



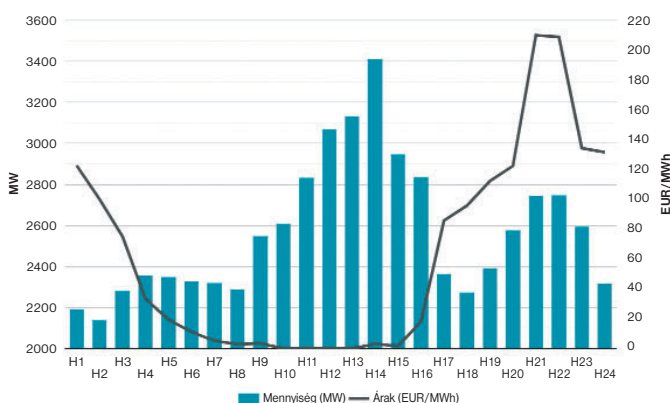
Sőrés Milán Attila – Hartmann Bálint

BME Villamos Energetika Tanszék | soresm@edu.bme.hu BME Villamos Energetika Tanszék | hartmann.balint@vik.bme.hu

Az akkumulátoros energiatárolás lehetőségei a hálózati szolgáltatások területén

Bevezetés

Az akkumulátorokat már régóta használják energia tárolására, de az elmúlt évek fejlődésének köszönhetően alkalmazási területeik egyre csak növekednek. Elég csak az elmúlt tíz évben az e-mobilitásban bekövetkezett „forradalomra” gondolni. Az akkumulátoros energiatárolás fejlődése a növekvő összteljesítményű, megújuló energiatermelő egységek támogatása miatt is létfontosságú. Ez alatt elsősorban a szélfarmokat és naperőműveket értjük, melyek esetében az akkumulátorok lehetőséget kínálnak az ingadozó terhelés kiegyenlítésére vagy a termelési csúcs levágására (*peak shaving*) és későbbi hálózatba táplálására. A villamos energia tőzsdei kereskedelme is egyre meghatározóbb. A kereskedelemre Magyarországon a HUPX magyar villamosenergia-tőzsdén van lehetőség. Az 1. ábra az itt áruba bocsátott villamos-energiamennyiséget és az egyes órákra meghatározott energiaárát (EUR/MWh) szemlélteti.



1. ábra. Villamosenergia-árak és kereskedett mennyiség a HUPX másnapi piacon 2023.07.23. [1]

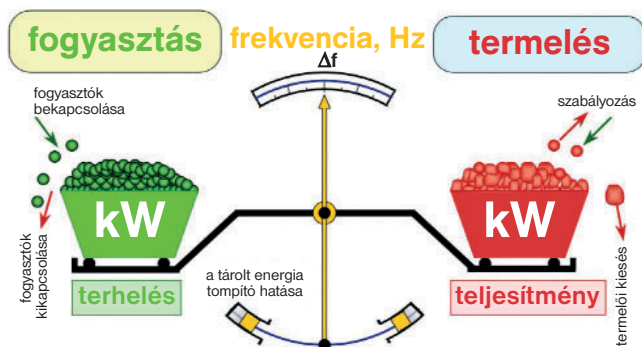
Napjainkban különösen izgalmas terület ez is, hiszen egyre gyakrabban jelennek meg olyan jellegű cikkek, amelyek negatív áramárról szólnak, azaz a vásárlónak fizetnek azért, hogy eltárolja az energiát. [2] A lakossági területen az okos fogyasztásmérőkkel rendelkezőknél ezt a „dinamikus áramfogyasztás” mérése révén próbálják bevezetni (*a rovatvezető megj.*).

Ebben a cikkben eltérő alkalmazási területről lesz szó, mégpedig a hálózati szolgáltatásokról, azokon belül is a frekvenciaszabályozásról. Az ismertető egy része talán távol esik a kémia

szűkebb területétől, mégis fontos kontextusba helyezi a ma rendkívül jelentős és sürgető akkumulátorkutatásokat.

Frekvenciaszabályozási szolgáltatások

A villamosenergia-rendszerben minden egyes időpillanatban fenn kell állnia a teljesítmény-egyensúlynak, azaz a megtermelt energiát azonnal fel is kell használni (2. ábra). Ha a termelés és a fogyasztás eltér egymástól, megváltozik a frekvencia.

