

VALÓS IDEJŰ ELEKTROKÉMIAI IMPEDANCIA SPEKTROSKÓPIA ÁTTEKINTÉSE FEDÉLZETI AKKUMULÁTOR MEGFIGYELÉSHEZ

A REVIEW OF REAL-TIME ELECTROCHEMICAL IMPEDANCE SPECTROSCOPY FOR ON-BOARD BATTERY MONITORING

*Apagyi Antal**

ÖSSZEFOGLALÁS

A lítium-ion akkumulátor egészségi állapota (SOH) az idő előrehaladtával folyamatosan romlik, a kémiai reakciók lassulnak, az ionáramlást negatívan befolyásoló tényezők jelennek meg. Ez kapacitás- és teljesítménycsökkenést eredményez, ennek mértéke függ a használat módjától és a tárolási körülményektől. Mivel a folyamat nem lineáris, előrejelzése nehézkes ezért időnként ezirányú információt kell szerezni a cella állapotáról. Jelenleg az akkumulátor menedzsment rendszerek közel teljes merítések és töltések során számítják ki az SOH értékét. Olyan alkalmazási területen, ahol a cella nem meríthető le, alternatív megoldást kell keresni. A cellán belül lezajló kémiai folyamatokról impedancia spektroszkópiával szerezhetünk információt. Laboratóriumi körülmények között könnyen kivitelezhető, viszont autópári felhasználásban, például BMS-be történő integrálása és alkalmazása kihívásokat rejt.

ABSTRACT

The state of health (SOH) of the lithium-ion battery deteriorates over time, the chemical reactions slow down, and factors that negatively affect the ion flow appear. This results in a decrease in capacity and performance, the extent of which depends on the way of use and the storage conditions. Since the process is not linear, its prediction is difficult, so information on the state of the cell must be obtained from time to time. Currently, battery management systems calculate the value of SOH during almost complete immersions and charges. In an application area where the cell cannot be drained, an alternative solution must be sought. We can obtain information about the chemical processes taking place inside the cell with impedance spectroscopy. It can be easily implemented in laboratory conditions, but its

integration and application in automotive applications, for example in BMS, presents challenges.

1. BEVEZETÉS

A lítium-ion akkumulátor ma már a legszélesebb körben alkalmazott energiatárolási megoldás, az élet szinte minden területén találkozhatunk vele, kezdve a szórakoztatóelektronikától, az elektromos járműveken át (EV) a megújuló energiaforrások energiatárolóiig. A nagy energiasűrűségük, viszonylag alacsony önkisülésük teszi őket népszerűvé. A technológia fejlődésével a kapacitásuk, a teljesítményük és a megbízhatóságuk is jelentős mértékben javult, ugyanakkor más kihívások jelentek meg a teljesítmény és a biztonsági felügyelet terén, különösen a nagy igénybevételt jelentő környezetekben. Mivel egy jármű árának nagyobb hányadát az akkumulátorok ára teszi ki, ezért fontos az állapotuk és a teljesítményük pontos nyomonkövetése. Cél az idő előtti teljesítményromlás megelőzése és az optimális működés fenntartása az akkumulátor élettartama alatt. A rendszertelen ciklusok (gyorsítás, lassítás), a magas és alacsony hőmérsékletek, valamint más stresszhatások felgyorsítják az akkumulátor degradációját.

A járművekben egyre több vezetéstartámogató berendezés található, a számuk a jövőben tovább növekszik, ezáltal a gépjárműveknek több energiára van szükségük. A vontatóakkumulátorok mellett nagyobb figyelmet kell fordítani a vezetéstartámogató rendszerek energiaellátására, mivel ezek kritikusak a jármű biztonságának szempontjából. Biztosítani kell a biztonságos működésüket és rendelkezésre állásukat veszélyhelyzetben, ezért redundáns energiaellátást igényelnek.

A vontatóakkumulátorok esetében a cella egészségi állapotának becslése egyrészt a közel teljes merítések és töltések sorozata alapján történik. Ez azonban a redundáns energiaellátó rendszerekben nem

* apagyi.antal@ga.sze.hu

kivitelezhető, ott mindig egy adott töltöttségi szintet kell tartani. Tehát olyan módon kell információt szerezni a degradáció mértékéről, hogy teljes merítés és töltés nem történik. Ez az igény túlmutat a jelenleg használt BMS rendszerek képességein.

