

Nátrium-kén akkumulátor hatásfokának vizsgálata optimalizált üzemvitel esetén

Ilyés Botond^a
botiilyes5@gmail.com

Dr. Csemány Dávid^{a b}
csemany@energia.bme.hu

Dr. Mayer Martin János^{a b}
mayer@energia.bme.hu

^a BME, Gépészmérnöki Kar, Energetikai Gépek és Rendszerek Tanszék

^b MTA-BME Lendület Megújuló Energiarendszerek Kutatócsoport

Az akkumulátoros energiatárolás egyre fontosabb szerepet tölt be a villamosenergia-rendszerben. A lítium alapú megoldások mellett a nátrium-kén akkumulátorok feltörekvő technológiának tekinthetők, azonban üzemeltetésük a magas üzemi hőmérséklet miatt körültekintést igényel. Munkánk során az akkumulátoros energiatárolók esetében gyakran alkalmazott lineáris optimalizálási módszertant kombináltuk egy technológiaspecifikus termikus-elektromos modellel. A két lépcsős módszertan segítségével megvizsgálható a gazdaságilag optimális működés technológia szempontból. A kapott eredmények rávilágítottak arra, hogy a gyorsan változó, piaci alapú működéshez a gyártó által specifikált hűtési teljesítmény nem elegendő, továbbá, hogy az akkumulátor részletes termikus modellezése elengedhetetlen a megfelelő üzem biztosításához. A lineáris optimalizálás bár egy hatékony eszköz az alapvető tervezés során, azonban a technológiára jellemző termikus összefüggések nem építhetők be, így elengedhetetlen a második lépcsőfok és a részletes elemzés.

Battery energy storage systems (BESS) play an increasingly important role in the electricity system. In addition to lithium-based solutions, sodium-sulfur batteries are considered an emerging technology, but their operation requires caution due to their high operating temperature. In our work, we combined the linear optimization methodology often used for BESS with a technology specific thermal-electrical model. The two-step methodology allows us to examine economically optimal operation from a technological perspective. The results highlighted that nominal cooling power specified by the manufacturer is not sufficient for rapidly changing, market-based operation, and that detailed thermal modeling of the battery is essential to ensure proper operation. Although linear optimization is an effective tool in basic design, the thermal behavior of technology cannot be incorporated into the linear model, making the second step and detailed analysis essential.

Bevezetés

Az elmúlt években egyre nagyobb hangsúly került a rendszerszintű energiatárolás megvalósítására, valamint a különböző energiatárolási megoldásokra. Főként az akkumulátoros rendszerek térnyerése szembetűnő, technológiai szempontból pedig a lítium alapú akkumulátorok tekinthetők piacvezetőnek.

Villamosenergia-tárolók alkalmazhatók az ellátás minőségének fenntartására, illetve energiamenedzsment célokra [1]. Minőségi szempontból a legfontosabb a frekvenciastabilitás fenntartása és

a feszültségszabályozás. A feszültség csak megfelelő meddőteljesítmény viszonyok között tartható névleges értéken. Amennyiben magas az igény mind a hatásos, mind a meddő teljesítmény iránt, akkor energiatároló segítségével biztosítani lehet a hatásos teljesítményigény egy részét, ezáltal a generátorok biztosítani tudják a szükséges meddő teljesítményt [2]. Az ellátás minőségének biztosítása mellett az egyre növekvő megújuló penetráció az energiamenedzsment fontosságát is előtérbe hozta. Akkumulátoros rendszerek használhatók peak shaving-re, szigetüzemű vagy mikrogrid rendszerek kialakítására, az önellátás arányának növelésére, de akár rendszerszintű kiegyenlítésre is.

Akkumulátoros rendszerek telepíthetők önállóan (stand-alone) vagy termelővel összekapcsolt (ko-lokált) formában. Amennyiben termelő mellé kerül telepítésre, akkor közös a csatlakozási pont, ezáltal a csatlakozási kapacitás lehet limitáló tényező, illetve amennyiben csak betáplálási kapacitás áll rendelkezésre, akkor az limitálja a tároló működését, mivel ebben az esetben csak a termelő által tölthető. Azonban így is segíti a tároló a termelő működését, mivel az alacsony vagy akár negatív villamosenergia-árak esetén jobban megéri eltárolni a megtermelt villamos energiát, továbbá a tároló segíthet a menetrendtartásban is, így csökkentve a szabályozási igényeket. Önálló akkumulátor esetében minden rendelkezésre álló villamosenergia-piacon lehetséges a részvétel, ezáltal több bevételi forrás is elérhető, illetve a villamosenergia-rendszer szempontjából a jótékony tulajdonságok jól kihasználhatók.

A lítium alapú technológia bár számos pozitív tulajdonsággal, mint például nagy teljesítménysűrűség, egyre csökkenő beruházási költség, valamint egyre nagyobb üzemeltetési tapasztalat rendelkezik, azonban nem nevezhető egyedüli megoldásnak az akkumulátoros rendszerek esetében. Számos más technológia érhető már el a piacon, ezek közül az egyik a nátrium-kén akkumulátor. Munkánk során a nátrium-kén akkumulátorok hálózati energiatárolóként történő működését vizsgáltuk gazdasági és technológia szempontból. A technológiaspecifikus kritikus üzemeltetési szempontok figyelembevétele elengedhetetlen a megfelelő működés megvalósításához, ezért egy olyan kétlépcsős módszertant dolgoztunk ki, mely első lépésben gazdaságilag optimalizálja az akkumulátoros rendszer működését, majd ezt követően a gazdaságilag optimalizált működést műszaki szempontból felülvizsgálja így biztosítva a megfelelő üzemet.

