

Nátrium-kén akkumulátor modul hőtechnikai modellezése

Dr. Csermány Dávid^{1,2}

okleveles gépészmérnök; csermany@energia.bme.hu

Sziffer Bence^{1,2}

okleveles gépészeti modellező mérnök; sziffer@energia.bme.hu

¹ BME, Gépészmérnöki Kar, Energetika Gépek és Rendszerek Tanszék² MTA-BME Lendület Megújuló Energiarendszerek Kutatócsoport

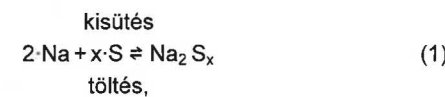
A nátrium-kén akkumulátorok hatékony és biztonságos üzemeltetéséhez elengedhetetlen a pontos hőtechnikai modellezés, mivel a technológia szűk és magas üzemi hőmérséklet-tartományban működik. Jelen munka célja egy korábban általunk elkészített és publikált koncentrált paraméterű modell finomítása a rendelkezésre álló saját mérési adatok alapján. A cellaellenállás töltöttségfüggő értékeit egyenértékű áramköri modell és nemlineáris optimalizálás segítségével határoztuk meg, majd beépítettük a meglévő termikus modellbe. Az illesztett ellenállás alkalmazásával a számolt és mért cellahőmérsékletek közötti eltérés jelentősen csökkent. Ezt követően végelelem módszeren alapuló modulszintű vizsgálatokkal igazoltuk, hogy a pontosított elektromos paraméterek jelentősen befolyásolják a hőmérséklet-eloszlást és a maximális hőmérsékletet a berendezésen belül.

Accurate thermal modelling is essential for the efficient and safe operation of sodium-sulfur batteries, as the technology operates within a narrow and elevated temperature range. The aim of the present work is to refine a previously developed and published lumped parameter model using our own available measurement data. The state of charge-dependent cell resistance values were determined using an equivalent circuit model combined with nonlinear optimization, and subsequently integrated into the existing thermal model. Applying the fitted resistance significantly reduced the deviation between measured and simulated cell temperatures. Finally, finite element-based module-level simulations confirmed that the refined electrical parameters have a substantial influence on the internal temperature distribution and the maximum temperature within the system.

Bevezetés

„Az időjárásfüggő megújuló energiaforrások intenzív terjedésével olyan, korábban kevésbé tapasztalt kihívásoknak van kitéve a villamosenergia-hálózat, ami a különböző energiatároló rendszerek terjedését is szükségessé teszi. Többek között napon belüli tárolásra, peak shavingre és frekvenciaszabályozásra kiválóan alkalmas elektrokémiai energiatárolók alkalmazása megoldást biztosíthat a felmerülő kihívásokra. Alkalmasságuk és könnyű elérhetőségük miatt a telepített tárolókapacitás egy nagyságrendbeli növekedése várható a következő két évtizedben szakértői előrejelzések szerint [1]. A legszélesebb körben elterjedt lítium-ionos tárolók mellett szükséges olyan új technológiák bevonásával is támogatni ezt a folyamatot, melyek hosszabb élettartamot, szélesebb körben elérhető alapanyagokat, vagy mérsékeltbb környezeti terhelést biztosítanak. A felsorolt előnyökkel rendelkeznek többek között a nátrium-

kén (NaS) energiatárolók is alacsony üzemeltetési költségek mellett [2]. Az energiatároló jellemzően hengeres kialakítású celláiban az olvadt állapotban lévő nátrium és kén elektródákat egy β -alumínium szilárd elektrolit választja el egymástól miközben töltés és kisütés során az alábbi reverzibilis kémiai reakció játszódik le,

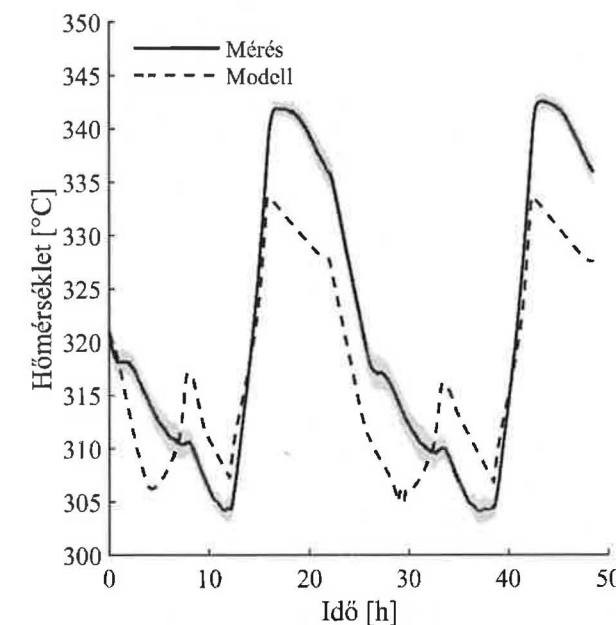


ahol x a töltöttségtől függ. A cellákat rozsdamentes acél burkolat veszi körül és hőszigetelt modulokba rendezve helyezik az akkumulátor konténerébe, ezáltal csökkentve a hővesztéseket a környezet felé. Azonban az olvadt állapot fenntartásához és a kellő cellafeszültség eléréséhez 300 °C feletti hőmérséklet szükséges, amit másik oldalról a jellemzően 350 °C-ban meghatározott maximális hőmérséklet korlátoz a biztonságos üzemvitel érdekében. A kontrollálatlan hőmérséklet hőmegfutási jelenségekhez, az elektródák érintkezése tüzesetekhez is vezethetnek. A magas, de relatív szűk üzemi hőmérséklettartomány mind a fűtést, mind a hűtést indokoltá teszi, ami egy összetett hőmérséklet-szabályzó rendszert tesz szükségessé [3].

