
Tepelný model energetického úložiska s batériami druhej životnosti

Richard Žilka, Ing.*

ENERGO – AQUA a.s.,
Biskupická 7051, 911 01 Trenčín, Slovenská republika.
E-mail: richard.zilka@energoaqua.sk

Ondrej Krško, Mgr., PhD.

ENERGO – AQUA a.s.,
Biskupická 7051, 911 01 Trenčín, Slovenská Republika.
E-mail: ondrej.krsko@energoaqua.sk

Martin Liška, Ing. , PhD.

ENERGO – AQUA a.s.,
Biskupická 7051, 911 01 Trenčín, Slovenská republika.
E-mail: martin.liska@energoaqua.sk

Stanislav Louvar, Ing.

EnergyCloud, a.s.,
Studená 50, 323 00 Plzeň, Česká republika.
E-mail: louvar@energycloud.cz

Jakub Novotný, Ing.

EnergyCloud, a.s.,
Studená 50, 323 00 Plzeň, Česká republika.
E-mail: novotny@energycloud.cz

Thermal model of the Second-life Battery Energy Storage Systems as a building block for digital twin

Abstract: A *Second-life Battery Storage Systems* are a promising direction of how to optimize costs in modern smart grids. although they may help to reduce costs, they represent very sensitive components which imposes a high demand on their design and control. A promising direction is so called "*digital twin*" approach where particular sub-systems are designed and optimized in a simulations or co-simulations without the need to invest in to the real hardware. Such mathematical models are usually quite complex due to highly nonlinear nature of the system and they require a high degree of understanding of the problem to successfully implement them. In this paper we deal with the design of thermal mathematical description of the battery storage system as a building block of the overall mathematical model. Specifically, we focus on simple implementation and low complexity while achieving sufficient precision of the model. Proposed model was verified in simulations using real measured data.

Keywords: thermal model, digital twin, second-life battery energy storage, *Python*.

ÚVOD

Moderné energetické systémy sa čoraz viac orientujú na decentralizované elektrické siete a s tým sa objavuje nový trend - *mikrosiete*, známe aj ako *MicroGrids*. Tieto mikrosiete sú malé, autonómne energetické systémy, ktoré môžu byť prepojené s hlavnou elektrickou sieťou alebo fungovať nezávisle. V tejto novej ére zohráva kľúčovú úlohu používanie batérií druhej životnosti (*Second Life Batteries*) v rámci tzv. *SLBESS* (*Second Life Battery Energy*

Storage System). Je to fáza životného cyklu batérie, ktorá nastáva po jej prvom použití, napr. v elektrických vozidlách. *Lítium-iónové* batérie, pôvodne určené pre elektrické vozidlá, sa teraz používajú v kontexte *SLBESS*, kde slúžia na uskladnenie energie. Táto transformácia batérií do druhej fázy životného cyklu predstavuje inovatívny prístup k udržateľnému využívaniu zdrojov.

Batérie, ktoré už neposkytujú dostatok energie na pohon vozidiel, môžu stále účinne slúžiť ako

zásobníky energie pre mikrosiete a iné decentralizované energetické systémy [1]. Zohľadnenie druhej životnosti batériových článkov minimalizuje vplyv na životné prostredie a zároveň optimalizuje celkovú nákladovú efektívnosť [2-5]. Táto inovácia prináša výhody tak pre energetický sektor, ako aj environmentálnu udržateľnosť a umožňuje predĺženie používania batérií v novom kontexte energetických výziev 21. storočia [6].

1 ANALÝZA PROBLEMATIKY

Moderný energetický priemysel kladie dôraz na používanie *litium-iónových* batérií, kľúčových komponentov, ktoré zohrávajú významnú úlohu v celkových nákladoch. Na efektívne využívanie týchto batérií je nevyhnutné vyvinúť spoľahlivé matematické modely, ktoré umožnia simuláciu a optimalizáciu systémov. Vývoj počítačového hardvéru otvára možnosť vytvárania digitálnych dvojčiat systémov, čo umožňuje prijímať rozhodnutia o návrhu a riadení bez potreby fyzického systému.

