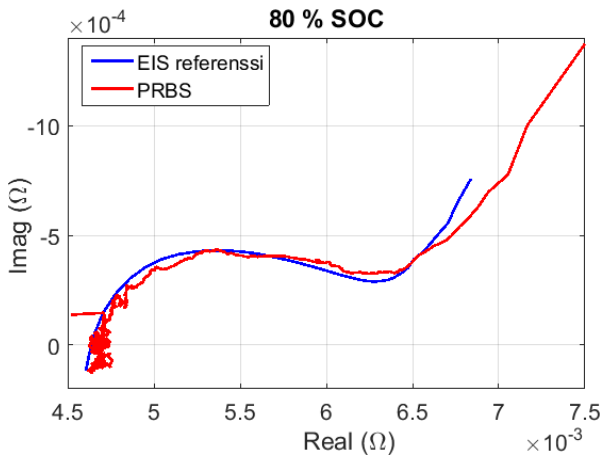
	EIS	PRBS
Mittausaika	60s	4.7s



**Kuva 6.** Mitatut impedanssit 20% varaustilassa 35-asteen lämpötilassa



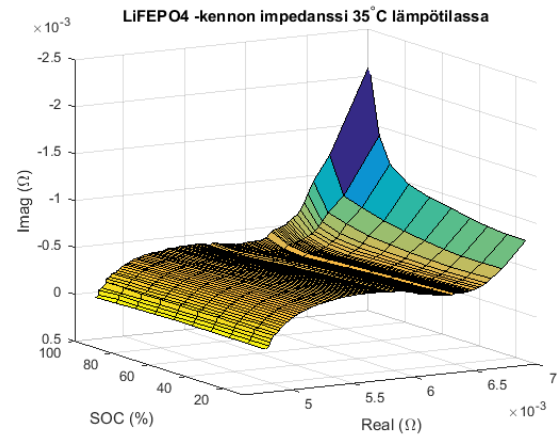
**Kuva 7.** Mitatut impedanssit 50% varaustilassa 35-asteen lämpötilassa



**Kuva 8.** Mitatut impedanssit 80% varaustilassa 35-asteen lämpötilassa

hieman suurempia, mikä johtuu osittain diffuusio-alueen karakterisoivista matalataajuuskomponenteista. Mittausten aikana akun toimintapiste ei pysy täysin vakiona, mikä kertautuu erityisesti pienillä taajuuksilla, jolloin mitattava aikavakio on pidempi. Kuitenkin PRBS-mittaukset todentavat akun impedanssin muuttumisen varaustilan funktiona erityisesti pienillä taajuuksilla, kuten kuvasta 9 voidaan todeta (taajuus kasvaa reaaliakselia oikealta vasemmalle mentäessä). Jo aikaisemmin mainittu etu on PRBS:n mittausajan merkittävä lyhentyminen verrattuna EIS-menetelmään. Taulukosta 2 voidaan huomata, että mittausaika on EIS-menetelmällä 12-kertainen verrattuna PRBS-menetelmään. Lisäksi PRBS:n kaksi signaalitasoa voidaan akkujärjestelmässä helposti luoda minimissään käyttäen yhtä kytkintä, jolloin menetelmän integrointikustannukset sovellukseen pysyvät hyvin pieninä.

Merkittävin käyttösovellus PRBS-menetelmällä on akkujärjestelmässä akun kennojen kuntotilan estimoin-



**Kuva 9.** PRBS-menetelmällä mitattu impedanssi varaustilan funktiona 35-asteen lämpötilassa

nissa, sillä impedanssilla on yhteys akun kapasiteettiin, kuten jo aiemmin todettiin. Näin voidaan järjestelmän älykkäällä monitoroinnilla havaita mahdolliset vaihdettavat kennot ja vaihtaa ne. Lisäksi menetelmää voi myös käyttää akun varaustilan määrittämiseen, vaikka varaustilan estimointi onkin nykypäivän litiumioni akkujärjestelmissä jo toteutettu. Varaustilan estimoinnin tarkkuus kuitenkin korostuu, kun puhutaan teholtaan ja energialtaan yhä suuremmista sovelluksista ja tällöin jatkuva-aikaiset impedanssimittaukset voivat parantaa estimoinnin tarkkuutta.