Nátrium-kén technológia

Elektrokémiai energiatárolóként felépítése hasonló a többi akkumulátorhoz, azonban a szilárd elektródák és a folyékony elektrolit helyett folyékony nátrium és kén elektródákból, illetve szilárd β -alumínium elektrolitból épül fel a hengeres cella. Az akkumulátor

ros energiatárolókkal kapcsolatban kérdéses a felhasznált anyagok elérhetősége és újrahasznosíthatósága, azonban ebben az esetben ez megoldott, hiszen a nátrium és kén nagy mennyiségben rendelkezésre áll és az újrahasznosíthatóság is magas [3,4]. A cellák modulokban, a modulok pedig konténerekben találhatók. Egy konténérben 6 modul található, egy modul pedig 192 cellát tartalmaz. Nagy energiasűrűség, gyakorlatilag azonnali válaszidő, hosszú élettartam és jó ciklikus hatásfok jellemzi, továbbá a karbantartási igények és költségek, valamint az önkisülés mértéke is elhanyagolható. További pozitív tulajdonsága, hogy teljesítmény- és energiasűrűség szempontjából kiegyensúlyozott technológia, ami rövid ideig jelentősen túl is terhelhető.

Bár számos pozitív tulajdonsággal rendelkezik a technológia, üzemeltetése kihívásokat is tartogat. A teljesítményt jelentősen befolyásolják az üzemeltetési körülmények, mint például a töltési és kisütési ciklusok ütemezése, a kisütés mélysége, valamint az aktuális hőmérséklet [5]. Utóbbi kritikus szempont, mivel a megfelelő működés biztosításához és így az elektródok folyékony állapotban tartásához 300-340°C közötti üzemi hőmérsékletre van szükség. Az aktuális érték pillanatnyi működésnek megfelelően változik. Kisütés közben a kémiai reakciók miatt bekövetkező hőfejlődés, illetve a belső ellenállásokon keletkező veszteségek miatt nő a cellahőmérséklet. Ugyanakkor töltés közben a keletkező hő és a végbemenő reakciók miatti hőfelvétel kiegyenlíti egymást, azonban még így is csökken az akkumulátor hőmérséklete.

A temperálás külső fűtéssel és hűtéssel valósítható meg, minden modul rendelkezik egy a hűtést biztosító ventilátorral és egy elektromos fűtőszálal. Amennyiben a cellák hőmérséklete a működési tartomány alsó határa alá csökken, akkor a fűtés bekapcsol, míg, ha a hőmérséklet túllépi a felső határértéket, akkor a ventilátor gondoskodik a megfelelő hűtésről. A temperálás villamosenergia-felhasználással jár.

A szakirodalomban is számos tanulmányban vizsgálták már a technológia működését, akár az elektrolit viselkedésére [6], akár a hőmérsékleteloszlásra vonatkozóan [7]. Továbbá a megfelelő cellakonfigurációkat és a hűtési módszereket [8] is vizsgálták már, hiszen ezek a tényezők elengedhetetlenek a megfelelő üzemeltetés biztosításához. Azonban a NaS akkumulátorok átfogó rendszerszintű optimalizálása ritka a szakirodalomban. Azok a tanulmányok, amik ezt a kérdéskört vizsgálják vagy egy előre meghatározott minta töltési profilra támaszkodnak, amelyek kevésbé tükrözik a valós üzemet, vagy pedig egyszerűsített lineáris modelleket alkalmaznak, így viszont nem garantálható a javasolt működés megvalósíthatósága például termikus szempontból.

Munkánk célja, hogy kitöltsse ezt a hiányosságot egy kétlépcsős tervezési folyamat bemutatásával, amely figyelembe veszi a NaS akkumulátorok nemlineáris tulajdonságait és termikus menedzsmentjét. A gyorsan változó, piacialapú működés segít modellezni a különböző hőmérsékletű üzemállapotokat, így vizsgálható az akkumulátor viselkedése és feltárhatóak az esetleges hiányosságok.

Módszertan

Az akkumulátoros rendszerek optimalizálásának egyik legnagyobb kihívása a megfelelő és hatékony töltési és kisütési stratégiák kidolgozása [9]. A tervezés során fontos szempont a töltés és kisütés sebessége, a kisütés mélysége, rendellenes üzemeltetés pedig a kihasználható ciklusok számának csökkenéséhez vezethet. Továbbá az egyre inkább megújuló alapú villamosenergia-rendszerben a tárolónak hatékonyan alkalmazkodnia kell a termelés időszakos és

változó jellegéhez, amely az időjárási körülményektől és a napszaktól függően ingadozhat.

Az általunk kialakított keretrendszer első lépése egy lineáris modell, mely a másnapi villamosenergia-piac árai, a tároló alapvető műszaki paraméterei, valamint a beruházási és üzemeltetési költségek alapján negyedórás felbontásban optimalizálja az önálló tároló működését. Meghatározásra kerül a mindenkori teljesítmény és energiaegyensúly, valamint a modell számolja az egyenértékű ciklusszámot és az elért bevételt a másnapi piacon. Fontos kihangsúlyozni, hogy egy önálló tároló számára nem csak a másnapi villamosenergia-piac elérhető, sőt jelentős bevételt jelenthet a rendszerszintű szolgáltatások piacán való részvétel, azonban a modellezési komplexitás miatt a vizsgálatunkat csak a másnapi piacon végzett arbitrázs tevékenységre korlátoztuk le.