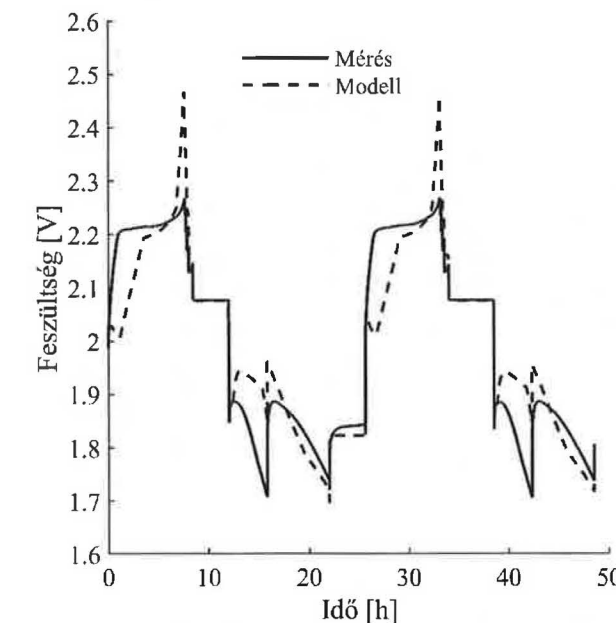
A hőmérséklet kritikus szerepe miatt különösen fontos az energiatároló termikus modellezése, melyre számos módszer alkalmas a vizsgálandó jelenség függvényében. Cellán belüli termikus folyamatok vizsgálatára alkalmasak a különböző numerikus szimulációk. Min és társai [4] különböző cellaelrendezéseket és szigeteléseket vizsgáltak, részletesen modellezve a cellán belüli hőmérsékleteloszlást a véges térfogatok módszerét alkalmazva. Azonban modulszintű vizsgálatokhoz egy egyszerűsített koncentrált paraméterű modellt használtak. Eredményeik megmutatták, hogy a modulok szélső és a sarkokban lévő celláinak faltól vett távolsága egy kritikus paraméter a hőmérsékleteloszlás szempontjából. Schaefer és társai [5] tranziens, termo-elektromos cellamodellt alkottak a hőmérsékleteloszlás vizsgálatára töltés és kisütés során. Eredményeik megmutatták, hogy a magasabb cellahőmérséklet növelheti a cellák hatásfokát, ugyanakkor növeli a hőmegfutási jelenségek és a tűzveszély kialakulásának esélyét. A legmagasabb hőmérsékleteket a kisütési időszakok végén tapasztalták az exoterm reakciók miatt, különösen magas áramsűrűségek esetében, ami nagymértékben emeli a cellahőmérsékletet. Vizsgálataink alátámasztják a hőmérséklet-szabályzás fontosságát, javasolataink alapján azt aktív ventilátor hűtéssel vagy az áramsűrűség korlátozásával megvalósítva. A különböző hőmérséklet-szabályzó rendszerek vizsgálatát Vudata és Bhattacharyya [3] publikálta, melyhez egy, a korábbi modellhez képest koordináta transzformációval egyszerűsített modellt használtak, a parciális differenciálegyenleteket differenciál-algebrai egyenletrendszerre visszavezetve, így csök-

kentve a számításgigényt. A ventilátorokkal megvalósított aktív, a fázisváltóanyaggal megvalósított passzív és a két módszer együttes alkalmazásából adódó hibrid hűtés vizsgálata alapján utóbbi esetében érhető el az ideális egyensúly az üzemeltetési költség, az anyagköltség és a megfelelő hűtőteljesítmény között.

Korábbi munkánk során létrehoztunk egy kapcsolt termikus-elektrokémiai koncentrált paraméterű modellt, melynek részletei megtalálhatók a hivatkozott publikációkban [6],[7]. A modell elkészítésekor az irodalomban fellelhető korlátozott mennyiségű és megbízhatóságú mérési adat mentén nyílt lehetőség a validációra. 2024. július 9-én a HUN-REN Energiatudományi Kutatóközpont csillebércei telephelyén átadták Magyarország első magas hőmérsékletű nátrium-kén akkumulátorát. A rendszer beüzemelését követően rendelkezésre állt a szükséges mérési adatsor a modell-számítások ellenőrzéséhez. Az 1. és a 2. ábra a mért és a számolt