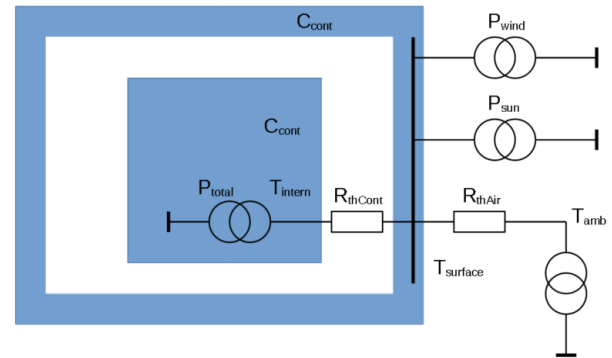
Matematický model systému skladovania energie z batérií druhého života (*SLBESS*) je silne nelineárny, čo si vyžaduje kompromis medzi zložitou a presnosťou [7]. V tomto článku sa prezentuje myšlienka návrhu stavebných blokov matematického modelu s dôrazom na tepelný model ako kľúčový prvok digitálneho dvojčata *SLBESS*. Na presné riešenie tepelného správania batérií sa navrhuje použitie metódy konečných prvkov (*FEM* analýza) [8].

Článok sa zameriava na implementáciu tepelného modelu vrátane vnútorných strát spôsobených meničmi, chladením a samotnými batériami. Model zohľadňuje vonkajšie vplyvy, ako je teplota okolia a slnečné žiarenie. V závere článku sa uvádza overenie návrhu pomocou simulácie s využitím reálnych meteorologických údajov.

2 POPIS MATEMATICKÉHO MODELU

Tepelný model kontajnerového batériového úložiska v tejto štúdii používa analytickú metódu výpočtu. Náhradný teplotný diagram je znázornený na obr. 1. [9]. V kapitole sú podrobnejšie opísané jednotlivé komponenty tohto modelu. Matematický model možno rozdeliť na dve hlavné časti. Vnútrná časť tepelného systému zahŕňa všetky vnútorné zariadenia, ako sú batérie, meniče a kovové držiaky. Táto časť akumuluje energiu prostredníctvom svojej mernej tepelnej kapacity, a tým ovplyvňuje zmeny vnútornej teploty zásobníka. Druhou časťou je vonkajší skelet kontajnera, ktorý má vlastnú tepelnú kapacitu. Tento skelet je ovplyvňovaný teplotou okolia kontajnera prostredníctvom tepelnej vodivosti, slnečného žiarenia a atmosférických vplyvov, ako je vietor a jeho rýchlosť. Tieto výkonové faktory budú navonok ovplyvňovať teplotu kontajnera a meniť ju

prostredníctvom jeho mernej tepelnej kapacity. Táto teplota kontajnera zas ovplyvní vnútornú časť, pôsobením tepelného výkonu na jej prostredie. Tento vonkajší vplyv sa zohľadňuje pri analýze vnútornej časti, kde sa ďalej používa na výpočet potrebného chladiaceho výkonu na klimatizáciu vnútorného priestoru kontajnera.



Obr. 1. Náhradná teplotná schéma

2.1 Výpočet vnútornej teploty kontajnera

Výpočet vnútornej teploty kontajnera je pomocou nasledujúcej rovnice (1):

$$T_{intern(k)} = T_{intern(k-1)} + \left(\frac{P_{total} \cdot \Delta t}{m_{case} \cdot c_{intern}} \right), \quad (1)$$

kde Δt je krok simulácie,

m_{case} je hmotnosť skeletu kontajnera,

c_{intern} je vnútorná tepelná kapacita, ktorá závisí od vnútorného zariadenia a je určená ako odhad strednej hodnoty všetkých vnútorných komponentov batériového úložiska. V našom prípade bola vypočítaná hodnota $640 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ za predpokladu, že je vnútorná časť úložiska zložená takto: *Fe* 24 %, *Cu* 5 %, *Al* 1 %, *Li-Ion* 70 %,

P_{total} sú celkové straty a sú definované ako:

$$P_{total} = P_{loss} + P_{cool} + P_{cont}, \quad (2)$$

kde P_{loss} je stratový výkon všetkých vnútorných modulov a je definovaný ako:

$$P_{loss} = \sum P_{ACDCLSS} + \sum P_{DCDCLSS} + \sum P_{BMSLSS} + \sum P_{BatLSS} + \sum P_{ClimaLSS} + \sum P_{OtLSS}, \quad (3)$$

kde $\sum P_{ACDCLSS}$ je suma strát *AC/DC* meničov,

$\sum P_{DCDCLSS}$ je suma strát *DC/DC* meničov,

$\sum P_{BMSLSS}$ je suma strát *BMS*,

$\sum P_{BatLSS}$ je suma strát batérií,

$\sum P_{ClimaLSS}$ je stratový výkon klimatizácie (vlastné straty, vlastná spotreba),

$\sum P_{OtLSS}$ sú ostatné straty (*HMI*, *LAN*, *PC*, *Alarm*, osvetlenie).

