

Horváth S. R. , Nyitrai A. , Szabó G.: Háztartási méretű lendítőkerekes energiapuffer optimális tervezése

Joe Vortex Energy & Mobility, Budapest.

info@joevortex.com

Absztrakt: A viszonylag szűkös erőforrások, leginkább ritkaföldfém vegyületek felhasználásával összeállított és nem elhanyagolható tűzvesélyességi kockázatot magában hordozó elektrokémiai-akkumulátoros rendszernek egy költséghatékony alternatíváját jelenti a széles fordulatszám-tartományban működő lendítőkerekes megoldás: töltési és kisütési szempontból is gyors reagálásra képes; teljesítmény- és energiaspektrum tekintetében rugalmasan skálázható (bővíthető); egyszerűen telepíthető és biztonságosan üzemeltethető. A lendítőkerekes energiapuffer esetében a viszonylag egyszerű és átlátható működési elv bonyolult tervezési és analízis módszerek szükségességével párosul, emiatt az elmúlt évtizedben leginkább csak a különböző lítium-ion alapú rendszereket tartották műszakilag reális megoldásnak a háztartási gyakorlatban. A Joe Vortex Energy & Mobility kutatómérnökei által kidolgozott tervezési irányelvek és szimulációs módszerek háztartási méretben is elérhetővé teszik a bekerülési- és üzemeltetési oldalról egyaránt költséghatékony és hosszú élettartamú lendítőkerekes energiátárolást.

Kulcsszavak: energiátároló; szigetüzem; rendszerszimuláció;

1. Méretezési irányelvek és megfontolások

1.1 Bevezetés

Globalizált világunk aktuális energetikai kihívásait tekintve talán minden korábbinál hangsúlyosabb szerepbe kényszerültek a villamosenergia-ellátásbiztonság körüli kérdések. Az energiahatékonyságra való törekvések miatt is megváltozott villamosenergia-fogyasztási szokások, valamint a megújuló termelőegységek rohamos terjedése és azok változó kiszámíthatósága újfent rávilágította a fényt a decentralizált energiátárolási képességek továbbfejlesztésének fontosságára. Ezen túlmenően az önellátó üzemre felkészített, netán a villamosenergia-közműhálózatról teljesen leválasztott (off-grid) épületek esetében különösen fontos az elérhető termelési lehetőségek és a felmerülő fogyasztási igények közötti fizikai és időbeli kiegyenlítés.

A különböző természeti elven működő puffer-rendszerekkel szemben az egyik legfontosabb általános elvárás, hogy a lokálisan jellemző termelési-fogyasztási szokásokhoz alkalmazkodva biztosítsák a stabil villamosenergia-szolgáltatást a külső kényszerektől való függőség (pl. időjárás változékonysága, rendszerhasználati költség, üzemszünet) minimalizálása mellett.

Az energiapuffer optimális működéséhez nemcsak a villamos forgógépet és az inerciát, hanem a frekvenciaváltós hajtást, a mechanikai erőátvitel elemeit és azok veszteségeit, valamint a hűtési- és melegedési szempontokat együttesen illeszteni szükséges. A villamos forgógép és a lendítőkerek beépítési lehetőségeitől függően horizontális vagy vertikális alapelrendezés egyaránt előfordul a gyakorlatban.

A lokális termelőegységek és a hálózati csatlakozási pont között elhelyezett elektromechanikai-elvű energiátároló működését az FPMS (Flywheel-Puffer Management System) felügyeli, magában foglalva a töltés (motoros üzem) és a kisütés (generátoros üzem) irányítását, közben tartva a folytonos üzemállapotok között kialakuló átmeneti jelenségeket.

Topológiai szempontból egy ilyen közbülső energiatároló- és menedzselő eszköz egyik legfőbb feladata, hogy a pillanatnyi fogyasztási és termelési viszonyok alapján intelligens és önműködő módon megvalósítsa a helyi teljesítmény-kiegyenlítési feladatokat, továbbá törekedjen az esetleges többlet-fogyasztás vagy többlet-termelés miatt kialakuló járulékos költségek minimalizálására.

1.2 Általános szempontok

A méretezés első lépése általában az energiapuffer áthidalóképességének pontos meghatározása, ezt követően a teljesítmény- és energiaspektrum szétcsatolása.