A lineáris modell eredménye a teljesítmény- és töltöttségi szint profilok. Utóbbi bemenetként szolgál a második lépésben alkalmazott termikus-elektrokémiai modell számára. A töltöttségi szint profil alapján meghatározható a mindenkori cellaáram, cellafeszültség és ellenállás értéke, valamint számolható a pillanatnyi hatásfok is. Az akkumulátorcellák hőmérséklete az akkumulátor hőtechnikai viselkedése alapján határozható meg, figyelembe véve a belső hőfejlődést, valamint a külső hűtést és fűtést is.

Lineáris optimalizálás

Az optimalizálás során lineáris egyenletekkel és egyenlőtlenségekkel írhatóak le azok a kényszerek, amelyek befolyásolják az akkumulátor működését. Ilyen többek között a megengedhető töltési és kisütési teljesítmény értéke, melyet az (1) és (2) egyenlőtlenségek írnak le:

$$0 \leq P_{ch} \leq P_{mod} N_{mod} \quad (1)$$

$$0 \leq P_{ch} \leq P_{mod} N_{mod} \quad (2)$$

ahol N_{mod} az akkumulátormodulok száma, P_{mod} pedig a modulok névleges teljesítménye. Az akkumulátor töltöttségi szint változása a következő (3) egyenlettel írható fel:

$$SOC_{W,t} = SOC_{W,t-1} + \frac{\Delta t \left(\eta_b P_{ch,t-1} - \frac{P_{dis,t-1}}{\eta_b} \right)}{C_{W,nom}} \quad (3)$$

ahol Δt az időlépés hossza, ami a modellben 15 perc, η_b a töltési és kisütési hatásfok, aminek értéke 90%, $C_{W,nom}$ pedig az egész akkumulátortelep névleges kapacitása, amit pedig a következőképpen (4) lehet felírni:

$$C_{W,nom} = C_{mod} N_{mod} \quad (4)$$

ahol C_{mod} egy akkumulátormodul kapacitása. $SOC_{W,t-1}$ a töltöttségi szint az előző időlépés során, míg $P_{ch,t-1}$ a töltési teljesítmény az előző időlépésben.

Az SOC_W az akkumulátorban eltárolt energia részarányát mutatja a teljes akkumulátorkapacitáshoz viszonyítva, értéke 0 és 1 között lehet. Az erre vonatkozó kényszert a következő (5) összefüggés írja le:

$$0 \leq SOC_W \leq 1 \quad (5)$$

Az optimalizálás célja a lehető legmagasabb gazdasági érték elérése, amely az alkalmazás módjától is függ. Az önálló akkumulátor esetében cél a lehető legnagyobb bevétel realizálása a másnapi villamosenergia-piacon. Az optimalizálás célfüggvénye a következőképpen (6) írható fel:

$$\max(\sum (P_{dis} - P_{ch}) c_{el} \Delta t c_{b} \sum P_{ch} - \Pi) \quad (6)$$

ahol c_{el} a mindenkor villamosenergia-ár a másnapi piacon I_b az akkumulátor karbantartási költsége a beruházási költségre vonatkoztatva, Π pedig egy büntető tag, melynek célja az oszcilláló töltési és kisütési profilok kisimítása. A Π tag a következőképpen (7) írható fel:

$$\Pi = \mu \sum (P_{ch}^2 + P_{dis}^2) \quad (7)$$

ahol μ az a paraméter, amely a négyzetes büntető tag erősségét szabályozza. A paraméter értékének megfelelő beállításával a büntető tag nem befolyásolja a gazdasági teljesítményt, azonban segíti a profilok kiegyenlítését és így az akkumulátor hatékonyabb üzemeltetését. A kvadrátikus büntető tényező a lineáris optimalizálást kvadrátikus optimalizálássá alakítja. Azonban a kényszerek továbbra is lineárisok, a célfüggvény pedig konvex, a kvadrátikus optimalizálás is könnyedén megoldható a legtöbb elérhető megoldó segítségével, munkánk során a Gurobi optimalizálót használtuk.

Termikus-elektromos modell

A termikus viselkedés vizsgálatához kialakított modell a [10] forrás koncentrált paraméterű modelljének redukált változata, amelyet korábbi kísérleti adatokkal is validáltak. A redukált jelző a környezetbe történő konvektív hővesztés és a hűtőrendszer részletes modellezésének figyelmen kívül hagyására vonatkoznak. Ezek az elhanyagolások nem befolyásolják a modellezés eredményeit, amennyiben az extrém magas és alacsony hőmérsékletű rendellenes üzemállapotokat elkerüljük, ami az elemzés során fennáll. A numerikus stabilitás megőrizhető, még akkor is, ha az eredeti modellhez képest megnövekedett az időlépés, ami megkönnyíti a számítási igény csökkentését.