P_{cool} je chladiaci výkon klimatizačnej jednotky, ktorá musí byť dimenzovaná tak, aby i pri najväčších stratových výkonoch a najteplejšom počasí a vetru, teda najväčšom ohreve kontajnera zvonku, zvládla udržať vnútornú teplotu na požadovanej úrovni a dokázala regulovať všetky vnútorné prechodové teplotné deje,

P_{cont} je výkonový podiel, ktorý sa prenáša z vonkajšieho prostredia cez tepelný odpor na vnútornú časť kontajnera. Je definovaný podľa rovnice (4):

$$P_{cont} = \frac{(T_{surf} - T_{intern}) \cdot \lambda_{cont} \cdot S_{cont}}{d_{is}}, \quad (4)$$

kde T_{surf} je vonkajšia povrchová teplota,

λ_{cont} je tepelná vodivosť izolácie stien,

S_{cont} je vnútorná plocha povrchu kontajnera,

d_{is} je hrúbka steny kontajnera.

2.2 Výpočet teploty povrchu kontajnera

T_{surf} je ekvivalentná povrchová teplota alebo priemer všetkých miestnych povrchových teplôt. Ak by sme chceli vypočítať miestne teploty každého povrchu zvlášť, museli by sme problém rozdeliť na všetkých šesť rôznych stien a vypočítať každú stenu zvlášť. Náš zjednodušený model predstavuje súčet všetkých teplotných rozdielov medzi všetkými stenami. Výpočet povrchovej teploty je daný rovnicou (5).

$$T_{surf(k)} = T_{surf(k-1)} + \frac{(P_{sun} + P_{wind} + P_{cont} + P_{amb}) \cdot \Delta t}{m_{case} \cdot c_{case}}, \quad (5)$$

kde c_{case} je tepelná kapacita kontajnerovej steny,

m_{case} je hmotnosť skeletu, ktorá je 2300 kg v prípade 20 ft kontajnera a 3750 kg v prípade 40 ft kontajnera.

Výkon vyžiarovaný slnkom je označený ako P_{sun} . P_{sun} závisí od viacerých aspektov, ako je plocha kontajnera, natočenie kontajnera, poloha alebo tienenie okolitými objektami. Výpočet vychádza z normy [10]. Vonkajší vietor ovplyvňuje tepelnú vodivosť kontajnera a je kľúčovým faktorom pri simulácii. Vplyv poveternostných podmienok možno uplatniť rovnakým spôsobom ako v prípade nízkopodlažných budov, s parametrami ako je povrch, drsnosť, vlhkosť, tvar a orientácia voči vetru. Rozdielne účinky vetra môžu nastať napríklad vtedy, ak je časť kontajnera na záveternej strane a časť na náveternej strane. Pre najbežnejší scenár je zahrnutý zjednodušený výpočet, keď je kontajner postavený z polovice na záveternej strane a z polovice na náveternej strane.

P_{wind} je príspevok výkonu z vetra a jeho výpočet je daný rovnicou (6). Tu nie je daná len rýchlosť vetra, ale pri výpočte celkového výkonu zohrávajú dôležitú úlohu aj ďalšie aspekty, ako je smer vetra a vlhkosť.

Používame metodiku inšpirovanú štandardnými výpočtovými technikami používanými v praxi pri simulácii nízkopodlažných budov, ktorá je k dispozícii v [10]. Uvedené javy sa teda odrážajú prostredníctvom tzv. premennej tepelnej vodivosti h_c ako:

$$P_{wind} = h_c \cdot S_{cont} \cdot (T_{surf} - T_{ambient}), \quad (6)$$

$$h_c = 1,21 \cdot V_s + 3,35, \quad (7)$$

kde V_s je rýchlosť vetra v 10 m výške,

T_{amb} je teplota vzduchu.

Teplotný spád $T_{amb} - T_{surf}$ chladí, alebo ohrieva vnútorný objem kontajneru výkonom P_{amb} :

$$P_{amb} = S_{cont} \cdot (T_{surf} - T_{amb}) \cdot U_{ext}, \quad (8)$$

kde U_{ext} je vonkajší tepelný odpor ($0,04 \text{ m}^2 \cdot \text{K} \cdot \text{W}$) [11].