A belső fizikai folyamatok eredete és természete szerint az alábbi veszteségi tényezőket tudjuk megkülönböztetni:

- elektromágneses (pl. a forgógép saját réz- és vasvesztesége, szerkezeti többletveszteség, az inverteres táplálásból eredő járulékos veszteség)
- mechanikai (csapágysúrlódás az üzemi fordulatszám függvényében, figyelembe véve a horizontális / vertikális elrendezés sajátosságait)
- áramlástani (a forgó alkatrészekkel szemben fellépő közegellenállás hatása, figyelembe véve az aktív rész hűtési szükségleteit is)
- segédüzemi berendezések működtetése (pl. vákuumpumpa, érzékelő-vezérlő-aktuátor eszközök).

Az önkisülés minimalizálására tett erőfeszítés elkerülhetetlen az energiapuffer gazdaságos működtetéséhez. Belátható, hogy a rendszer eredő hatásfoka jelentősen függ a felhasznált alkatrészek egyedi és kombinált veszteségi tételeitől.

Megfelelő részletességű specifikációból kiindulva, alkalmas költséganalízist kidolgozva jelentősen visszaszorítható a hozzáadott értékkel nem rendelkező (értéktelen) tervezési tartalékok beépítése. Az ehhez szükséges komponens- és rendszerszintű vizsgálatokat az általunk implementált szimulációs keretrendszerrel tudjuk elvégezni, olyan célkitűzések mellett mint pl. a költségminimális munkapont keresése vagy épp az optimális energiaeosztás megvalósítása egy hibrid-tárolás alkalmazás esetében.

1.3 A villamos forgógép kiválasztása, hajtás illesztése

Az energiapuffer töltéséhez / kisütéséhez, aktív üzemeltetéséhez szabályozott fordulatszámú villamos forgógépet használunk. Feltöltött puffer esetén a villamos forgógép üresjárásban (árammentes tekercseléssel, az előírt fordulatszámon kialakult belső veszteségei mellett) passzívan üzemel. Az aktív üzemben részleges fordulatszámon és/vagy részleges terhelésen előálló hatásfok-térkép a felvállalható előállítási költségek mentén maximalizálandó. Hasonló szempontok érvényesek a csatolt frekvenciaváltós hajtásra. A villamos jellegű alrendszerek optimális együttműködéséhez a gép és a hajtás összehangolása feltétlenül szükséges.

A forgógépet tekintve a korszerű állandómágneses topológiák hátránya, hogy a beépített polarizáltság révén forgó állapotban az armatúratekercselésben feszültség indukálódik, az így kialakuló vasveszteség pedig megnöveli a rendszer önkisülését.

Az egyoldalról gerjesztett típusok széleskörben ismert képviselője a kalickás aszinkron gép, amely az ipari – relatíve korlátozott fordulatszám-tartományban üzemelő – alkalmazások körében

hagyományosan jól bevált megoldás. Viszont a lendítőkerekes puffer által megkövetelt széles fordulatszám-átfogásból következik, hogy a kalickarudak radiális megtámasztását szolgáló féligzárt vagy zárt hornyok csak egy bizonyos centrifugális igénybevételig képesek ellátni feladatukat.

Koncepcionális szempontból a tisztán reluktancia elvű szinkron gépet (SynRM) alábbi tulajdonságai hozzák nem elhanyagolható előnybe egyéb típussal szemben:

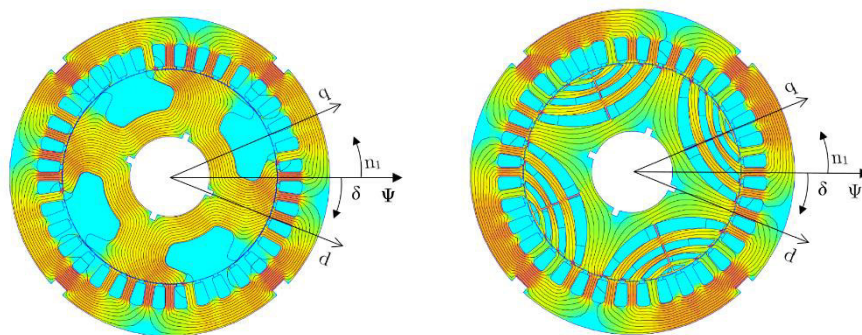
- a forgórészen rézvesztés nem keletkezik – kedvezőbb hűtési feltételek
- üresjárásban nincs vasvesztés – minimalizált önkisülés
- viszonylag alacsony tengelyhőmérséklet – hosszabb csapógyélettartam
- a ritkaföldfém mágnesektől mentes forgórész – magas hőtolerancia
- mezőgyengítéshez nem igényel többletáramot – széles fordulatszám-átfogás többmelegedés nélkül valósítható meg
- eltűnik a melegező kalicka inerciaja – csak a forgásból származik mechanikai terhelés, a réz kilágyulási problematikájától mentesülünk
- nem igényel stratégiai fontosságú nyersanyagot – fenntartható és elérhető.