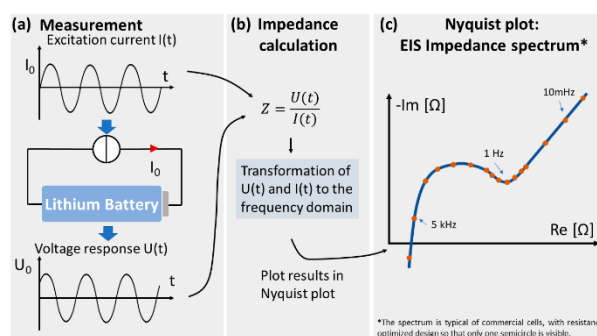
Ezen korlát leküzdése érdekében új vizsgálati metódusokra van szükség.

A Li-ion akkumulátorok állapotának előrejelzési pontosságának javításával a cella jobb kihasználhatósága érhető el. Különböző innovatív mérési technológiák jelentek meg, mint például belső hőmérséklet-érzékelők, nyomásérzékelők, gázérzékelők, referenciaelektrodák vagy impedancia spektroszkópia. Utóbbi potenciális lehetőség, amely az akkumulátor belső elektrokémiai folyamatiról, a töltésátvitelről a diffúzióról vagy a szilárd elektrolit határfelület (SEI) változásáról nyújt információt. Ezek a paraméterek közvetlen kapcsolatban állnak az SoC, SoH és hőmérsékleti tényezőkkel. További előnye, hogy a használatához nem feltétlenül szükséges költséges érzékelők beépítése vagy a rendszer módosítása, az energiatároló gerjesztése a jármű természetes működésének míhváltából adott [2].

Laboratóriumi körülmények között pontos mérések végezhetőek, viszont a járművekben történő alkalmazásuk komoly kihívást rejt.

2. EIS MÉRÉSI TECHNIKA

Az EIS széles körben alkalmazott mérési technika, például korrózióvizsgálatnál, elektrodok, elektrolitok vezetőképességének meghatározásánál továbbá akkumulátor- és üzemanyagcella jellemzésében. Az impedancia számítás elvét az 1. ábra mutatja, ennek során a rendszer potenciál- vagy áramszinuszos zavarásra adott válaszát a frekvencia függvényében kell értelmezni. Galvanosztatisztikus impedancia spektroszkópia esetében szinuszos váltakozóáramot használnak kis áramerősség mellett, mivel ekkor a cella közel lineáris viselkedést mutat [1].

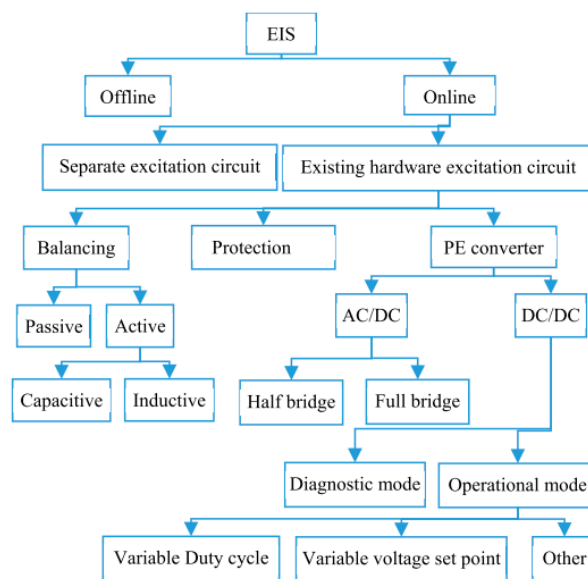


1. ábra. Impedancia mérés elve [1]

A lehető legtöbb frekvencián elvégzett vizsgálat során széles frekvenciaspektrum keletkezik, lehetővé téve az elektrodákön lejátszódó szinte összes kémiai folyamat és reakció, impedancia adatokkal történő jellemzése. A módszer roncsolásmentes, mert a cella gerjesztése kívülről történik. A komplex impedanciaspektrumot

Nyquist diagrammon jelenítik meg közvetlenül a jellemző frekvenciákon és értékelik ki hőmérsékletbecsléshez, vagy SOH becsléshez [1].