1. ábra. Mért és számolt cellahőmérséklet-profilok összehasonlítása

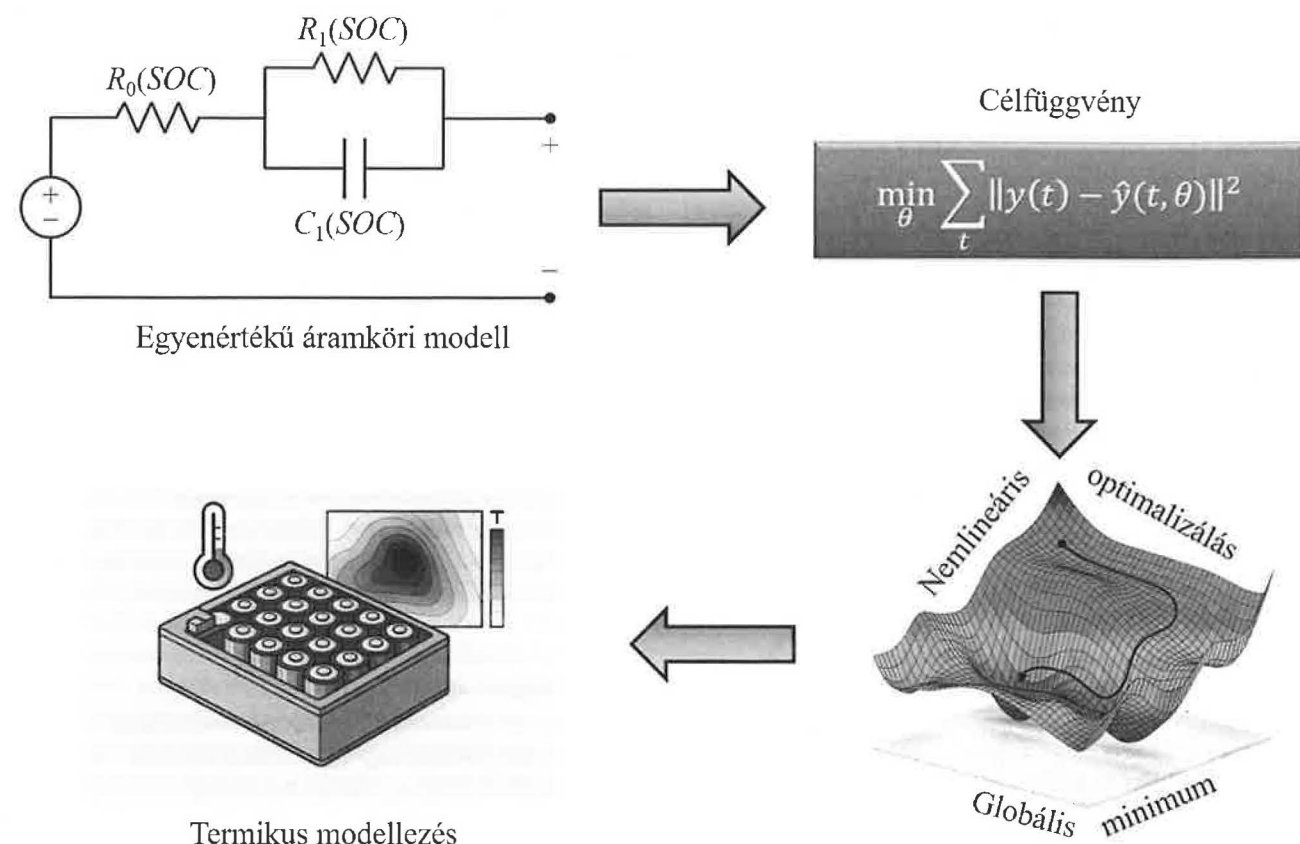


2. ábra. Mért és számolt cellafeszültség-profilok összehasonlítása

cellahőmérséklet-, valamint cellafeszültség-profilok összehasonlítását szemlélteti egy közel két napos mérési program során. A mérési program tartalmaz töltést, kisütést, illetve készenléti üzemi állapotot. A hőmérséklet-profilok összehasonlításából az látható, hogy a modell fizikailag helyes tendenciával reprodukálja a mérést, a dinamika megfelelő, ugyanakkor a lokális szélsőértékekben eltérések tapasztalhatók. Ennek magyarázatát a cellafeszültség-profilokból érthetjük meg. A töltési folyamat során alacsonyabb, a kisütési folyamat során magasabb feszültséget számol a modell, mint a mért érték. Az eltérés oka a cellaellenállásban keresendő. A modellszámítások során itt és más munkákban alkalmazott ellenállásértékek [8] ugyanis eltérnek a jelen berendezésben lévő cellák jellemző ellenállásától. Ennek következménye, hogy az ellenállás alulbecslésével a disszipálódó hőteljesítményt is alulbecsüljük, ezért a számolt hőmérséklet alacsonyabb lesz. Ennek megoldása szolgáltatja jelen vizsgálat fő motivációját, miszerint a rendelkezésre álló saját, nagy mennyiségű mérési adat mentén adjunk pontosabb értéket az ellenállásra. Ezzel a számolt hőmérséklet pontosítható. A koncepció módszertanát a következő részben mutatjuk be.