2. Lendkerekes energiatárolók gépközei jellemzői

2.1 Szerkezeti kialakítás a villamosgép topológiához illesztve

A lendkerekes energiatárolók mechanikailag olyan szerkezetek, ahol a forgó rendszer elegendő forgási energiát tud tárolni ahhoz, hogy a veszteségek mellett a tárolt mechanikai energia villamos energiává alakítása adott időn belül gazdaságos lehessen [1], [2].

A berendezések fő szerkezeti kialakítására alapvetően két lehetőség adódik. Egyik esetben a villamos forgógép úgy kerül kialakításra, hogy annak forgórésze megfelelő tehetetlenségi nyomatékkal rendelkezzen, hogy az üzemi fordulatszám-tartományban a kívánt forgási energiát tárolni tudja. A szinkron reluktancia géptípus megvalósítható forgórész-változatait az 1. ábra szemlélteti.



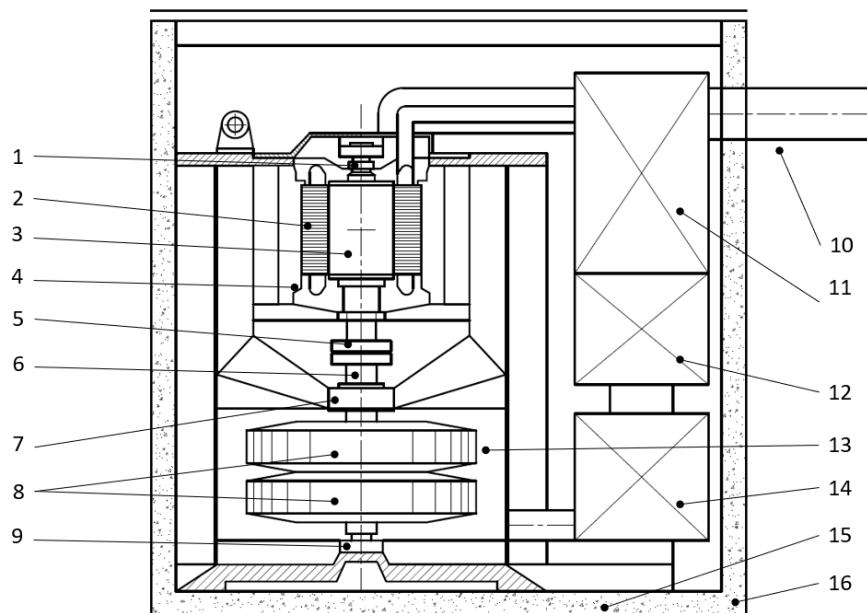
1. ábra

Inercia-optimalis SynRM forgórészek: egyszerű kiálló pólusú (balra) ; transzverzálisan laminált

A topológiák elektromágneses modellezéséhez és részletes kiértékeléséhez rugalmasan paraméterezhető, nagymértékben automatizált 2D térszámítási módszereket dolgoztunk ki, elősegítve az inercia-optimalis forgórészek tervezését.

Az energia- és teljesítményspektrum szétcsatolása révén a villamos forgógépet elegendő a kívánt névleges teljesítményhez tartozó forgatónyomatékra méretezni, figyelembe véve, hogy a kisütési (alsó) fordulatszám-határon is teljesüljenek a névlegesített igények.