3 SIMULAČNÁ ŠTÚDIA

Na overenie navrhnutého matematického modelu bola navrhnutá simulácia. Na simuláciu sa použili reálne meteorologické údaje z konkrétnej lokality GPS a vygenerovali sa tzv. "typické experimentálne dáta" (smer vetra, intenzita slnečného žiarenia atď.). Simulácia bola implementovaná v jazyku Python a pre tento článok sme vybrali prípad s parametrami uvedenými v tab. 1. Lokalita kontajnera sa nachádza v horských podmienkach. Riadenie SLBESS je zamerané na optimalizáciu zisku zo skladovania lacnej energie (napr. zo Slnka) a jej poskytovania v čase dopytu.

Tab. 1. Parametre simulácie

Rozmery kontajnera	20 ft; 2,6 x 2,4 x 6 m
Izolácia steny	100 mm $\lambda_{isol} = 0,045$
Nominálny výkon AC meniča	150 kW
Nominálny výkon DC meniča	10 x 50 kW
Chladiaci výkon klimatizácie	20 kW
Kapacita batérií	312 kWh
Hmotnosť skeletu kontajnera	2,3 t
Celková hmotnosť	8,3 t

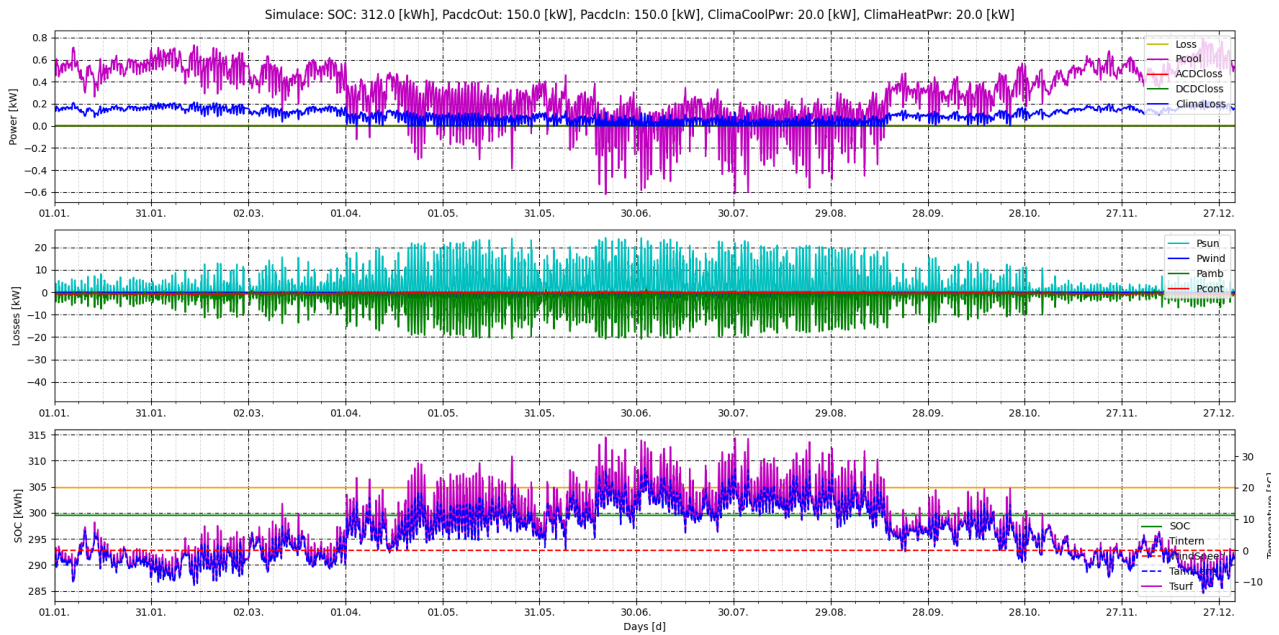
3.1 Beh naprázdno

Hlavným účelom tejto teplotnej simulácie je určiť veľkosť chladiaceho výkonu. Cieľom simulácie nie je poznať presné bodové teploty najviac exponovaných častí povrchu zásobníka. Prevádzka v stave nečinnosti znamená, že kontajner pracuje bez napájania, jeho rozptyl energie predstavuje len vlastnú spotrebu klimatizačné zariadenia. Klimatizačné zariadenie udržiava teplotu v interiéri na 20°C. Počiatočné podmienky sú všetky vnútorné teploty a vonkajšia