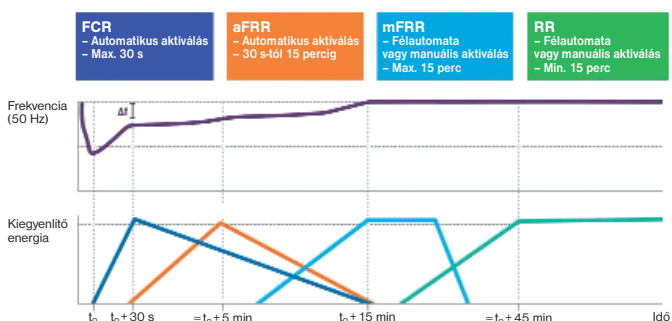


2. ábra. Teljesítmény-egyensúly a rendszerben [3]

A frekvencia 50 Hz körüli értéken tartása a rendszerirányító feladata, ez hazánkban a MAVIR.

A szabályozás érdekében a MAVIR a szabályozási piac szereplőitől veszi meg a szükséges energiát. Négy szolgáltatás keretében lehet a MAVIR számára energiát nyújtani. Ezek az FCR (*Frequency Containment Reserve*), az aFRR (*automatic Frequency Restoration Reserve*), az mFRR (*manual Frequency Restoration Reserve*) és az

3. ábra. Rendszerszintű szolgáltatások és jellemző paramétereik





RR (*Replacement Reserve*). A fő különbség közöttük az aktiválásuk időtartama, ahogy a **3. ábra** is mutatja.

Először az FCR-szabályozás lép életbe: feladata, hogy megállítsa a frekvenciaváltozást. Ennek kell a leggyorsabban működésbe lépnie, harminc másodperc alatt a teljes teljesítményt képesnek kell leadnia/felvennie. Miután a frekvencia változása megállt, az aFRR szabályozás feladata, hogy a frekvenciaeltérést megszüntesse; aktiválása harminc másodperccel az FCR aktiválása után kezdődik és öt perc alatt kell elérnie maximális teljesítményét. Ahogyan az idő halad előre és a frekvencia stabilizálódik, az FCR és aFRR szolgáltatások keretében igénybe vett teljesítmény csökkenhet, szerepüket fokozatosan az mFRR szolgáltatást nyújtó gépegyeségek veszik át. Legutoljára pedig az RR szolgáltatást nyújtó gépegyeségeket aktiválják. Minden szolgáltatásnak van belépési korlátja, azaz olyan minimális teljesítmény és energia, amennyivel be lehet lépni erre a piacra.

A fent leírtak alapján látható, hogy melyik szolgáltatások esetén jelentenek nagy előnyt az akkumulátorok. A hagyományos rendszerekben a szabályozást nagyméretű forgógépek tömegének segítségével látják el (FCR). Amennyiben ez nem elégséges (aFRR, mFRR), akkor kerülhet sor gyors indítású gázturbinás erőművek felhasználásra, melyek hatásfoka nem feltétlenül a legjobb, ráadásul folyamatosan készenlétben kell őket tartani. Velük szemben az akkumulátoros rendszerek aktiválási ideje, az az időtartam, amely alatt teljesítményük eléri a maximumát, legfeljebb néhány másodperc. További előnyt jelent, hogy az akkumulátor folyamatosan üzemkés állapotban van, ennek fenntartása nem igényel további erőforrásokat.

Az ábrán nem szerepel, de a frekvencia nemcsak kisebb lehet, mint a névleges, hanem meg is haladhatja azt, ami ugyanolyan probléma. Ebben az esetben a hagyományos erőművekkel történő szabályozásra kevesebb lehetőség van. Az FCR-szabályozás a frekvenciaeltéréssel arányosan csökkenti az erőmű szinkronmotorjának gerjesztését, ezáltal csökkentve a kiadott teljesítményt. A további szabályozási esetekben viszont már leszabályozásra van szükség, jellemzően a gőzkörfolyamat oldalán is. Az energiatárolók itt előnybe kerülnek, hiszen akadály nélkül tudnak felvenni energiát a hálózatról vagy leadni azt a hálózatba.