Szerkezeti oldalról a másik lehetőség, hogy a villamos forgógép tengelyét egy külső lendkerékkel (vagy lendkerék-csoporttal) kapcsoljuk össze. Utóbbi kialakítás modulárisabb összeállítást tesz lehetővé, ezért a rendszer felépítése, tipizálása, illetve illesztése különböző követelményrendszerekhez egyszerűbb. Az említett külső inerciás elrendezésre látható egy példa a 2. ábrán.



2. ábra

Moduláris lendkerékes energiatároló szerkezeti felépítése (1: forgórész csapágyazás, 2: állórész, 3: forgórész, 4: állórész ház, 5: tengelykapcsoló, 6: tengely, 7: lendkerék felső csapágyazás, 8: lendkerekek, 9: lendkerék alsó csapágyazás).

2.2 Csapágyazás és önkisülés összefüggései

Az energiatároló csapágyazása a szerkezet kulcsfontosságú eleme, mivel kialakítása meghatározza a szerkezet maximális fordulatszámát, a forgórész, illetve lendkerék mechanikai jellemzőit, továbbá a súrlódási tényezője által a berendezés hatásfokára és önkisülésére is döntő befolyással van [3]. A lendkerékes energiatároló berendezések csapágyazása lehet hagyományos gördülőelemes, illetve egyszerű elektromágneses kialakítású (passzív és aktív).

Nagyobb hatásfokú rendszerek szupravezetős mágneses csapágyakat alkalmaznak. Az elektromágneses csapágyazások esetében a súrlódási együttható természetesen egyenértékű számítás eredménye, amely tartalmazza az elektromágneses csapágy típusától függő üzemi veszteségeket is. A költségek szempontjából a hagyományos gördülőelemes megoldás az elektromágneses csapágyazásokhoz képest elérhetőbb. További előnye gördülőelemes csapágyazásnak a nagyobb merevség és teherhordó képesség. Hátránya a nagyobb súrlódási veszteség, ami az energiatároló önkisülését növeli [1], [4]. Az egyenértékű súrlódási együttható a

mágneses csapágyaknál a gördülőelemes csapágyakhoz képest körülbelül egy nagyságrenddel kisebb, szupravezetős rendszereknél pedig a különbség több nagyságrend.

A következő táblázat a rendszeroptimalizálás során alkalmazandó mechanikai / szerkezeti változókat foglalja össze:

1. Táblázat
Mechanikai / szerkezeti változók

Csoport	Változók	Hatás
Forgórész geometria	Átmérő, hossz	Rendszerparaméterek, szilárdság
Lendkerék geometria	Átmérő, hossz	Rendszerparaméterek, szilárdság
Anyagjellemzők	Szilárdsági jellemzők, sűrűség	Rendszerparaméterek, szilárdság
Csapágyazás	Típus, paraméterek	Költségfüggvény, rendszerparaméterek
Kiegészítő berendezések	Csapágyazás függvényében	Költségfüggvény, rendszerparaméterek

2.3 Esettanulmány

Integrált szerkezetű, közvetlen hajtású (áttétel nélküli) esettanulmányunk keretében előállított főméreteket alább foglaltuk össze [5] számítási módszere alapján.

2. Táblázat
Háztartási méretű (10 kWh kapacitású) lendítőkerekes energiapuffer főbb jellemzői

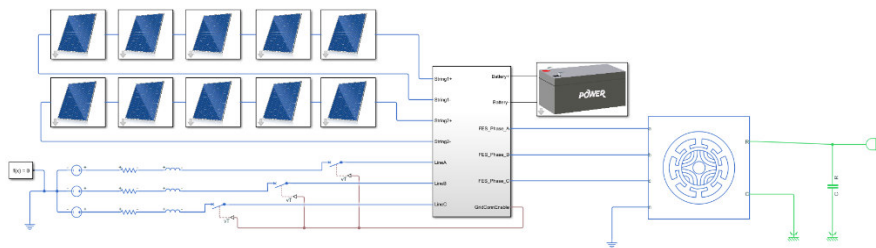
Data	Symbol	Value	Unit
Flywheel Storage Capacity	C_{fw}	10000	[Wh]
Effective Inertia MR^2	Θ_{eff}	3.04	[kgm ²]
Quadratic Speed Range	$\Omega_{max}^2 - \Omega_{min}^2$	23681842	[rad ² /s ²]
Maximum Speed	n_{max}	49000	[1/min]
Minimum Speed	n_{min}	15539	[1/min]
Depth of Discharge	DoD	0.90	[-]
Outer Diameter of Rotor Core	ROD	325.0	[mm]
Inner Diameter of Rotor Core	RID	115.0	[mm]
Length of Rotor Core	L_{RC}	452	[mm]
Weight of Rotor Core	mRC	251	[kg]