A termoelektromos modell legfontosabb egyenleteit a következőkben mutatjuk be, a modell részletesebb leírása pedig az [10] forrásban található meg. Szükséges meghatározni a nyitott áramköri feszültség (OCV) értékét, amit lineáris interpolációval tehetünk meg az Ah-ra vonatkoztatott töltöttségi szint (SOC_A) profil alapján. A cellaellenállás (R_{cell}) függ a töltöttségi szinttől, a cellahőmérséklettől, illetve az aktuális üzemállapottól, azaz, hogy a tárolót éppen töltjük vagy kisütjük. A cellaáramot és cellafeszültséget meghatározó összefüggések a következőképpen (8,9) írhatók fel:

$$I_{cell,\tau} = \frac{SOC_{A,\tau} - SOC_{A,\tau-1}}{\Delta \tau} \quad (8)$$

$$V_{cell} = V_{OC} + I_{cell} R_{cell} \quad (9)$$

ahol τ a termoelektromos modellben szereplő idősoros adatok indexe, $\Delta \tau$ pedig az időlépés hossza, ami ebben az esetben 1 perc. A cellaáramok, a modulszám és a cellaszám alapján a pillanatnyi töltési és kisütési teljesítmény a következőképpen (10) számolható ki:

$$P = I_{cell} V_{cell} N_{mod} N_{cells} \quad (10)$$

Az üzem során Joule-hő és reakciós hő képződik, melyeket a következő (11,12) összefüggések írják le:

$$\dot{Q}_{Joule} = \frac{(V_{cell} - V_{OC})^2}{R_{cell}} \quad (11)$$

$$\dot{Q}_{reaction} = I_{cell} T_{cell} \frac{dE}{dT_{cell}} \quad (12)$$

A környezet irányába történő hővesztés konstans -900 W-nak feltételeztük. A dE/dT_{cell} az entrópiatényező, amely negatív érték és függ az Ah-ra vetített töltöttségi szinttől. A reakciós hő értéke pozitív kisütés és negatív töltés közben. A hűtési és fűtési logikát pedig a gyártói specifikációk alapján építettük be a modellbe. A gyártó által megadott hűtési és fűtési teljesítmény modulonként -1200 W és 4300 W. A ventilátor villamos teljesítményigénye 67 W. A cellahőmérséklet változása pedig a következőképpen (13) írható fel:

$$T_{cell,\tau} = \frac{N_{cells} (Q_{Joule,\tau} + Q_{reaction,\tau}) + Q_{loss,\tau} + Q_{cooler,\tau} + Q_{heater,\tau}}{N_{cells} c_{cell} \rho_{cell} \frac{d_{cell}^2 \pi}{4} h} \Delta \tau + T_{cell,\tau-1} \quad (13)$$

ahol c_{cell} a fajlagos hőkapacitás, ρ_{cell} a cellasűrűség, d_{cell} a cellaátmérő, h pedig a hengeres cella magassága.

Fontos kihangsúlyozni, hogy a termikus-elektromos modell számításai 1 perces felbontásra vonatkoznak. Az eredeti [10] forrásban 1 másodperces a felbontás, míg a piacon 15 perces felbontás jellemző, az 1 perces felbontás pedig ideális kompromisszumnak tekinthető. Az optimalizálás során kapott 15 perces profilokat lineáris interpolációval 1 percesre alakítottuk. Ez javítja a számítások pontosságát jelentős futásidő növekedés nélkül.

A lineáris modell állandó töltési és kisütési hatásfok értékekkel dolgozik. Ez a megközelítés bár a modellezést megkönnyíti, de pontatlansággal is jár. A részletes számítások során a cellaellenállás értékek segítségével a pillanatnyi hatásfok értékek is meghatározhatók a következőképpen (14,15):

$$\eta_{ch,\tau} = \frac{(SOC_{W,\tau} - SOC_{W,\tau-1}) C_{W,nom}}{P \Delta \tau} \quad (14)$$

$$\eta_{dis,\tau} = \frac{P \Delta \tau}{(SOC_{W,\tau} - SOC_{W,\tau-1}) C_{W,nom}} \quad (15)$$

A lineáris modellben a töltöttségi szint profil Wh-ra vonatkozik, azonban a legtöbb elektrokémiai akkumulátormodellben, ahogy a NaS esetében is a töltöttségi szint Ah-ra vonatkozik. Ezért szükséges egy konverziós lépés, amelyben a cellafeszültség értékek és a kapacitások alapján a Wh-s töltöttségi szint átalakítható Ah-s töltöttségi szintre.

Felhasznált adatok és modellezési környezet

A számítások során a 2024-es év másnapi villamosenergia-piaci árai, valamint az akkumulátoros rendszer paraméterei voltak a modell bemenetei. A számításokat 6 konténerre, azaz 36 modulra végeztük el. A technológiai paramétereket az 1. táblázat tartalmazza.

A modell Python programozási nyelvben készült, az optimalizáláshoz pedig a Gurobi lineáris optimalizálót használtuk. A futásidő 1-2 perc volt annak ellenére, hogy a modell több mint 100 ezer folytonos változót tartalmaz.