Módszertan

A 3. ábra az alkalmazott koncepció módszertanát szemlélteti. A cella vonatkozásában egy egyenértékű áramköri modell került meghatározásra, mely egy ideális feszültségforrást, egy soros ellenállást és egy ezzel sorba kötött párhuzamos RC tagot tartalmaz. Az áramköri modellt MATLAB/Simulink környezetben építettük fel. A modell bemenete a feszültségforrás üresjárású feszültsége, a cella töltöttsége és a cellaáram. Az illesztendő paraméterek az ellenállások és a kapacitás, melyek a töltöttség függvényei. Megjegyzendő, hogy a töltöttség mellett a hőmérséklet függvényei is, jelen vizsgálatban azonban az utóbbi vonatkozást nem tekintettük. Ezek mentén számolható a cellafeszültség. Egy célfüggvény definiálásával a számolt és mért cellafeszültség közötti különbség összehasonlítható. A probléma erőteljes nemlineáris jellege miatt nemlineáris optimalizálási algoritmust szükséges használni a globális szélsőérték megkereséséhez. Ehhez a MATLAB isqnonlin függvényét használtuk, melynek részletei a hivatkozásban megtalálhatók [9]. Az illesztett paraméterek közvetlenül implementálhatók a korábban felépített koncentrált paraméterű modellezési környezetbe és értékelhető az illesztés hatása a hőfelszabadulás és hőmérséklet számításának pontosságára. A koncentrált paraméterű modellezési szemléleten túl értékeltük az illesztés hatását a modulon belüli hőmérséklet-eloszlásra. Ehhez végelelem módszeren alapuló tranziens szimulációt végeztünk Ansys környezetben. Az ellenállásokon disszipálódó, valamint a reakciók következtében jelentkező hőteljesítményt térben homogén térfogati hőforrásként vettük figyelembe a cellatesten belül. A cella átlagos sűrűségét 2247 kg/m³, átlagos fajhőjét 1104 J/(kg·K) értékekkel tekintettük [4]. A cella inhomogén anyagszerkezete miatti anizotrop viselkedést a hővezetési tényező térfüggőségével vettük figyelembe, mely [2,42; 2,42; 5,39] W/(m·K) az x, y, és z irányoknak megfelelően [4]. A modul falain, valamint a cellák felső körülváráján tekintett hőáramsűrűség peremfeltételek megadása a gyártó által ajánlott konvektív hővesztesség és hűtési teljesítmény szerint történt. A cellák közötti teret homok tölti ki, mely az üzemeltetést biztonságát tekintve megfelelő szigetelőként funkcionál. A homok esetében 1600 kg/m³ sűrűséget, 830 J/(kg·K) fajhőt és 1,5 W/(m·K) hővezetési tényezőt alkalmaztunk a számítások során.



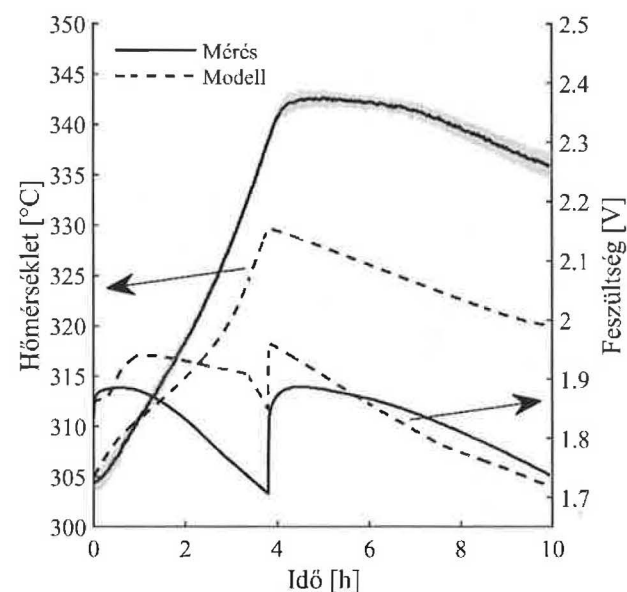
3. ábra. Az alkalmazott módszertan összefoglalása

A modellillesztés valós, perces felbontású adatok felhasználásával történt, amelyek nyolc hónapos időtávban álltak rendelkezésre. Az illesztés pontosságának növelése és a vizsgálandó paraméterek töltöttségfüggésének megfelelő figyelembevételének érdekében, célszerű a teljes feltöltést és kisütést tartalmazó mérési adatokat felhasználni. A töltöttség és áramerősség értékek mellett rendelkezésre állnak feszültség értékek mind a teljes konténerre, mind a blokkokra vetítve. A teljes konténer hat modulból épül fel, melyekben a cellák két blokkba vannak rendezve. A termikus almodell validálására modulonként két hőmérsékletmérési pont adatai állnak rendelkezésre, egy a modulok alsó síkjának középpontjából és egy az oldalsó sík felső harmadából. Az akkumulátor felületei rendszere a túltöltést elkerülendő a töltési ciklusok végén három lépcsőben mérsékli a cellaáramot. Ezzel szemben a kisütési ciklusok során a felületei rendszer jóval hamarabb közbeavatkozik, ami megnehezíti a paraméterek illesztését. A kisütés során végbemenő exoterm kémiai reakciók jelentős hőtermeléssel járnak, ami intenzív hőmérséklet növekedéshez vezet. Emiatt a rendszer nagymértékben, majd fokozatosan mérsékli a kisütési teljesítményt 343 °C elérésekor, megakadályozva a hőmérséklet további növekedését. A cellaáram a 98 – 125 A tartományban mozgott amíg a cellák hőmérséklete az előírt biztonságos hőmérséklettartományban maradt. A bemutatott koncepció eredményeit a következő részben közöljük. Ezen felül bemutatjuk a tárgyalt végelelem módszeren alapuló modell lehetséges további gyakorlati alkalmazását.

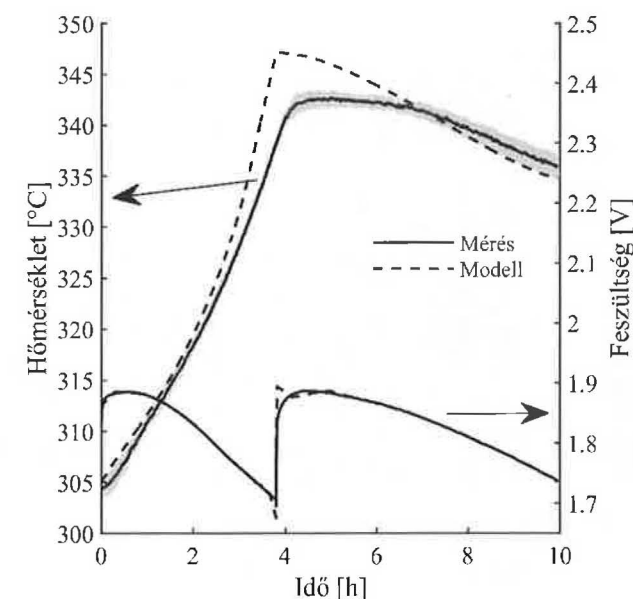
Eredmények

A modellillesztés hatásának bemutatását a következőkben egy kisütési folyamatra vonatkozó mért és számolt értékek összehasonlításával végezzük el. A 4. ábra az irodalomból származó cel-