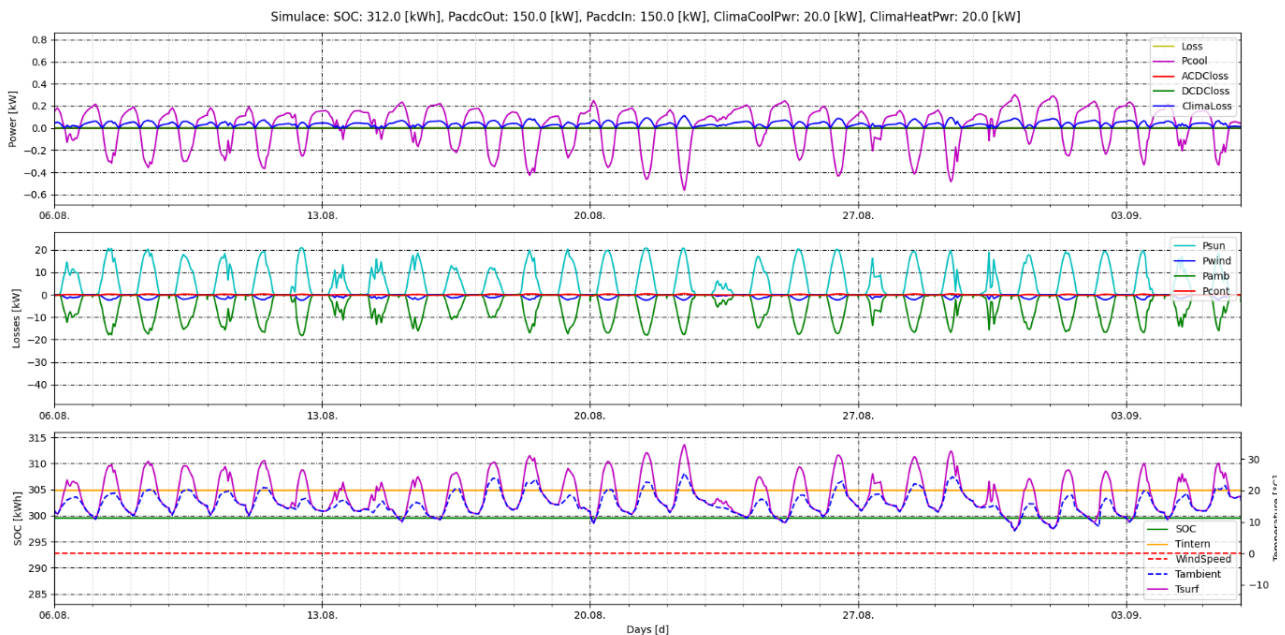
teplota 20°C. Výsledkom simulácie je zistenie množstva chladiacej energie vo vnútri kontajnera.

Na obr. 2 je znázornený výstupný graf simulácie chodu naprázdno počas jedného roka. Opis

Kladná hodnota predstavuje ohrev a záporná hodnota predstavuje chladenie. Fialová čiara na tretej strane grafe predstavuje povrchovú teplotu T_{surf} a modrá čiara teplotu okolí T_{amb} . Výsledná spotreba sa



Obr. 2. Výsledky simulácie pre „Typický rok - naprázdno“. Horný: žltá - P_{loss} , fialová - P_{cool} , červená - P_{AC-DC_loss} , zelená - P_{DC-DC_loss} ; stred: sv. zelená - P_{sun} , modrá - P_{wind} , zelená - P_{amb} , zelená - P_{cont} ; dole: zelená - Stav batérie, fialová - P_{cool} , oranžová - T_{intern} , červená bodkovaná - rýchlosť vetra, modrá - T_{amb} , fialová čiarkovaná - T_{surf}