Az EIS mérések különféle tényezők alapján kategorizálhatóak, beleértve a mérési környezetet, a gerjesztő hardver felépítését és az alkalmazott gerjesztési módszereket. Az akkumulátor-diagnosztika szempontjából releváns kategorikus lebontást a 2. ábra mutatja. Mérési környezet szerint megkülönböztethető offline és online lehetőség. Előbbi esetében a mérések laboratóriumi környezetben, speciális berendezésekkel történnek, precíz jelgenerátorokat, nagy pontosságú erősítőket és digitális jelfeldolgozó egységeket tartalmaznak. Pontos méréseket biztosít széles frekvenciatartományban, ezek a berendezések méretükből és költségükből adódóan járműben nem alkalmazhatóak. Online esetben a mérések valós időben, a cella alkalmazási helyén történnek. Ezek a megoldások kompaktabbak, költséghatékonyabbak, viszont nem biztosítanak széles frekvenciatartományú mérést, valamint több a környezetből érkező zavaró tényezők száma. Olyan architektúrák megvalósítása jöhet szóba, amelyek költségvonzata alacsony, ezért módosított akkumulátortöltőt, motorvezérlőt vagy beépített cellakiegyenlítőt használnak a perturbációs jel előállításához.



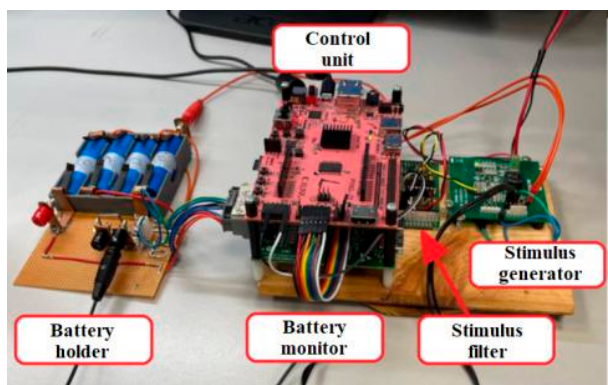
2. ábra. EIS mérési technikák kategorizálása [3]

Gerjesztés szempontjából megkülönböztethető az aktív és passzív gerjesztés. Aktív gerjesztés esetén a gerjesztő jel külön egység általi generálását igényel, ez lehet egyszinuszos, ahol a mérés csak 1 frekvencián történik, ez időigényes folyamat, mivel a méréseket egymás után több frekvencián kell elvégezni. Többsinuszos jel esetében, több különböző frekvenciájú szinuszhullám egyidejűleg kerül alkalmazásra. Ezzel módszerrel a mérési folyamat felgyorsul. Alkalmazható még gerjesztő jelként szélessávú zaj és pszeudo-véletlen bináris jel is,

amely nagy zajállóságot biztosít. Passzív módszer esetén kizárható minden további komponens a gerjesztő jel előállításához, mivel a jármű működéséből származó áram és feszültségváltozásokat használja fel az impedancia meghatározására, jellemzően fejlett jelfeldolgozási technikát igényel a hasznos adatok kinyeréséhez az alacsonyabb jelamplitúdók és magasabb zaj miatt [3].

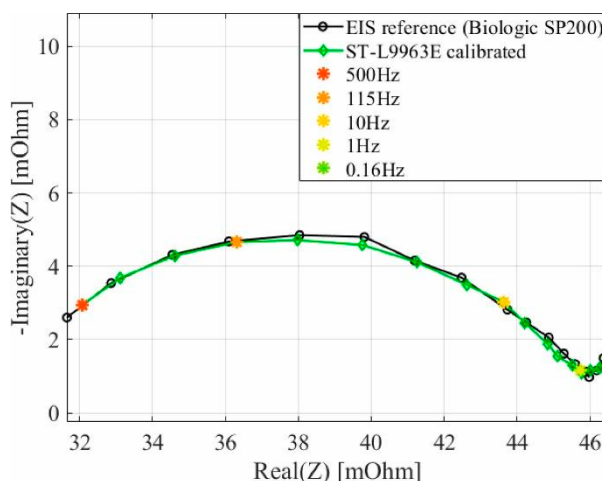
3. FEDÉLZETI EIS MÉRÉSI LEHETŐSÉGEK ÖSSZEHASONLÍTÁSA

Aktív, in-situ EIS mérés további kihívásokat rejt gerjesztés szempontjából, ugyanis lényeges teljesítménybeli különbség adódik pakk és cellaszintű zavarás esetén. A szinuszos jel első félperiódusában töltés, másodikban pedig merítés történik, ezeket az energiákat kezelni kell. Pakk szinten ez nagy teljesítményigényt jelent, amelyet fedezni kell valahonnan, illetve el kell tudnia nyelnie a rendszernek. Erre megoldást jelenthet a jármű töltőrendszer töltésvezérlő körének módosítása [2]. A 3. ábrán látható kísérleti összeállításban törekedtek arra, hogy minél kevesebb módosítás történjen a már meglévő eszközökön.