laellenállással elvégzett koncentrált paraméterű modellszámítás eredményét mutatja, amely alapján a cellahőmérséklet számítása jelentős, átlagosan 11,2 °C-al eltér a méréshez képest. A cellafeszültség-profilon jól látható, hogy a modell a valósnál magasabb feszültséget számol, amely az alkalmazott ellenállás alulbecsléséből adódik. Ennek következménye, hogy a disszipált hőteljesítményt is alulbecsli, így a számolt hőmérséklet minden vizsgált szakaszban elmarad a mért értékektől. Az ellenállás illesztésének eredményeit az 5. ábra mutatja. Az illesztett cellaellenállás alkalmazásával



4. ábra. Mért és irodalmi cellaellenállással számolt cellahőmérséklet- és cellafeszültség-profilok összehasonlítása kisütés során

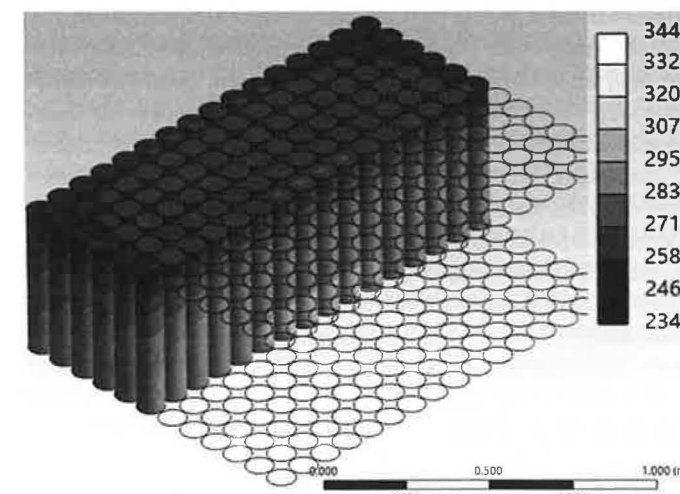


5. ábra. Mért és illesztett cellaellenállással számolt cellahőmérséklet- és cellafeszültség-profilok összehasonlítása kisütés során

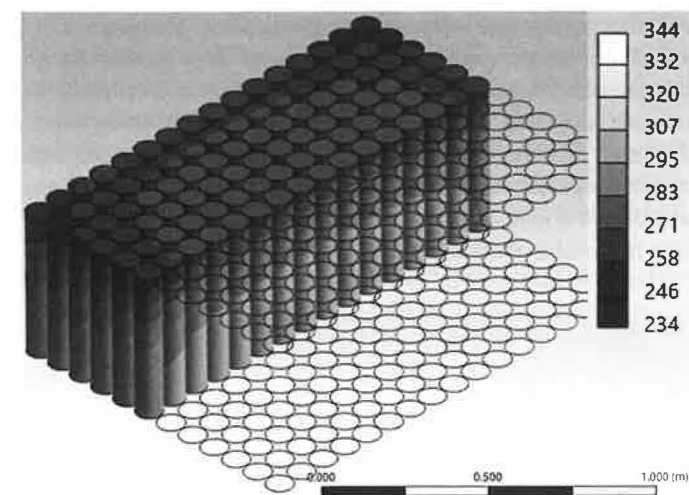
a számolt és mért cellahőmérsékletek közötti eltérés jelentősen, mindössze 2,1 °C átlagos különbségre csökkent. A cellafeszültség-profil is jó egyezést mutat, ami alátámasztja, hogy az illesztés megfelelően reprezentálja a valós berendezés elektromos viselkedését, és a disszipáció pontosítása érdemben javítja a termikus modell pontosságát.

A cellaellenállás hatását ezután modulszinten is vizsgáltuk. A 6. és 7. ábra az irodalmi, illetve az illesztett ellenállással számolt végelelemes szimuláció eredményeit mutatja a modul keresztmetszetében. A láthatóság érdekében csak a modul fele került ábrázolásra. Megfigyelhető, hogy az illesztett cellaellenállás alkalmazásával a modulon belüli hőmérséklet-eloszlás karaktere megváltozik és a magasabb disszipáció következtében a hőmérsékleti maximum értéke is számottevően növekszik. Ez a különbség a teljes modul viselkedését tekintve érdemi hatással bír, ami alátámasztja a cellaszintű illesztés szükségességét.