Az egyes szolgáltatások díjazása eltér egymástól. Az FCR szimmetrikus szolgáltatás, azaz nincs különbség az energia iránya alapján. Ebben az esetben a szolgáltatásban részt vevő egységek (erőművek, akkumulátorok) között nincs különbség, szükség esetén mindegyik egység egyszerre válik aktívá, lekötött teljesítményének megfelelően. Bevétel itt csak a rendelkezésre állásból származik, függetlenül a ténylegesen aktivált energiától. Az aFRR nem szimmetrikus szolgáltatás, azaz az energia előjelének függvényében megkülönböztetünk pozitív és negatív aFRR-t, ami a díjazásban is megjelenik. További sajátossága, hogy az aktiválása ún. „merit order”-t követ, azaz nem minden egységet aktiválnak minden egyes esetben. Ennek megfelelően a díjazás is két tételből tevődik össze. Egyrészt a rendelkezésre állási díjból, másrészt az energiadíjból, amit a ténylegesen aktivált energia alapján számolnak. Az mFRR-szolgáltatás díjazása megegyezik az aFRR-ével.

Az akkumulátor méretezése

Már a felsoroltakból is látható, hogy mind az akkumulátorrendszer méretezése, mind üzemeltetésének egyes jellemzői komplex feladatot rejtenek magukban. A jelenlegi cikk terjedelmébe nem fér bele minden kérdés részletes tárgyalása, így csak néhányukra szorítkozunk.

Az első megvizsgálendő kérdés, hogy milyen akkumulátorral nyújtjuk a szolgáltatást. Az összes elektrokémiai energiatároló technológia bemutatása szintén meghaladná a cikk kereteit, így néhány szóban bemutatjuk a napjainkban piacot uraló technológiákat, amelyeket jelenleg Magyarországon üzembe helyeznek vagy tervezik az üzembe helyezésüket.

A bevezetőben említett „forradalmat” a Li-ion-technológia tette lehetővé: mind az e-mobilitásban, mind a hálózati energiatárolók tekintetében egyelőre ez a domináns megoldás. A Li-ion-akkumulátor lényegében gyűjtőfogalom, a katódban és az anódban felhasznált aktív anyagok alapján számos változat létezik. Ezek közül a legelterjedtebb az NMC (*nikkel-mangán-kobalt*) és az LFP (*lítium-vas-foszfát*). Magyarországon is ilyen a telepített hálózati energiatárolók zöme, például Zánkán az E-ON által telepített 1,2 MWh-s rendszer és Zuglóban az ALTEO által működtetett 3,9 MWh-s tároló. Az anód aktív anyaga ma még grafit, de a kutatások egyik ígéretes iránya a szilícium hozzáadása, ezzel lehetne ugyanis növelni az energiasűrűséget, azonban egyelőre az élettartam jelentősen korlátozza a lehetőségeket. A technológia előnye a magas energiasűrűség; az NMC nagyobb fajlagos energiával rendelkezik, mint az LFP. Hátránya az elmúlt években folyamatosan csökkenő, de még ma is tetemes ára, továbbá az, hogy komplex felügyeleti elektronikát igényel.



Az Alteo tárolóegysége a Zuglói Fűtőmű területén (<https://villanyautosok.hu/>)



Energiatároló telepítése
Zánkán (eon.hu)

2022 márciusában jelentették be, hogy Sümegen VRFB (*vanádium-redox-flow-battery*) technológiájú akkumulátorrendszert terveznek telepíteni. A VRFB-technológia a folyékony elektrolitos akkumulátorok közé tartozik, különlegessége, hogy az elektrolitot külső tartályokból áramoltatják, külön a katód és külön az anód oldalán. A technológia hátránya az alacsony energiasűrűség és a kisebb hatások, előnye, hogy viszonylag olcsó és biztonságos. [4]

2023. július 24-én jelentette be a japán NGK Insulators Ltd. [5], hogy a *Tesseract Energiatároló* projekt keretében az Energiatudományi Kutatóközpont számára szállít egy nátrium-kén magas hőmérsékletű rendszert, demonstrációs célokra. [6] A technológia érdekessége, hogy működéséhez magas, 300 °C körüli hőmérsékletre van szükség. Energiasűrűsége összemérhető a lítiumion-akkumulátorokéval, teljesítménysűrűsége azonban jóval alacsonyabb. A bemutatott technológiákat az **1. táblázat** hasonlítja össze.