## 5 Yhteenveto

Tässä artikkelissa käsiteltiin PRBS-menetelmän käyttöä akun jatkuva-aikaisiin impedanssimittauksiin. Menetelmällä suoritettiin käytännön mittaukset litiumrauta-fosfaatti akkukennosta ja tuloksia verrattiin perinteisellä EIS-menetelmällä mitattuihin referenssituloksiin. Mittauksissa todettiin menetelmän antavan luotettavan vasteen mitatulle impedanssille.

Luotettavuuden lisäksi menetelmä on myös nopea, sillä sen avulla voidaan mitata akusta impedanssi vain murto-osassa perinteisellä EIS-menetelmällä kuluvaan mittausaikaan. Mittausaika oli PRBS-menetelmällä vain 4.7s, jolloin voidaan jo tietyissä tilanteissa puhua jatkuva-aikaisesta käytöstä. Menetelmä on myös digitaalisesti kevyt toteuttaa käytännön sovellukseen, sillä se vaatii ainoastaan kaksi signaalitasoa. Mitattua impedanssia voidaan käyttää mm. akkujärjestelmän kennojen kuntotilan, sekä varaustilan estimointiin. Yhdistettäessä impedanssinmittaukset ja analysointi osaksi akun valvontajärjestelmän algoritmeja, voidaan akkujärjestelmän turvallisuutta ja luotettavuutta merkittävästi parantaa.

## Lähteet

- [1] J. S. John, "Global energy storage to double 6 times by 2030, matching solar's spectacular rise," Bloomberg New Energy Finance (report), 2017.
- [2] S. King, N. Boxall, and A. Bhatt, "Lithium battery recycling in Australia - Current status and opportunities for developing a new industry," CSIRO, 2018.
- [3] J. Rivera-Barrera, N. Munoz-Galeano, and H. Sarmiento-Maldonado, "SoC Estimation for Lithium-ion Batteries: Review and Future Challenges," *Electronics*, vol. 6, no. 4, p. 102, 2017.
- [4] D. I. Stroe, M. Swierczynski, S. K. Kær, and R. Teodorescu, "Degradation Behavior of Lithium-Ion Batteries During Calendar Ageing - The Case of the Internal Resistance Increase," *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. 54, no. 1, pp. 517-525, 2018.
- [5] J. Vetter, P. Nov, M. R. Wagner, and C. Veit, "Ageing mechanisms in lithium-ion batteries," *Journal of Power Sources*, vol. 147, pp. 269-281, 2005.
- [6] P. Weicker, *A system Approach to Lithium-ion Battery management*. Artech House, 2013, no. 2013.
- [7] M. Bercibar, I. Gandiaga, I. Villarreal, N. Omar, J. Van Mierlo, and P. Van den Bossche, "Critical review of state of health estimation methods of Li-ion batteries for real applications," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 56, pp. 572-587, apr 2016.
- [8] A. Zenati, P. Desprez, and H. Razik, "Estimation of the SOC and the SOH of Li-ion batteries, by combining impedance measurements with the fuzzy logic inference," *IECON Proceedings Industrial Electronics Conference*, pp. 1773-1778, 2010.
- [9] J. Sihvo, T. Messo, T. Roinila, and R. Luhtala, "Online internal impedance measurements of Li-ion battery using prbs broadband excitation and fourier techniques: Methods and injection design," in *2018 International Power Electronics Conference (IPEC-Niigata 2018 -ECCE Asia)*, May 2018, pp. 2470-2475.
- [10] J. Sihvo, T. Messo, T. Roinila, and D. I. Stroe, "Online identification of internal impedance of Li-ion battery cell using ternary-sequence injection," in *Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE)*, 2018 IEEE, 2018, pp. 1-7.
- [11] K. Godfrey, *Perturbation Signals for System Identification*. Prentice Hall, 1994.
- [12] R. Al Nazer, V. Cattin, P. Granjon, M. Montaru, M. Ranieri, and V. Heiries, "Classical EIS and square pattern signals comparison based on a well-known reference impedance," *World Electric Vehicle Journal*, vol. 6, no. 3, pp. 800-806, 2013.
- [13] A. J. Fairweather, M. P. Foster, and D. A. Stone, "Battery parameter identification with Pseudo Random Binary Sequence excitation (PRBS)," *Journal of Power Sources*, vol. 196, no. 22, pp. 9398-9406, 2011.
- [14] P. Manganiello, G. Petrone, M. Giannattasio, E. Monmasson, and G. Spagnuolo, "FPGA implementation of the EIS technique for the on-line diagnosis of fuel-cell systems," *IEEE International Symposium on Industrial Electronics*, 2017.