3. Dinamikus rendszermodell implementálása

3.1 Szimulációs célkitűzés

A rendszer vizsgálatához egy MATLAB Simulink modellt hoztunk létre, amelyet az alábbi főbb szimulációs komponensekre bonthatjuk fel:

- Napelem modulok,
- Feszültséginverter,
- Akkumulátor rendszer,
- Lendkerekkes energiatároló,
- Hálózat,
- Magas szintű szabályozó logika (FPMS).



3. ábra

Lendkerekkes energiatárolórendszer szimulációs modellje

3.2 Napelem cellák modellezése

A napelem alrendszer modelljének alapját a szakirodalomban részletezett két diódás helyettesítőkép szolgáltatta [1], [2], amelyet a 4. ábra szemléltet. A cella kimenő áramát a következő egyenlet segítségével modelleztük,

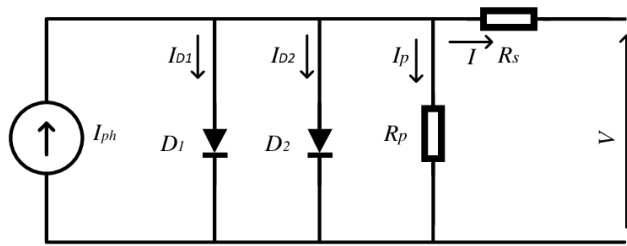
$$I = I_{ph} - I_{D1} \left(e^{\left(\frac{V + IR_s}{N_1 V_t} \right)} - 1 \right) - I_{D2} \left(e^{\left(\frac{V + IR_s}{N_2 V_t} \right)} - 1 \right) - \left(\frac{V + IR_s}{R_p} \right), \quad (1)$$

ahol a besugárzás függő cella áram

$$I_{ph} = I_{ph0} \frac{I_r}{I_{r0}}, \quad (2)$$

ahol I_r a besugárzás nagysága, I_{r0} a cellára vonatkozó névleges besugárzási érték,

I_{D1} az első diódára vonatkozó szaturációs áram, I_{D2} a második diódára vonatkozó szaturációs áram, V_t a termikus feszültség, N_1 az első dióda jósági tényezője, N_2 az második dióda jósági tényezője V a cellafeszültség.



4. ábra

Napcella helyettesítő képe

A rendszer paramétereit meghatározhatjuk az adatlapban közölt értékeket felhasználva, különböző numerikus iterációkat alkalmazva [3],[4]. Ezek mindegyike általában Newton-Rapson vagy egyéb numerikus approximációs algoritmust alkalmaz.

3.2 Feszültséginverter modellezése

A modell egy kétszintű feszültséginvertert valósított meg, amely közélső egyenáramú köre vagy az akkumulátor telepről, vagy a napelem cellákról üzemelt. Az egyes üzemállapotok közötti átváltást és az optimális energiatárolás megvalósítását a magasszintű szabályozási logika kezelte.

3.3 Akkumulátor rendszer modellezése

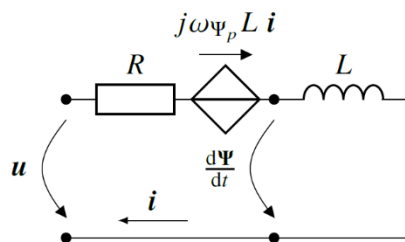
A modell első verziója egy savas-ólom akkumulátor rendszert feltételez. A telep kapocsfeszültségét a következő egyenlet írja le,

$$V_{bat} = V_0 \left(\frac{SOC}{1 - \beta(1 - SOC)} \right), \quad (3)$$

ahol SOC az akkumulátor telep aktuális töltöttségi állapota, β az akkumulátor telep jellemző paramétere.

3.4 Lendkerekes energiatároló

A vizsgált rendszer egy szinkron reluktancia gépet feltételez, amely helyettesítő képét a 3. ábra szemléltet. A rendszert pólusfluxus orientált koordináta-rendszerben a (4)-(7) egyenletrendszer írja le [6].