	NMC	LFP	VRFB	NaS
Fajlagos energia [Wh/kg]	200–250	90–160	15–25	200–240
Energiasűrűség [Wh/l]	200–735	200–620	15–70	140–300
Teljesítménysűrűség [W/l]	100–10000	100–10000	1–2	120–160
Hatásfok [%]	95	92	70	80
Élettartam [év]	5–20	5–20	5–20	10–25

1. táblázat. Akkumulátortechnológiák fontosabb paraméterei [7]

A technológiai szempontok utáni másik fontos mutató az akkumulátorok méretezése szempontjából a teljesítmény/energia arány. A nemzetközi szakirodalomban a „*P/E ratio*” elnevezést használják. Általánosságban fogalmazva megmutatja, hogy egy akkumulátorból mekkora teljesítményt tudunk kivenni az általa tárolt energiához viszonyítva. Elektromos járművek esetében $P/E \geq 2$, hibrid járműveknél nem ritka az 5 feletti szám sem. Hálózati energiátárolás esetén, és a bemutatott szolgáltatásoknál is,

$P/E \leq 1$. Ebben a tekintetben szintén a lítiumion-akkumulátoroknál van az előny, a különböző cellák P/E aránya nagyon széles tartományban változhat. Velük szemben például az nátriumkén akkumulátorok nem is nagyon léteznek 0,2 P/E aránynál nagyobb kivitelben. Ez a P/E arány közeli rokonságban van az angolul csak „C-rate”-nek hívott arányszámmal (pontosabban annak a cellára megengedhető maximumértékével), ami a töltési/kisütési áram arányát mutatja a névleges kapacitáshoz képest.

Az élettartam tekintetében az akkumulátorok jelentős fejlődésen mentek keresztül az elmúlt évtizedben. A szakirodalom és gyártói adatok alapján már általában 15–25 év között számolnak az új rendszerekkel, de még mindig elmaradnak a hagyományos erőművektől. Érdekes és környezetvédelmi szempontból nagyon fontos kérdés, hogy mi lesz az akkumulátorok sorsa élettartamuk végén. Jelenleg a hatékony újrahasonítás is igencsak kutatott terület. Az e-mobilitásból „kiöregedett” akkumulátorok számára azonban határozottan van potenciál a rendszerszintű energiátárolásban is, hiszen az igénybevételük jóval kisebb. Így egy autókban 15 évet eltöltő akkumulátor állapottól függően akár még 10 évet eltölthet hálózati tárolóként, mielőtt az újrahasonítására sor kerülne. Persze ezek a számok egyelőre erősen a becslés kategóriájába sorolhatók, hiszen az elektromos autók még csak most kezdenek igazán elterjedni. Az akkumulátorok méretezésének kérdései iránt érdeklő olvasónak ajánljuk a [8] és [9] forrásokat.

Akkumulátoros rendszerek üzemeltetése

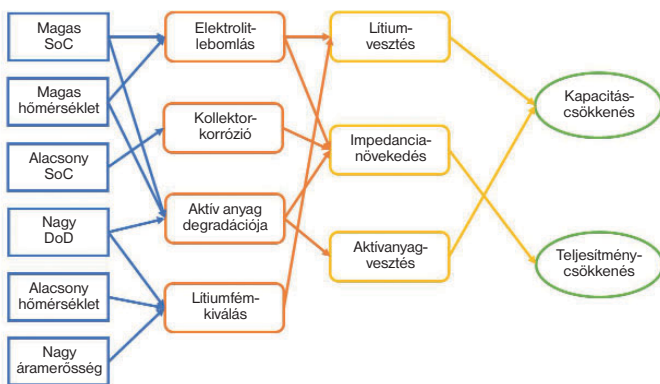
A rendszerek üzemeltetésének célja a profitmaximalizálás, lehetőség szerint minél hosszabb élettartamon. Mint a szabályozási szolgáltatásoknál szó volt róla, már a maximum sem feltétlenül határozható meg teljes bizonyossággal, inkább becsülhető az egyes események bekövetkezésének valószínűségéből kiindulva. Például az aFRR-szolgáltatásért kapott energiadíj az aktiválás mennyiségének a függvénye, amit egyrészt a frekvenciaeltérés mértéke (nagysága és időtartama), másrészt az akkumulátoros egység *merit order*ben elfoglalt pozíciója határoz meg. A *merit order* pedig az elfogadott ajánlat energiadíjának függvénye, ha



ugyanis az akkumulátorunkkal olcsóbban nyújtjuk a szolgáltatást, gyakrabban aktiválnak bennünket. Ehhez adódik hozzá a rendelkezésreállási díj, amikor nem aktiválják az egységet, azaz nem vesz fel vagy ad le energiát. Ez utóbbi természetesen alacsonyabb díjat jelent, mint az energiadíj.