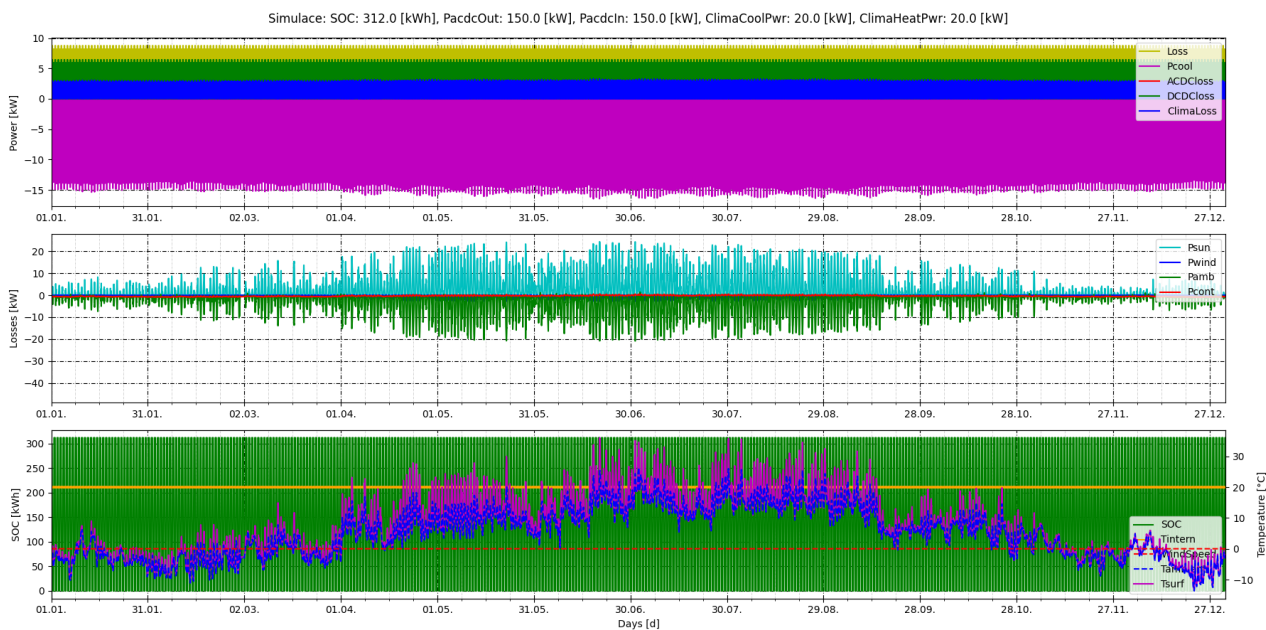
Obr. 3. Výsledky simulácie pre „letný mesiac - naprázdno“. Hore: žltá - P_{loss} , fialová - P_{cool} , červená - P_{AC-DC_loss} , zelená - P_{DC-DC_loss} ; stred: sv. zelená - P_{sun} , modrá - P_{wind} , zelená - P_{amb} , zelená - P_{cont} ; dole: zelená - Stav batérie, fialová - P_{cool} , oranžová - T_{intern} , červená bodkovaná - rýchlosť vetra, modrá - T_{amb} , fialová čiarkovaná - T_{surf}

jednotlivých častí je uvedený pod obrázkom. Podrobný pohľad na jeden kalendárny letný mesiac je znázornený na obr. 3. Zaujímavá je fialová čiara na prvom grafe. Tu vidíme chladiaci výkon P_{cool} klimatizácie.

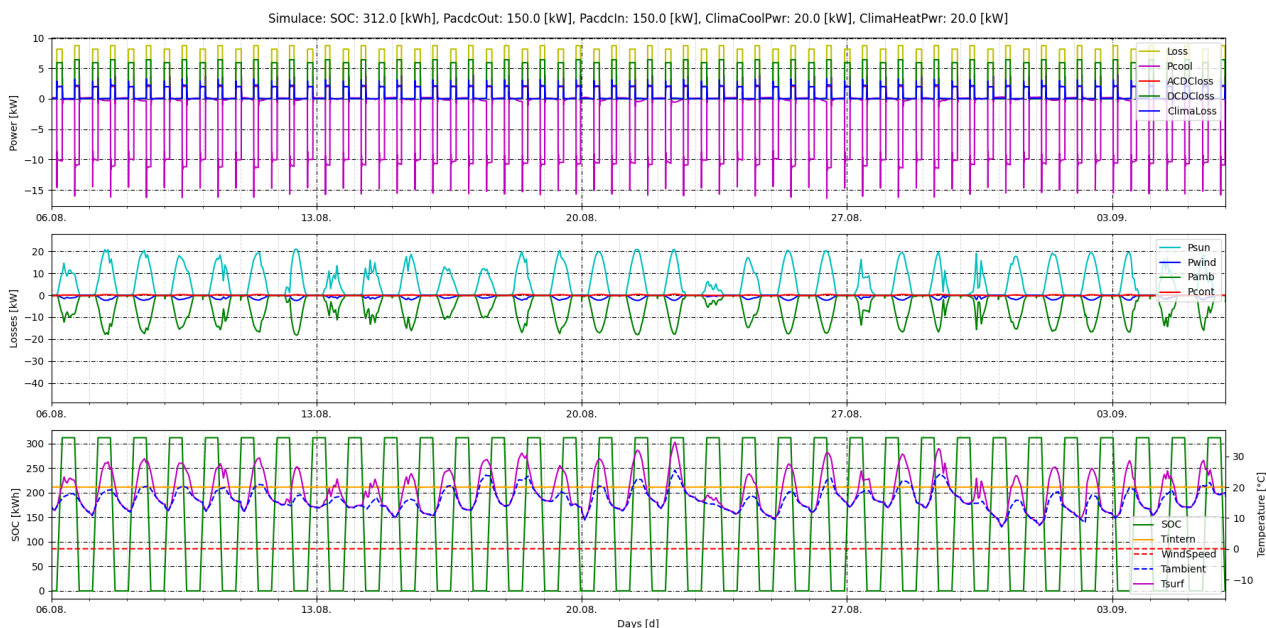
vypočítala integráciou metódou najmenších štvorcov. Výsledná vlastná spotreba klimatizácie bola