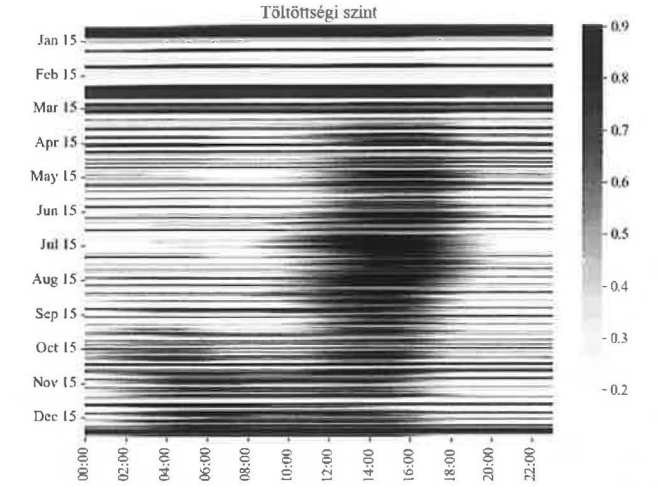
1. táblázat. A modell bemeneti paraméterei

Paraméter	Érték
Töltési és kisütési hatásfok (I_b)	90%
Optimalizálás időbeli felbontása (t)	15 perc
Maximális cellafeszültség (V_{max})	2,076 V
Minimum cellafeszültség (V_{min})	1,817 V
Cella kapacitás ($C_{A,nom}$)	725 Ah
Cellák száma egy modulban (N_{cells})	192
Modul kapacitás (C_{mod})	250 kWh
Átlagos fajhő (C_{cell})	1103,8 J/(kgK)
Átlagos cellasűrűség (ρ_{mod})	2247,1 kg/m ³
Cella átmérő (d_{cell})	0,09 m
Termikus modell időbeli felbontása (τ)	1 perc
Gyártó által meghatározott névleges hűtési hőteljesítmény (Q_{cooler})	-1200 W
Hűtőventilátor villamos teljesítményigénye (P_{fan})	67 W
Gyártó által meghatározott névleges fűtési hőteljesítmény (Q_{heater})	4300 W
Hővesztés (Q_{loss})	-900 W

Eredmények

Az eredmények bemutatását a lineáris teljesítményprofilal kezdjük, amely az 1. ábrán látható egy kiválasztott 5 napos időszakra. Mivel az akkumulátor a másnapi piacon kialakuló árkülönbségekből szerez bevétele, így annak működése nagyban függ az árak alakulásától. A tároló töltése a napközbeni órákra tehető jellemzően, amikor alacsonyabb a villamos energia ára, a kisütés pedig az esti fogyasztási csúcsokban jellemző. A degradációval járó költségek miatt az akkumulátor töltése és kisütése csak akkor gazdaságos, ha elegendően nagy az árkülönbség. Május 17-én például nem alakult ki akkora árkülönbség, ami miatt gazdaságos lett volna a hosszabb üzem.

A lineáris teljesítményáramlások mellett a másik legfontosabb kimenete a lineáris modellnek a töltöttségi szint profil, ami a 2. ábrán látható. A tároló aktivitása az év elején alacsony, hosszabb időszakok is vannak, amikor a tároló a maximális töltöttségi szinten van. Ez annak köszönhető, hogy nem alakulnak ki elegendően nagy árkülönbségek ebben az időszakban. Az év során látható az a jellemző viselkedés, hogy a töltés a napközbeni órákban történik, míg



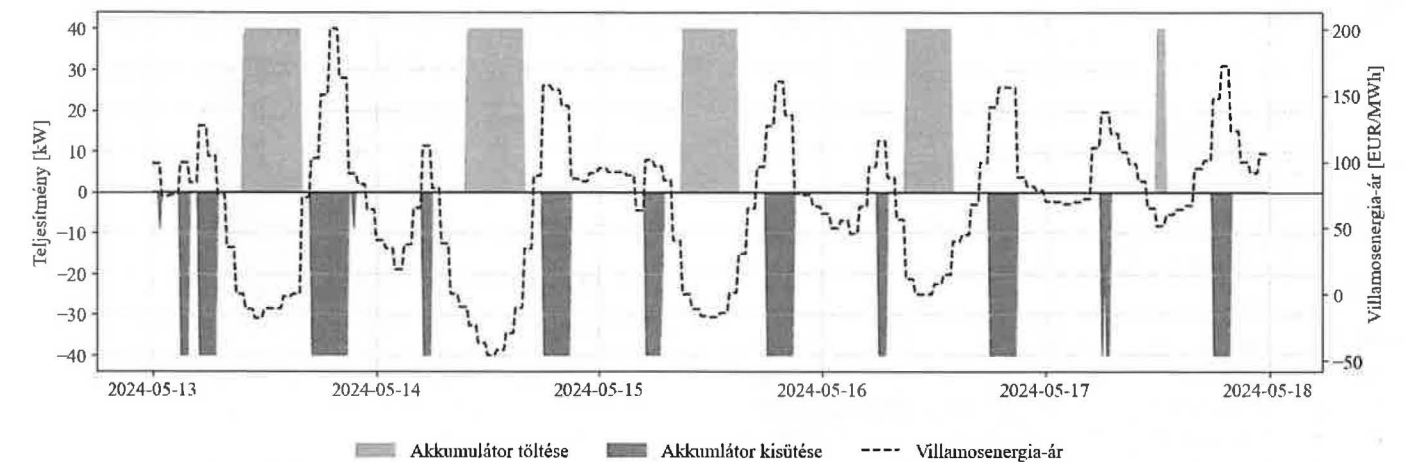
2. ábra. Töltöttségi szint profil

a kisütés főként az esti órákra tehető. Az év végén figyelhető meg még némi eltérés, hiszen itt a reggeli és esti kisütés is jellemző. Ami még az ábrán látható, hogy a tároló töltöttségi szintje 10 és 90% között változik. Ez annak tudható be, hogy a 10%-os töltöttségi szint alatt és a 90%-os töltöttségi szint felett nem álltak rendelkezésre cellaellenállás adatok.