A különböző szolgáltatások különböző terhelést jelentenek az akkumulátor szempontjából, eltérő mértékben csökkentve az élettartamot. Utóbbin az akkumulátorok esetében a szakirodalom általában kapacitáscsökkenést (tárolható energia mennyisége) és teljesítménycsökkenést ért. Ez utóbbi – nagyon leegyszerűsítve – a belső ellenállás növekedését jelenti, ami miatt egyre nagyobb a veszteség ezen az ellenálláson, azaz egyre kevesebb a hasznos teljesítmény. A teljesítménycsökkenés elsősorban az e-mobilitásban jelent problémát, a hálózati energiátárolásban, mint az előző fejezetben írtuk, a szükséges teljesítmény általában nem nagy a teljes energiához viszonyítva. Ezek alapján tehát az egyes szolgáltatásokkal elérhető profit mellett érdemes figyelembe venni azt is, hogy milyen mértékben csökkentik az akkumulátor várható élettartamát. Például nem biztos, hogy megfelelő stratégia, ha 20%-kal több profitot ér el, de 20%-kal gyorsabban csökken a rendszerem élettartama. Ehhez hozzá kell tenni, a jelenlegi állapotokat tükröződően, hogy a rendszer költségei még mindig meglehetősen magasak 169–229 \$/kWh. [10][11]

Az élettartam vizsgálata szintén meglehetősen bonyolult és intenzíven kutatott terület. Az elsődleges problémát az jelenti, hogy mint korábban írtuk, alapvetően két mérhető jellemző mutatja az élettartam csökkenését, míg magában az akkumulátorban ezeknek számos oka lehet. A kapacitás csökkenését általában három eltérő mögöttes okra szokás visszavezetni: a lítium mennyiségének csökkenése (LLI), az aktív anyag csökkenése a pozitív elektródon (LAM_P), az aktív anyag csökkenése a negatív elektródon (LAM_N). Itt a csökkenést nem úgy kell érteni, hogy például a lítium kikerül az akkumulátorcellából, hanem úgy, hogy nem képes többé részt venni a fő reakcióban. Ennek is több oka lehet, például az ún. SEI- (Solid Electrolyte Interface) réteg növekedése vagy a lítium egyszerűen fémként kiválik az elektróda felületén. Ezeket a folyamatokat a külső tényezők nagymértékben befolyásolják. A fenti példákat és a fontosabb folyamatokat egyszerűsített ábrán mutatjuk be (4. ábra).



4. ábra. Az akkumulátorok öregedését okozó folyamatok egyszerűsített bemutatása

A folyamatok között vannak olyanok, amelyek a használat során elkerülhetetlenek, legfeljebb a gyorsaságuk változik a külső tényezők függvényében, mint a SEI, és vannak olyanok is, melyekhez speciális feltételekre van szükség, mint a lítiumfém kiválása. Azoknak az olvasóknak, akik jobban elmélyülnének az akkumulátoröregedés témakörében, ajánljuk a [12] és [13] forrásokat.

Az említett folyamatok nagy része modellezhető, azonban a pontos eredményekhez meglehetősen bonyolult elektrokémiai modellekre, továbbá az adott akkumulátor elektrokémiai paramétereinek pontos ismeretére van szükség. Ezek általában kutatólaborokban és a gyártóknál érhetőek el, a napi üzemeltetésben többnyire nem állnak rendelkezésre. Az elektrokémiai modellezés elkerülhető például, ha nem akarjuk pontosan meghatározni, hogy egy adott terhelési mintázat hány év folyamatos üzemelést tesz lehetővé. Elegendő lehet annak a becslése, hogy a különböző szolgáltatások egymáshoz képest milyen mértékben csökkentik az akkumulátor élettartamát. Ehhez kiindulhatunk empirikus mérési eredményekből, például abból, hogy az áramerősség növekedése állandó hőmérsékleten milyen módon hat az élettartam csökkenésére. Bár az ilyen típusú modellek nem alkalmasak a nagy pontosságú élettartambecslésre, viszonylag kevés paraméter segítségével viszont gyorsan támogatják vagy előkészíthetik az akkumulátoros rendszer üzemeltetését. További előnyük, hogy rugalmasan kezelik az új szolgáltatásokat vagy az egyes szolgáltatások jellemzőiben bekövetkező változást. A szerzők az EU Horizon 2020 ONE-NET projektjének keretén belül dolgoztak ki modellt az akkumulátorok piaci üzemeltetésének támogatására. [14]