865,72 kWh. Klimatizácia vyrobila 2,82 MWh tepla a 166,8 kWh chladu.

sa opäť nabije z 0 % na 100 %, v oboch prípadoch s výkonom 100 kW. Jeho vnútorný rozptyl energie je v



Obr. 4. Výsledky simulácie pre „Typický rok - jeden cyklus denne.“ Hore: žltá - P_{loss} , fialová - P_{cool} , červená - P_{AC-DC_loss} , zelená - P_{DC-DC_loss} ; stred: sv. zelená - P_{sun} , modrá - P_{wind} , zelená - P_{amb} , zelená - P_{cont} ; dole: zelená - stav batérie, fialová - P_{cool} , oranžová - T_{intern} , červená_bodkovaná - rýchlosť vetra, modrá - T_{amb} , fialová_čiarkovaná - T_{surf}



Obr. 5. Výsledky simulácie pre „letný mesiac - jeden cyklus denne.“ Hore: žltá - P_{loss} , fialová - P_{cool} , červená - P_{AC-DC_loss} , zelená - P_{DC-DC_loss} ; stred: sv. zelená - P_{sun} , modrá - P_{wind} , zelená - P_{amb} , zelená - P_{cont} ; dole: zelená - stav batérie, fialová - P_{cool} , oranžová - T_{intern} , červená_bodkovaná - rýchlosť vetra, modrá - T_{amb} , fialová_čiarkovaná - T_{surf}

3.2 Jeden cyklus denne

Druhý simulovaný problém je za podmienky, že zásobník pracuje denne s jedným cyklom nabíjania a vybíjania. Cyklus je načasovaný tak, že každý deň o 6:00 hod. sa vybije zo 100 % na 0 % a o 18:00 hod.

danom aktívnom čase teplotne kompenzovaný klimatizačnou jednotkou, tak aby sa udržala vnútorná teplota na 20°C. Na obr. 4 je znázornený prehľad za celý rok. Výsledkom simulácie je, že na udržanie konštantnej teploty počas jedného roka pri jednom cykle za deň je skutočná spotreba klimatizácie 5,6 MWh. Klimatizácia vyprodukovala 2,1 MWh na

vykurovanie a 24,94 MWh na chladenie. Špičkový výkon klimatizácie bol 16,45 kW. Celkové straty z výkonových meničov dosiahli 26,8 MWh.

ZÁVER

V tomto článku boli predstavené výhody využitia vyradených batériových článkov z elektrických vozidiel. Medzi výhody patrí nižšia obstarávacia cena a nižší vplyv na životné prostredie. V kombinácii s použitím digitálneho dvojčata možno simulovať rôzne prevádzkové podmienky a na základe výsledkov predpovedať ziskovosť prevádzky.

Okrem toho bol opísaný a vysvetlený tepelný model a schéma výmeny. Tepelný model bol implementovaný v jazyku *Python* a výsledky simulácie dvoch stavov boli uvedené v tretej kapitole. V prvej simulácii sa skúma stav nečinnosti alebo vplyv okolitého prostredia na vlastnú spotrebu. Situácia je modelovaná udržiavaním klimatizácie pri konštantnej teplote 20°C. Výsledná celková vlastná spotreba klimatizácie bola vypočítaná na 865,72 kWh. Z toho klimatizácia vyprodukovala 2,82 MWh tepla a 166,8 kWh vychladila. Druhá simulácia sa týkala podmienky jedného cyklu za deň. Skutočná spotreba bola 5,6 MWh, pričom 24,94 MWh pripadlo na chladenie a 2,1 MWh na vykurovanie.