A vizsgált éves időtartam során az egyenértékű töltési és kisütési ciklusok száma csak 141,5, ami átlagosan 0,39 ciklus naponta. A 141,5 ciklus körülbelül 5-6 Ah kapacitásvesztéshez eredményez, ami a névleges kapacitás kevesebb mint 1%-a és ami bizonyítja, hogy az elemzés során a kapacitáscsökkenés figyelmen kívül hagyása elfogadható feltételezés. Természetesen hosszabb távú elemzésekhez már a kapacitáscsökkenéssel is számolni kell. A ciklusok számát korlátozza a töltési és kisütési időszakok rövid időtartama, valamint a kialakuló árkülönbségek nagysága.

A töltöttségi szint profil alapján számolható a további paraméter is, melyek értékei a 2. táblázatban találhatók.

A cellahőmérséklet a kisütési fázisok végén jelentősen megemelkedik a kisütés során végbemenő hőfelszabadulással járó kémiai reakciók miatt. Az optimalizálás által meghatározott működés megvalósításához azonban nem elegendő a gyártó által meghatározott hűtési teljesítmény, a hőmérséklet kilépne az üzemi tartományból. A 340°C-os érték felett másodlagos reakciók léphetnek fel, amelyek a hőmérséklet extrém felfutásához és akár a cellák



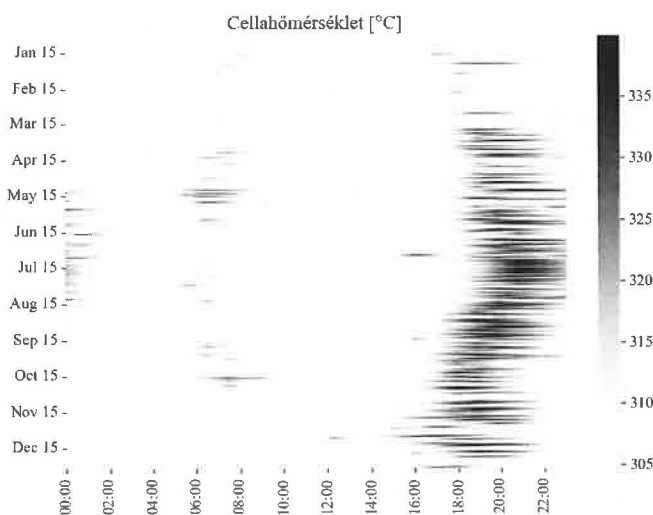
1. ábra. Villamosenergia-ár és a teljesítményáramlás alakulása egy kiválasztott öt napos időszakban

2. táblázat. A részletes modell eredményei

Paraméter	Érték
Eltárolt energia	42,71 MWh
Kisütött energia	36,41 MWh
Eltárolt energia töltöttségi szint változás alapján	39,75 MWh
Egyenértékű ciklusszám	141,5
Töltési hatásfok	93,07%
Kisütési hatásfok	91,60%
Körfolyamati hatásfok	85,26%
Maximális cellahőmérséklet	339,9 °C
Minimális cellahőmérséklet	304,7 °C
Átlagos cellahőmérséklet	307,5 °C
Hűtésre felhasznált energia	0,21 MWh
Fűtésre felhasznált energia	5,26 MWh
Hűtésre felhasznált energia részaránya	0,53%
Fűtésre felhasznált energia részaránya	13,23%

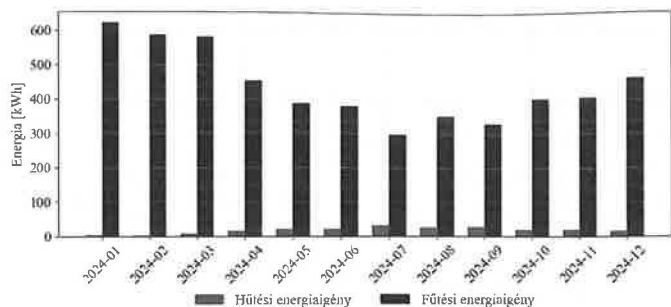
sérüléséhez vezethet, így ezt meg kell akadályozni. A gyakorlatban ez azt jelentené, hogy a gyártó által megadott névleges hűtőtéljesítmény korlátozná az akkumulátor működését és nem tenné lehetővé az optimális működést.

A hűtési és fűtési kényszerek nem építhetők be a lineáris optimalizálásba, azok nemlinearitása miatt. Azonban a modellezés során változtatható a hűtési teljesítmény értéke, így érzékenységvizsgálatot végeztünk, hogy megtaláljuk azt a minimálisan elegendő hűtőtéljesítmény értéket, amely lehetővé tenné az optimális működést. A teljesítmény duplázásával már megvalósítható az optimális üzem, így ezzel végeztük a számításokat. A cellahőmérséklet változása a 3. ábrán látható. Töltés és üresjárás közben a cellahőmérséklet közel van a minimálishoz, ezekben az üzemállapotokban jellemzően a modulok fűtése szükséges. A minimális cellahőmérséklet 304,7 °C, az átlagos 307,5 °C, a maximális érték pedig 339,9 °C.