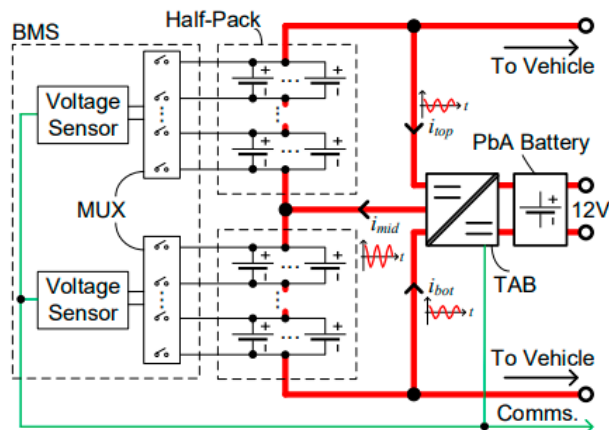
3. ábra. Kísérleti összeállítás a módosított töltésvezérlővel [2]

A kínált megoldás BMS-be történő integrációs képessége nagy, nincs szükség külön adatgyűjtő eszközre, a mért értékek továbbításra kerülnek a feldolgozóegység felé. A mérési eredményeket a 4. ábra szemlélteti, a frekvenciatartomány 0,16 Hz és 500 Hz között volt, a valós rész legnagyobb hibája 0,26 mΩ, képzetes része 0,23 mΩ és az amplitúdóé pedig 0,26 mΩ volt 500 Hz-en a referenciaméréshez viszonyítva.



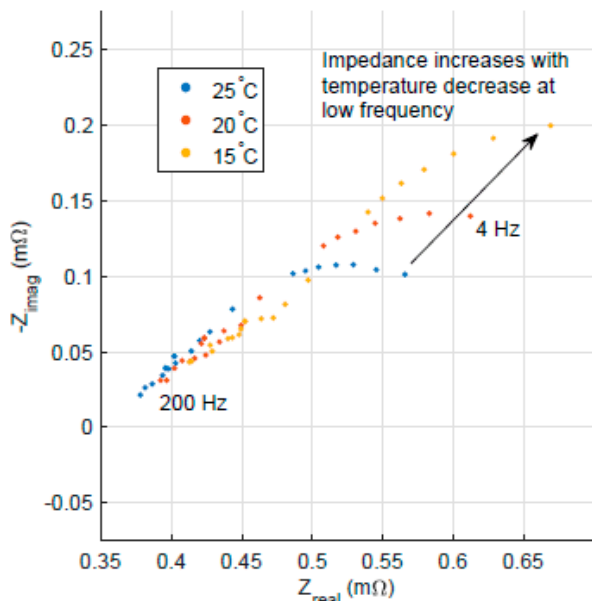
4. ábra. Mérési összeállítás a töltésvezérlő módosításával [2]

Aktív impedancia spektroszkópia esetén pakk vagy modul változtatható frekvenciájú szinuszos zavarása külső energiaforrás bevonása nélkül úgy valósítható meg, hogy az egység két részre kerül felosztásra és ezek között áramlik az energia. A szétválasztásra a töltő és a merítő félperiódusok miatt van szükség. Ehhez kifejlesztettek egy GaN FET alapú hármas aktiv hidas egyenáramú konvertert, amelynek teljesítménye 4 kW, feszültségintje 12 - 400 V között lehet. A cellaszintű feszültségválaszok mérése egyenáramú-eltolás kalibrációval rendelkezik, így pontosan rögzíthető a cellák közötti impedanciaingadozások [6]. A javasolt architektúrát a 5. ábra mutatja.