Zaujímavé je porovnanie pomeru výkonu chladenia a vykurovania v podmienkach prevádzky naprázdno a s jedným cyklom za deň. Je tu badateľný vplyv tepelných strát z prevádzky úložiska. Ďalšia analýza sa zameriava na závislosť od nadmorskej výšky umiestnenia kontajneru, pričom uvedené simulácie sa uskutočnili vo výške 752 m n. m. Vzhľadom na obmedzený rozsah článku nebola uvedená možnosť umiestnenia vo výške 120 m nad morom. Z porovnania vyplýva, že pre vyššie nadmorské výšky sa požiadavka zvyšuje na vykurovanie pri prevádzke na naprázdno.

Pod'akovanie

Táto publikácia vznikla vďaka podpore v rámci Operačného programu Integrovaná infraštruktúra pre projekt: Úložiská energie z batérií druhej životnosti / Second-life battery storage systems, ITMS2014+: 313012BNG4, ktorý je súčasťou významného projektu spoločného európskeho záujmu (IPCEI) z názvom European Battery Innovation v operačnom programe Integrovaná infraštruktúra, kód výzvy: OPII-MH/DP/2021/9.5-34, spolufinancovaný zo zdrojov Európskeho fondu regionálneho rozvoja.

LITERATÚRA

- [1] COMELLO, S. - REICHELSTEIN, S. (2019): *The emergence of cost-effective battery storage*. In: Nature communications, vol. 10, no. 1, p. 2038.
- [2] GILBERT ZEQUERA, R. - RASSOLKIN, A. - VAIMANN, T. - KALLASTE, A. (2023): *Overview of battery energy storage systems readiness for digital twin of electric vehicles*. In: IET Smart Grid, vol. 6, no. 1, pp. 5–16.
- [3] SEMERARO, C. - OLABI, A. - ALJAGHOUB, H. - ALAMI, A. H. - AL RADI, M. - DASSIST, M. - ABDELKAREEM, M. A. (2023): *Digital twin application in energy storage: Trends and challenges*. In: Journal of Energy Storage, vol. 58, p. 106347.
- [4] VANDAMA, A. GARG - PANIGRAHI, B. K. (2021): *Multi-dimensional digital twin of energy storage system for electric vehicles: a brief review*. In: Energy Storage, vol. 3, no. 6, p. e242.
- [5] SLEITI, A. K. - KAPAT, J. S. - VESELY, L (2022): *Digital twin in energy industry: Proposed robust digital twin for power plant and other complex capital-intensive large engineering systems*. In: Energy Reports, vol. 8, pp. 3704–3726.
- [6] PARK, H.-A. - BYEON, G. - SON, W. - JO, H.-C. - KIM, J. - KIM, S. (2020): *Digital twin for operation of microgrid: Optimal scheduling in virtual space of digital twin*. In: Energies, vol. 13, no. 20, p. 5504.
- [7] BOSCHERT, S. - ROSEN, R. (2016): *Digital twin - the simulation aspect*. In: Mechatronic futures: Challenges and solutions for mechatronic systems and their designers, pp. 59–74.
- [8] YEOW, K. - TENG, H. - THELLIEZ, M. - TAN, E. (2012): *Thermal analysis of a li-ion battery system with indirect liquid cooling using finite element analysis approach*. In: SAE International Journal of Alternative Powertrains, vol. 1, no. 1, pp. 65–78.
- [9] GATTA, F. - GERI, A. - LAURIA, S. - MACCIONI, M. - PALONE, F. (2015): *Battery energy storage efficiency calculation including auxiliary losses: Technology comparison and operating strategies*. In: IEEE Eindhoven PowerTech, pp. 1–6.
- [10] LIU, Y. - HARRIS, D. (2013): *Measurements of wind speed and convective coefficient on the external surface of a low-rise building*. In: International Journal of Ambient Energy, vol. 36, pp. 1–10, 12.
- [11] ARANI, A. K. - GHAREHPETIAN, G. - ABEDI, M. (2019): *Review on energy storage systems control methods in microgrids*. In: International Journal of Electrical Power & Energy Systems, vol. 107, pp. 745–757.