3. ábra. Cellahőmérséklet alakulása

A hűtés és fűtés éves szinten jelentős energiafelhasználással jár, főként a fűtésnek magas a villamosenergia-igénye. A havi eloszlás a 4. ábrán látható. Az év elején magas a fűtési igény, mivel az akkumulátor aktivitása nagyon alacsony, ahogy az a 2. ábrán is látható. Az év során csökken az energiafelhasználás, a nyári hónapokban

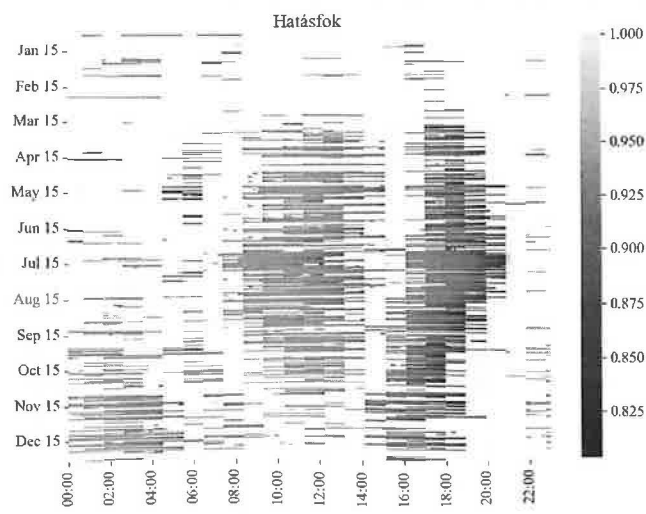


4. ábra. Hűtési és fűtési villamosenergia-igények havi eloszlása

a legalacsonyabb. Ezzel szemben a hűtés ellenkező trendet mutat, haranggörbe jelleg is megfigyelhető. Összességében elmondható, hogy a fűtés villamosenergia-fogyasztása több mint tízszerese a hűtésnek.

Fontos kihangsúlyozni, hogy ezeket a fogyasztási igényeket külső forrásból fedezzük, tekintve, hogy azok változását a lineáris modellben nem tudjuk figyelembe venni. Továbbá a hűtési és fűtési villamosenergia-igényeket a hatásfok számítása során sem vettük figyelembe. Az akkumulátor átlagos éves töltési, kisütési és körfolyamati hatásfokát az éves szinten eltárolt és kisütött energia hányadosaként határoztuk meg, annak értéke 85,26%-ra adódott. Ez több mint 4%-kal magasabb, mint az eredeti kiinduló érték. Az eltérés annak köszönhető, hogy pontosabban tudjuk számolni a felépítő veszteségeket a működés során.

Az éves átlagértékeken túlmenően az akkumulátor hatásfokát minden egyes időlépésre meghatároztuk, amikor töltés vagy kisütés történik. A számításokat a teljesítmény, valamint a töltöttségi szint értékek változásai alapján tudtuk elvégezni, amint ezeket a (14) és (15) összefüggések leírják. A pillanatnyi hatásfokértékek alakulását az 5. ábra mutatja be. A hatásfok a töltési időszak nagy részében magasnak tekinthető, a ciklus végén kezd el csökkenni az értéke. A kisütési hatásfok összességében kissé alacsonyabb, a kisütés végén pedig a pillanatnyi értékek 80% környékén találhatók. A csökkenés oka alacsony töltöttségi szint értékeknel a magasabb hőmérsékletnél bekövetkező belső ellenállás növekedés. Összességében elmondható, hogy a magas hőmérséklet negatív hatással van az akkumulátor működésére.



5. ábra. Pillanatnyi hatásfokértékek alakulása

Összefoglalás

Munkánk során egy olyan kétlépcsős módszertant fejlesztettünk ki, amely a nátrium-kén akkumulátoros rendszer működésének optimalizálását lineáris programozással végzi el, majd a kapott profilokat kombinálja egy redukált paraméterű termoelektromos modellel, így megvizsgálva az akkumulátor termikus viselkedését valós működési körülmények között. A kétlépcsős elemzésre azért van szükség, mert az akkumulátor hőtechnikai viselkedését leíró összefüggések nem lineárisok, azok a lineáris modellbe nem építhetők be. Egy 6 konténerből és 36 modulból álló önálló rendszert vizsgáltunk, amely arbitrázs tevékenységet végez a másnapi villamosenergia-piacon. Első lépésben optimalizáltuk a tároló működését lineáris programozással, ezzel meghatározva a mindenkor teljesítmény és energiaegyensúlyt. A kapott teljesítmény és töltöttségi szint profilok, valamint a gyártói specifikációk alapján pedig elvégeztük a hőtechnikai modellezést is.

Az eredmények alapján több fontos megállapítást is tehetünk. Egyrészt a gyorsan változó, volatilis piaci alapú működés megvalósításához a gyártó által specifikált hűtési teljesítmény nem elegendő, a cellahőmérséklet meghaladná a 340 °C-os felső határt. Az eredeti 1200 W-os hűtőtéljesítmény duplája már elegendő a megfelelő működéshez. Másrészt a tároló részletes modellezése elengedhetetlen ahhoz, hogy az optimalizálás által meghatározott működési profil tartható legyen. A cellaáram, feszültség és ellenállás értékek üzemállapottól függően változnak, azok ismeretével a ténylegesen leadható és felvehető teljesítmény számítható. Továbbá a hatásfok sem tekinthető konstansnak, annak értéke a cellahőmérséklettől, a töltöttségi szinttől és az aktuális üzemállapottól függően változik. A lineáris optimalizálás során használt konstans 81%-os ciklikus hatásfokhoz képest több mint 4%-kal magasabb értéket kaptunk a számítások során.