A modulszintű folyamatok részletesebb vizsgálatához a hossz- tengellyel párhuzamos, a vízszintes síkra merőleges középsík mentén tovább elemeztük a hőmérséklet-eloszlást, ahol már a cellák

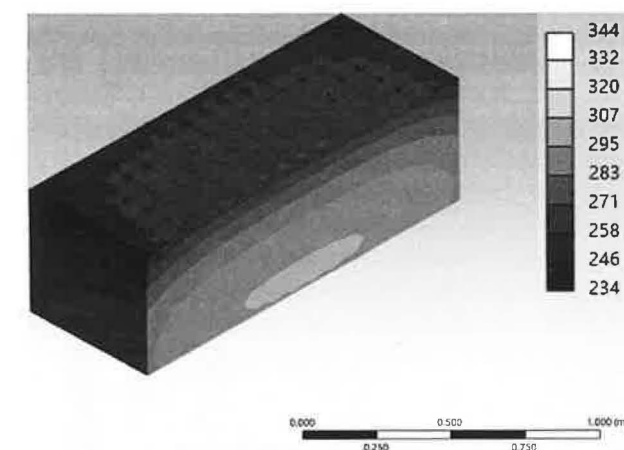


6. ábra. Irodalmi cellaellenállással számolt akkumulátormodulon belüli hőmérsékleteloszlás

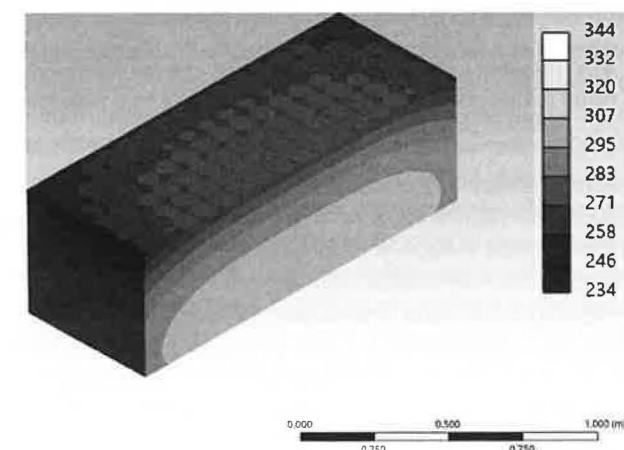


7. ábra. Illesztett cellaellenállással számolt akkumulátormodulon belüli hőmérsékleteloszlás

közötti kitöltőanyag (homok) is megjelenítésre került. A 8. és 9. ábra eredményei megerősítik a 6. és 7. ábrán látottakat: az illesztett ellenállás alkalmazásával a maximális hőmérséklet magasabb, és a hőmérsékletmező eloszlása is eltérő. A cellák nem ábrázolt kontúrjainak elhagyása a jobb áttekinthetőséget szolgálja, az eloszlási különbségek egyértelműen láthatók.

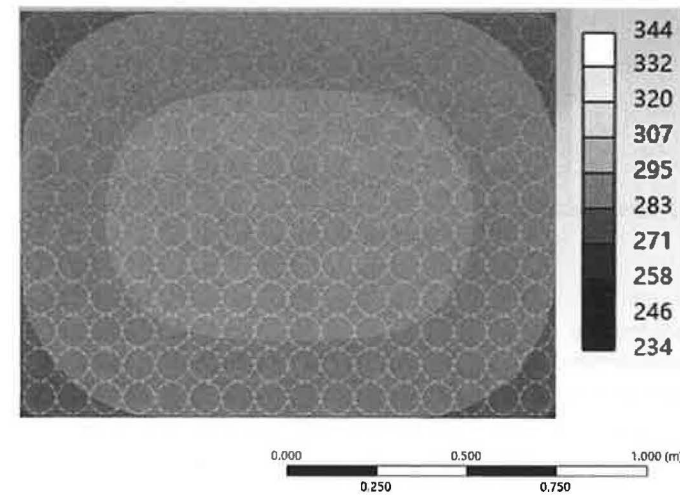


8. ábra. Irodalmi cellaellenállással számolt akkumulátormodulon belüli hőmérsékleteloszlás a hossz- tengellyel párhuzamos, a vízszintes síkra merőleges középsíkkal elmsztve

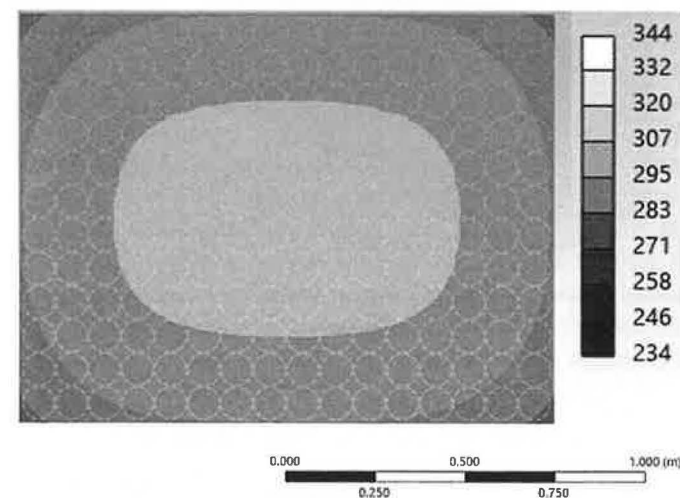


9. ábra. Illesztett cellaellenállással számolt akkumulátormodulon belüli hőmérsékleteloszlás a hossz- tengellyel párhuzamos, a vízszintes síkra merőleges középsíkkal elmsztve

A modul hossztengeleyével és a vízszintes síkkal párhuzamos középsíkban vizsgált eredményeket a 10. és 11. ábra mutatja. Ebben a metszetben is az előzőekhez hasonló tendencia érvényesül: az illesztett ellenállás magasabb csúcshőmérsékletet eredményez, miközben az eloszlás jellege nagymértékben hasonló marad, amit az azonos peremfeltételek és modulgeometria indokol. A különbség azonban itt is igazolja, hogy az elektromos paraméterek pontosítása a hőtechnikai modellezés szempontjából kritikus.