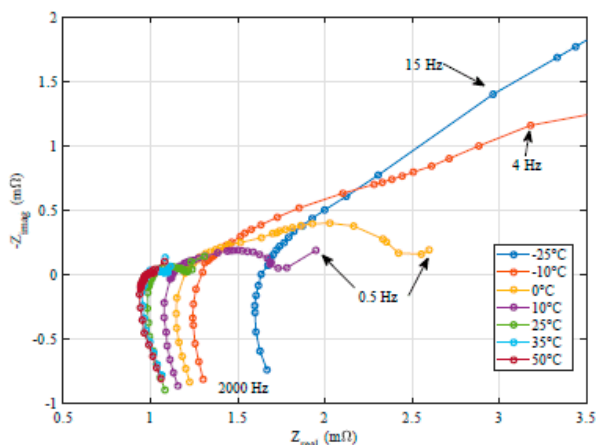
5. ábra. A javasolt architektúra cella szintű feszültségméréssel [6]

A megoldás nagyfeszültségű akkumulátoron EIS-t hajt végre tetszőleges alacsony tesztfrekvenciákon, előnye, hogy nincs szükség külső energiátároló használatára. A 6. ábrán a kísérletben egy 350 V-os lítium-ion akkumulátorcsomagon 4 - 200 Hz, valamint 15 °C - 25°C-os hőmérséklet között végzett in-situ impedanciamérések eredményei láthatóak.



6. ábra. A modulon mért impedanciák 4 – 200 Hz között [6]

Állításuk szerint EIS mérésre csak akkor van szükség, ha jelentős változások következnek be a hőmérsékletben, SOC-ben vagy degradációs állapotban. Az akkumulátorok feszültség- és áramfázorainak FFT-vel történő kinyerésének helyessége attól függ, hogy az akkumulátorok lineáris választ mutatnak-e zavaró áramra. Ha a perturbációs áram a cella Ah kapacitásához viszonyítva kicsi, nagyjából 10% akkor a zavaró áramnak nincs olyan egyenáramú eltolódása, amely jelentős változásokat okozna a cellák SOC értékében. A referenciamérés eredményét a 7. ábra tartalmazza.

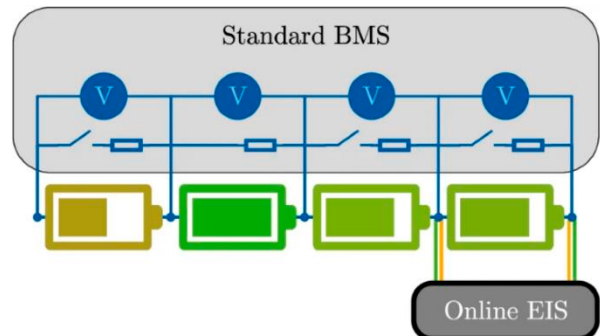


7. ábra. Akkumulátorcellán végzett laboratóriumi mérések eredménye [6]

A félcsomag szinuszos perturbációs áramok 50 Hz-en, körülbelül 900 W csúcsteljesítménynek felel meg.

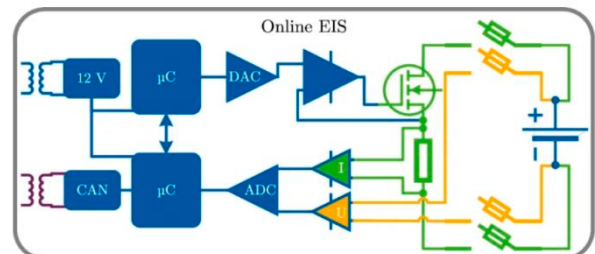
Az akkumulátor kiegyenlítő rendszerek nélkülözhetetlen elemek az akkumulátoros alkalmazásokban. Ez biztosítja aktív vagy disszipatív módon a feszültségeltérések kompenzálását a cellák

között. A javasolt megoldásban egy olyan eszköz látható, amely a már meglévő BMS rendszerre került ráillesztésre, további kiegyenlítő ellenállásokat hozzáadva az akkumulátorok zavarására. Mivel ezek az ellenállások kis értékűek, így nagy áramok alakulhatnak ki, ez az áram modulálható szinuszos jelek előállítására MOSFET használatával. A kutatás kiter a módszer felhasználhatóságának vizsgálatára és azonosítja a korlátokat is [5]. A módszer schematikus rajzát a 8. ábra mutatja.