Végül pedig még fontos kihangsúlyozni, hogy a megfelelő hőmérsékleti tartományon belüli működéshez elengedhetetlen a külső temperálás. A hűtés, de főként a fűtés jelentős villamosenergia-igényt jelent, amivel számolni kell az üzemeltetés, illetve a kihasználtság során.

A nátrium-kén akkumulátor ígéretes technológia, azonban további vizsgálatok és komplexebb modellezés szükséges a megfelelő rendszerintegráció megvalósításához.

Köszönetnyilvánítás

A munka a 2021-2.1.1.-EK-2021-00002 számú projekt keretén belül a Nemzeti Kutatási Fejlesztési és Innovációs Alapból biztosított támogatással, a 2021-2.1.1.-EK pályázati program finanszírozásában valósult meg. A kutatást az MTA Fenntartható Fejlődés és Technológiák Nemzeti Program (FFT NP FTA) és a Bolyai János Kutatási Ösztöndíj támogatta.

Hivatkozásjegyzék

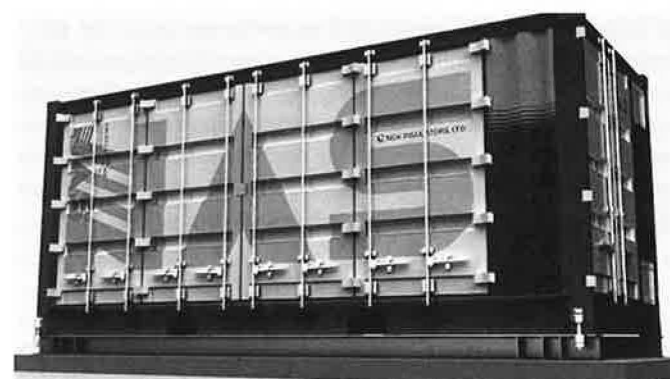
- [1] F.A. Bhuayan, A. Yazdani, Energy storage technologies for grid-connected and off-grid power system applications, 2012 IEEE Electrical Power and Energy Conference, EPEC 2012 (2012) 303–310. <https://doi.org/10.1109/EPEC.2012.6474970>.
- [2] M. Zeraati, M.E. Hamedani Golshan, J.M. Guerrero, Distributed Control of Battery Energy Storage Systems for Voltage Regulation in Distribution Networks with High PV Penetration, IEEE Trans. Smart Grid 9 (2018) 3582–3593. <https://doi.org/10.1109/TSG.2016.2636217>.
- [3] G.F. Frate, L. Ferrari, U. Desideri, Energy storage for grid-scale applications: Technology review and economic feasibility analysis,

Renew. Energy 163 (2021) 1754–1772. <https://doi.org/10.1016/J.RENENE.2020.10.070>.

- [4] M. Vins, M. Sirovy, Sodium-sulfur batteries for energy storage applications, Proceedings of the 2019 20th International Scientific Conference on Electric Power Engineering, EPE 2019 (2019). <https://doi.org/10.1109/EPE.2019.8778134>.
- [5] Y.; Liang, B.; Zhang, Y.; Shi, R.; Jiang, H. Zhang, Y. Liang, B. Zhang, Y. Shi, R. Jiang, H. Zhang, Research on Wide-Temperature Rechargeable Sodium-Sulfur Batteries: Features, Challenges and Solutions, Materials 2023, Vol. 16, Page 4263 16 (2023) 4263. <https://doi.org/10.3390/MA16124263>.
- [6] J.K. Min, C.H. Lee, Numerical study on the thermal management system of a molten sodium-sulfur battery module, J. Power Sources 210 (2012) 101–109. <https://doi.org/10.1016/J.JPOWSOUR.2012.03.028>.
- [7] S. Schaefer (Caprio), S.P. Vudata, D. Bhattacharyya, R. Turton, Transient modeling and simulation of a nonisothermal sodium-sulfur cell, J. Power Sources 453 (2020) 227849. <https://doi.org/10.1016/J.JPOWSOUR.2020.227849>.
- [8] S.P. Vudata, D. Bhattacharyya, Thermal management of a high temperature sodium sulphur battery stack, Int. J. Heat Mass Transf. 181 (2021) 122025. <https://doi.org/10.1016/J.IJHEATMASSTRANSFER.2021.122025>.
- [9] A. Bhattacharjee, H. Saha, Development of an efficient thermal management system for Vanadium Redox Flow Battery under different charge-discharge conditions, Appl. Energy 230 (2018) 1182–1192. <https://doi.org/10.1016/J.APENERGY.2018.09.056>.
- [10] D. Csemány, Coupled thermal-electrical lumped parameter modeling of high-temperature sodium-sulfur battery, J. Energy Storage 109 (2025) 115117. <https://doi.org/10.1016/J.EST.2024.115117>.



Dr. Kovács Viktória az 1. Magyar NaS akkumulátor workshopon



NaS akkumulátor konténer