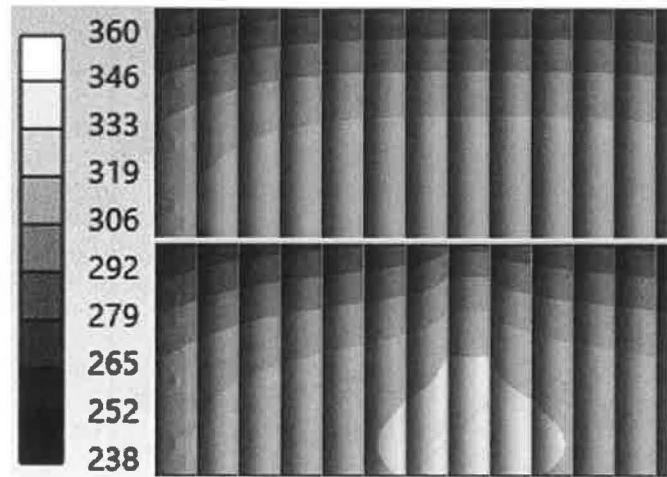


10. ábra. Irodalmi cellaellenállással számolt akkumulátormodulon belüli hőmérsékleteloszlás a hossztengeleyvel és a vízszintes síkkal párhuzamos középsíkkal elmentsve



11. ábra. Illesztett cellaellenállással számolt akkumulátormodulon belüli hőmérsékleteloszlás a hossztengeleyvel és a vízszintes síkkal párhuzamos középsíkkal elmentsve

Az illesztés hatásán túl a modellezési módszer gyakorlati alkalmazhatóságát szemlélteti a 12. ábra, amely normál és hibás üzemvitel összehasonlítását mutatja. A hibás esetben a középső cellában a hőfelszabadulást megnöveltük, ezzel egy zárlatos vagy hőmegfűtési jelenséget produkáló cella viselkedését reprezentálva. Az ábra jellegében eltérő hőmérséklet-eloszlást és magasabb maximumértéket mutat, ami jól szemlélteti, hogy a bemutatott véges elemes modell alkalmas különböző hibaszcenáriók értékelésére. A módszer tetszőleges számú és pozíciójú hibás cella hatásának vizsgálatát lehetővé teszi, ami a biztonsági elemzések és üzemviteli kockázatértékelés szempontjából különösen értékes.



12. ábra. Modulon belüli hőmérsékleteloszlás a hossztengeleyvel párhuzamos, a vízszintes síkra merőleges középsík mentén normál (felül) és hibás (alul) cellaműködés esetén

Összefoglalás

A nátrium-kén (NaS) akkumulátorok a megújuló energiaforrások integrációjában jól meghatározott szerepet tölthetnek be, azonban a technológia magas és szűk üzemi hőmérséklet-tartománya miatt a pontos hőtechnikai modellezés elengedhetetlen a biztonságos és hatékony üzemeltetéshez. Korábbi munkáink során kidolgoztunk egy kapcsolt termikus-elektrokémiai, koncentrált paraméterű modellt, amelynek validációját azonban jelentősen korlátozta a nem megfelelő megbízhatóságú irodalmi mérési adatbázis. A Magyarországon üzembe helyezett első magas hőmérsékletű NaS rendszer nyolc hónapnyi, perces felbontású mérési adata lehetőséget biztosított a modell pontosítására, különösen a cellaellenállás értékének finomítására, amely kritikus szerepet játszik a hőtermelés és a hőmérséklet alakulásában. A vizsgálatban egy egyenértékű áramköri modell paramétereit illesztettük MATLAB/Simulink környezetben nemlineáris optimalizálással, a mért cellafeszültség-profil felhasználva. Az így meghatározott töltésségfüggő paramétereket közvetlenül beépítettük a korábban kialakított termikus modellbe, majd értékeltük az illesztés hatását mind cella-, mind modulszinten. A modulszintű hőmérséklet-eloszlást véges elemes szimulációval vizsgáltuk Ansys környezetben, figyelembe véve a valós geometriai elrendezést, az anizotrop hővezetést és a gyártói peremfeltételeket. Az eredmények egyértelműen igazolták a cellaellenállás pontosításának szükségességét: míg az irodalmi értékek alkalmazásával a cellahőmérséklet átlagosan 11,2 °C eltérést mutatott a méréshez képest, az illesztett ellenállással ez mindössze 2,1 °C-ra csökkent. A modulszintű elemzések kimutatták, hogy a magasabb, valós disszipáció számottevően befolyásolja a hőmérséklet-mező eloszlását és a csúcshőmérséklet nagyságát is. A bemutatott véges elemes módszer alapuló modell továbbá alkalmas hibás üzemállapotok, például zárlatos vagy hőmegfűtési jelenséget produkáló cellák hatásának értékelésére is, ami fontos eszköz lehet a biztonsági vizsgálatok és az üzemviteli döntéstámogatás számára.

Köszönetnyilvánítás

A munka a 2021-2.1.1-EK-00002 számú projekt keretén belül a Nemzeti Kutatási Fejlesztési és Innovációs Alapból biztosított támogatással, a 2021-2.1.1-EK pályázati program finanszírozásá-

ban és a Doktoranduszi Kiválósági Ösztöndíj Program (DKÖP-25-1-BME-84) keretein belül a Kulturális és Innovációs Minisztérium Nemzeti Kutatási Fejlesztési és Innovációs Alapból nyújtott, valamint a Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem támogatása alapján valósult meg. A kutatást az MTA Fenntartható Fejlesztés és Technológiák Nemzeti Program (FFT NP FTA) és a Bolyai János Kutatási Ösztöndíj támogatta.