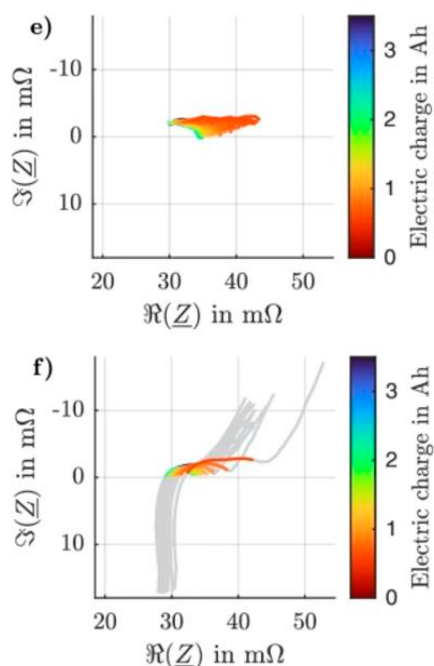
8. ábra. A kifejlesztett EIS panel integrációja a már meglévő rendszerbe [5]

A kiegyenlítő áram akkor használható EIS mérésekhez, ha az áram elég nagy és a feszültségmérés kellően pontos. Továbbá az áram és a feszültség megfelelő jel-zaj aránya (SNR) szükséges. Ebben az esetben cella szintű perturbációt és mintavételt alkalmaztak, a 9. ábrán látható módon.



9. ábra. A kifejlesztett EIS panel schematikus ábrája [5]

A gerjesztéshez MOSFET-et és műveleti erősítőt használó feszültség-áram átalakítót használtak, amelyet az adatfeldolgozástól különálló mikrovezérlő irányított. Az áram- és a feszültségmérésre 4 terminálos megoldást alkalmaztak. Az időtartományban lévő nyers áram- és feszültségértékek, valamint az online számított impedancia értékek CAN-buszon továbbíthatóak. Vizsgálatokat 2 - 640 Hz között végeztek, a teljes időtartam 10,4 másodpercet vett igénybe, ez elég hosszú idő lehet ahhoz, hogy a rendszer megváltozzon a mérés során és elveszítse időinvariáns tulajdonságát [5].



10. ábra. Mérési eredmények a javasolt módszerrel (e) és a referenciaméréssel (f)[5]

A kifejlesztett eszköz általi mérések eltérnek a laboratóriumi berendezésekkel kapott eredményektől, de az abszolút értékek korrelálnak egymással. A 10. ábrán az impedancia mérések eredményei láthatóak. A fázismérések nagyobb eltérést mutatnak magasabb frekvencián.

4. KONKLÚZIÓ

A bemutatott megoldási javaslatok külső hardver hozzáadásán vagy módosításán alapulnak. A járműipar nagyon ár érzékeny, ezért kerülni kell a költségek növekedését. További kutatások szükségesek olyan megoldás kidolgozásához, amely nem használ fel más eszközt a járműben találhatóakon kívül, ugyanakkor pontos előrejelzést ad a cella egészségi állapotáról, még extrém környezeti körülmények között is. Erre jó megoldás lehet az, ha a perturbáció a jármű természetes működésének mivoltából adódik, vagy olyan vezérlési metódus kerül implementálásra, amely a meglévő hardvereket használja a vizsgálathoz.

5. IRODALOM

- [1] “Non-destructive investigation of solid-state batteries: Overview of impedance spectroscopy (EIS) – FutureBatteryLab.” Accessed: Oct. 13, 2024. [Online]. Available: <https://futurebatterylib.com/non-destructive-investigation-of-solid-state-batteries-overview-of-impedance-spectroscopy-eis/>
- [2] L. Mattia, G. Petrone, F. Pirozzi, and W. Zamboni, “A low-cost approach to on-board electrochemical impedance spectroscopy for a lithium-ion battery,” *Journal of Energy Storage*, vol. 81, p. 110330, 2024, <https://doi.org/10.1016/j.est.2023.110330>
- [3] M. Abedi Varnosfaderani and D. Strickland, “A Comparison of Online Electrochemical Spectroscopy Impedance Estimation of Batteries,” *IEEE Access*, vol. 6, pp. 23668–23677, 2018, <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2018.2808412>
- [5] A. Blömeke, H. Zappen, F. Ringbeck, F. Frie, D. Wasylowski, and D. U. Sauer, “Balancing resistor-based online electrochemical impedance spectroscopy in battery systems: opportunities and limitations,” *Commun Eng*, vol. 3, no. 1, p. 62, Apr. 2024, <https://doi.org/10.1038/s44172-024-00203-6>
- [6] S. A. Assadi et al., “In-Situ EV Battery Electrochemical Impedance Spectroscopy with Pack-Level Current Perturbation from a 400V-to-12V Triple-Active-Bridge,” in *2022 IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC)*, Houston, TX, USA: IEEE, Mar. 2022, pp. 1056–1063. <https://doi.org/10.1109/APEC43599.2022.9773622>