5. ábra

Szinkron reluktancia gép helyettesítő képe

$$u_d = R i_d + L_d \frac{di_d}{dt} - \omega_e L_q i_q, \quad (4)$$

$$u_q = R i_q + L_q \frac{di_q}{dt} + \omega_e L_d i_d, \quad (5)$$

$$m = \frac{3}{2}p \left((L_d - L_q)i_d i_q \right), \quad (6)$$

$$\Theta \frac{d\omega}{dt} = m - m_l - F\omega, \quad (7)$$

ahol u_d és u_q a kapocsfeszültség vektor valós és képzetes része, R a státor ellenállás, i_d és i_q az áramvektor valós és képzetes része, L_d d -irányú induktivitás, L_q q -irányú induktivitás, m a forgógép elektromágneses nyomatéka, m_l a terhelőnyomaték, Θ a rotor inerciája, F a súrlódási veszteség, p a póluspárok száma, ω mechanika fordulatszám, ω_e az elektromos fordulatszám, ahol $\omega_e = p\omega$.

3.5 Hálózat modellezése, magasszintű szabályozási logika

A rendszermodell a hálózatot távoli generátor és mögöttes induktivitás és ellenállást feltételezve modellezte. A távoli generátorok csillagkapcsolásúak.

A magasszintű szabályozási logika feladata a beállított rendszer paraméterek alapján a szétosztott energiatárolás megvalósítása az egyes energiatároló elemek között. Segítségével a rendszer hatásfokát, méretezési kérdéseket, valamint megtérülés időket becsülhetünk. A telepítés helyére becsült termelési előrejelzést az EU Bizottság rendszeréből szereztük be [7].

Összefoglalás

A gazdasági igényeket és műszaki lehetőségeket felismerve a Joe Vortex Energy and Mobility kutatómérnökei olyan komponens- és rendszerszintű szimulációs modelleket dolgoztak ki, amelyek rugalmasan paramétereizhető formában támogatják a lendítőkerekes energiapuffer tervezésének minden lépését. Ezáltal jelentősen felgyorsítható mind a konzultációs és ajánlatadási tevékenység, mind pedig a kivitelezéshez szükséges részlettervek kidolgozásának szakasza.

A háztartási méretben előforduló igények kiszolgálására a csúcsteljesítmény, a pufferekapacitás és a rendelkezésre álló beépítési térfogat (kubátúra) figyelembevételével integrált vagy külső inerciás megoldások alkalmazhatók.

Az energiapuffer önkisülésének (belső veszteségeinek) minimalizálása és a robusztus forgórész-konstrukció érdekében a villamosgép oldaláról a korszerű szinkron reluktancia topológiákat célszerű előtérbe helyezni.

Referenciák

- [1] Mousavi G SM, Faraji F, Majazi A, Al-Haddad K. A comprehensive review of Flywheel Energy Storage System technology. *Renew Sustain Energy Rev.* 2017;67:477–90.
- [2] Amiryar ME, Pullen KR. A review of flywheel energy storage system technologies and their applications. *Appl Sci.* 2017;7(3).
- [3] Arani AAK, Karami H, Gharehpetian GB, Hejazi MSA. Review of Flywheel Energy Storage Systems structures and applications in power systems and microgrids. *Renew Sustain Energy Rev* [Internet]. 2017;69(November 2016):9–18. Available from: <http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2016.11.166>

- [4] Olabi AG, Wilberforce T, Abdelkareem MA, Ramadan M. Critical review of flywheel energy storage system. *Energies*. 2021;14(8):1–33.
- [5] Aydin K., Aydemir M. T., Sizing design and implementation of a flywheel energy storage system for space applications, *Turk J Elec Eng & Comp Sci*, doi:10.3906/elk-1306-206, 24: 793-806.
- [6] R. W. De Doncker, D. W. Pulle, and A. Veltman, *Advanced electrical drives: analysis, modeling, control*. Springer Nature, 2020.
- [7] Photovoltaic Geographical Information System:
https://re.jrc.ec.europa.eu/pvg_tools/en/tools.html?fbclid=IwAR2pcZEj-J-RUmAgKxLfpUuTbQmRTWCO3xCP6XKmD3sIJdAImQzKk0xB-Ys