Hivatkozási jegyzék

- [1] IEA. Installed power generation capacity by source in the Stated Policies Scenario, 2000-2040 – Charts – Data & Statistics n.d. <https://www.iea.org/data-and-statistics/charts/installed-power-generation-capacity-by-source-in-the-stated-policies-scenario-2000-2040> (accessed February 16, 2026).
- [2] Kumar D, Rajouria SK, Kuhar SB, Kanchan DK. Progress and prospects of sodium-sulfur batteries: A review. *Solid State Ionics* 2017;312:8–16. doi:<https://doi.org/10.1016/j.ssi.2017.10.004>.
- [3] Vudata SP, Bhattacharyya D. Thermal management of a high temperature sodium sulphur battery stack. *Int J Heat Mass Transf* 2021;181:122025. doi:<https://doi.org/10.1016/j.ijheat-masstransfer.2021.122025>.

- [4] Min JK, Lee C-H. Numerical study on the thermal management system of a molten sodium-sulfur battery module. *J Power Sources* 2012;210:101–9. doi:<https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2012.03.028>.
- [5] Schaefer (Caprio) S, Vudata SP, Bhattacharyya D, Turton R. Transient modeling and simulation of a nonisothermal sodium-sulfur cell. *J Power Sources* 2020;453:227849. doi:<https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2020.227849>.
- [6] Csermány D. Magas hőmérsékletű nátrium-kén akkumulátor koncentrált paraméterű modellezése. *Energiagazdálkodás* 2024;65:18–23.
- [7] Csermány D. Coupled thermal-electrical lumped parameter modeling of high-temperature sodium-sulfur battery. *J Energy Storage* 2025;109:115117. doi:<https://doi.org/10.1016/j.est.2024.115117>.
- [8] Hussien ZF, Cheung LW, Siam MFM, Ismail AB. Modeling of Sodium Sulfur Battery for Power System Applications. *Elektronika* 2007;9:66–77.
- [9] Mathworks. MATLAB Help Center: Isqnonlin - Solve nonlinear least-squares (nonlinear data-fitting) problems n.d. <https://www.mathworks.com/help/optim/ug/Isqnonlin.html> (accessed February 16, 2026).

A NaS energiatároló rendszerek gazdasági értékelése

Dr. Kaderják Péter

BME Zéró Karbon Központ vezető

Dr. Szolnoki Pálma

BME Zéró Karbon Központ főmunkatárs

Az elemzés a Tesseract Energiatároló című kutatási projekt keretében egy konkrét 750 kW / 4350 kWh kapacitású NaS-tároló műszaki és gazdasági paramétereit alapján vizsgálja a technológia piaci potenciálját a magyar villamosenergia-rendszerben. A bevételi lehetőségeket a kiegyenlítő-szabályozási piac (különösen az aFRR tartalék és energiaszolgáltatás) és a nagykereskedelmi villamosenergia-piaci arbitrázs keretében vizsgálja, továbbá értékeli ezek kombinált alkalmazását önálló és naperőművel kollokált konfigurációk esetén. A modellezés több ár- és működési forgatókönyv mentén történik, figyelembe véve a piaci árkörnyezet változékonyságát, a tartaléklekötés valószínűségét, valamint a tárolók műszaki jellemzőit. A pénzügyi értékelés diszkontált cash flow (DCF) módszeren alapul, 20 éves időhorizonton, a beruházási (CAPEX) és működési (OPEX) költségek figyelembevételével. Az eredmények alapján a vizsgált NaS projekt a jelenlegi és előre jelzett piaci környezetben jellemzően nem tekinthető gazdaságosan megtérülőnek, még kedvező szabályozási feltételek – például csökkentett rendszerhasználati díjak – mellett sem. Ugyanakkor a beruházási költségek mérséklődése érdemben javíthatja a gazdaságosságot: a szakirodalomban jelzett alacsonyabb CAPEX-szintek mellett a technológia a legtöbb vizsgált forgatókönyv esetében pozitív megtérülést érhet el. Mindez arra utal, hogy a költségek további csökkenésével a NaS technológia középtávon versenyképes megoldássá válhat, elősegítve a villamosenergia-rendszer rugalmasságának növelését és a tárolási technológiák portfóliójának diverzifikálását.

The analysis is carried out within the framework of the Tesseract Energy Storage research project and is based on the technical and economic parameters of a specific NaS system with a capacity of 750 kW / 4,350 kWh, to assess the market potential of the technology within the Hungarian electricity market. Revenue streams are evaluated in both the balancing market – particularly aFRR capacity and energy services – and wholesale electricity market arbitrage, as well as through their combined application in standalone and co-located configurations with photovoltaic generation. The modeling is conducted across multiple price and operational scenarios, considering market price volatility, the probability of reserve capacity allocation, as well as the technical characteristics of the storage systems. The financial evaluation is based on a discounted cash flow (DCF) approach over a 20-year time horizon, incorporating both capital expenditures (CAPEX) and operational expenditures (OPEX). The results indicate that, under current and projected market conditions, the examined NaS project is generally not economically viable on a market basis, even when favorable regulatory conditions – such as reduced grid tariffs – are assumed. However, a reduction in investment costs can significantly improve economic performance: at the lower CAPEX levels reported in the literature, the technology can achieve positive returns in most of the analyzed scenarios. These findings suggest that, with further cost reductions, NaS technology could become a competitive solution in the medium term, contributing to increased flexibility in the electricity system and to the diversification of energy storage technologies.