Összefoglalás

Az akkumulátoros energiátárolók elterjedésével lehetőség nyílik alkalmazásukra a hálózati szolgáltatások területén. A különböző szolgáltatások esetében bevétel a rendelkezésre állási díjból és energiadíjból származhat. Az energiadíj az aktiválás gyakoriságával és időtartamával van összefüggésben. Ahhoz, hogy maximális bevételt érjünk el, nem feltétlenül elég csak a profitot maximalizálni, érdemes az energiátároló élettartamát befolyásoló tényezőket is figyelembe venni. Ehhez különböző komplexitású modellek állnak rendelkezésre annak függvényében, hogy milyen adatokkal rendelkezünk és milyen pontosságú eredményre van szükségünk. A napi üzemeltetés tervezéséhez nem feltétlenül szükséges a legérészletesebb modell, elegendő lehet egy egyszerűbb empirikus összefüggéseket használó modell is. ●●●

IRODALOM

- [1] <https://hupx.hu/hu/>
- [2] <https://www.portfolio.hu/uzlet/20230802/hamarosan-eljohet-az-ido-amikor-megfizetnek-is-az-aramfogyasztasunkert-631137>
- [3] Ströbl Alajos: A villamosenergia-ellátás fejlődése. <https://slideplayer.hu/slide/11189972/>
- [4] Cunha Á., Martins J., Rodrigues N., Brito F. P.: Vanadium redox flow batteries: a technology review. *Int. J. Energy Res* (2014). DOI: 10.1002/er.3260
- [5] <https://www.ngk-insulators.com/en/product/nas.html>
- [6] <https://www.ek-cer.hu/en/2023/06/22/nas-battery-manufacturing-for-ek-cer/>
- [7] IRENA: Electricity Storage and Renewables: Costs and Markets to 2030. 2017. ISBN 978-92-9260-038-9. https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2017/Oct/IRENA_Electricity_Storage_Costs_2017.pdf
- [8] Y. Yoo, G. Jang, S. Jung.: A Study on Sizing of Substation for PV With Optimized Operation of BESS. *IEEE Access* (2020) 8, 214577–214585. DOI: 10.1109/ACCESS.2020.3040646.
- [9] B. Marchi, M. Pasetti, S. Zanoni: Life Cycle Cost Analysis for BESS Optimal Sizing. *Energy Procedia* (2017) 113, 127–134. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.04.034>
- [10] I.-Y. L. Hsieh, M. S. Pan, Y.-M. Chiang, W. H. Green: Learning only buys you so much: Practical limits on battery price reduction. *Applied Energy* (2019) 239, 218–224, ISSN 0306-2619, <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2019.01.138>.
- [11] Utility-Scale Battery Storage | Electricity | 2022 | ATB | NREL
- [12] M. Broussely, Ph. Biensan, F. Bonhomme, Ph. Blanchard, S. Herreyre, K. Nechev, R. J. Staniewicz: Main aging mechanisms in Li ion batteries. *Journal of Power Sources* (2005) 146, 90–96. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2005.03.172>
- [13] M. Dubarry, B. Y. Liaw, M.-S. Chen, S.-S. Chyan, K.-C. Han, W.-T. Sie, S.-H. Wu: Identifying battery aging mechanisms in large format Li ion cells. *Journal of Power Sources* (2011) 196, 3240–3245. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2010.07.029>
- [14] Sörös M. A., Hartmann B.: Prolonging battery lifetime in various energy markets. *Journal of Energy Storage*, (2022) 56, Part A, 105959. ISSN 2352-152X. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2352152X22019478>