
Štúdia spolupráce energetického úložiska z batérií druhej životnosti a fotovoltajickej elektrárne

Martin Liška, Ing., PhD.*

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

Juraj Štrkolec, Ing.

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

Jozef Matušov, Ing., PhD.

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

Tomáš Havlíček, Ing.

EnergyCloud a.s.,
Studentská 50, Plzeň, Česká republika.
E-mail: havlicek@energycloud.cz

Stanislav Louvar, Ing.

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

A collaborative study of energy storage from second-life batteries and a photovoltaic power plant

Abstract: The aim of the simulation is to optimize the parameters of the battery storage system using battery cells from electric cars in cooperation with a photovoltaic power plant at the point of connection with a reserved input power of up to 100 kW. The analysis is performed in the *Python* programming environment, where all algorithms and calculations are implemented. The source codes of the simulation contain historical data of specific *PV* power plants.

Keywords: *SLBESS*, *FVE*, *Python*, simulation, programming.

ÚVOD

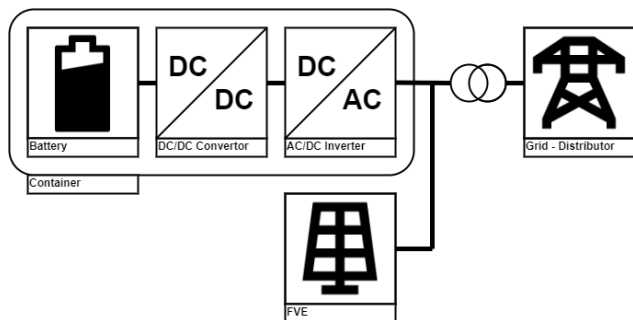
Štúdia skúma reálnu simuláciu batérií druhého života (*SLBESS*) v kombinácii s fotovoltajickou elektrárnou (*FVE*). Táto konfigurácia je pripojená k distribučnej sieti prostredníctvom rezervovanej kapacity (*RK*), ktorá je stanovená schválenou kapacitou distribučného energetického operátora na príslušnom pripojovacom mieste. Cieľom tejto simulácie je maximalizácia využitia výkonu *FVE* pri udržiavaní dodávky do siete pod úrovňou *RK*. Táto situácia sa môže vyskytnúť v prípadoch, keď investor plánuje výstavbu *FVE* na danom mieste, ale distribútor mu

nepridelí dostatočne veľkú *RK* pre pripojenie do siete. V takom prípade je využitý *SLBESS* k akumulácii energie z *FVE*, ktorú nemožno dodať kvôli obmedzeniu hodnotou *RK*. Nahromadená energia z *FVE* je následne dodávaná do siete v dobe, kedy výkon *FVE* nepresahuje *RK*. *SLBESS* využíva túto rezervu k dodávke naakumulovanej energie do siete, pričom to trvá až do dosiahnutia maximálnej hodnoty *RK*, alebo pokiaľ klesne stav nabitia (*SOC*) na minimálnu úroveň. Potom je pripravený k ďalšiemu nabitiu z *FVE* nasledujúceho dňa alebo do doby, pokiaľ výroba elektriny z *FVE* opäť prekročí *RK*, aby mohol *SLBESS* začať znovu nabíjať.

Štúdia obsahuje nastavenie kritériálnych funkcií pre optimalizáciu výpočtov. Uvedené optimalizačné metódy môžu byť uvedené v dvoch prípadoch: buď je RK_{max} stanovený distribútorom a optimalizácia vypočíta najvýhodnejšiu kapacitu úložiska, alebo možno s distribútorom dohodnúť RK_{max} takú, aby následne zistená konfigurácia SOC s RK_{max} poskytla najrýchlejšiu návratnosť, a teda najvýhodnejšie riešenie. Táto štúdia sa zameriava iba na optimalizáciu veľkosti SOC a RK_{max} , ale nerieši optimalizáciu výkonu $SLBESS$. Výkon vždy závisí od rozdielu medzi špičkovým výkonom od RK_{max} , aby batériové úložisko mohlo bez obmedzenia ukladať všetku energiu z FVE nad RK_{max} .

1 SIMULÁCIA

Simulácia je realizovaná v programovacom jazyku *Python*. Jednotlivé simulačné bloky sú definované pomocou výkonových parametrov a charakteristík účinnosti pri toku výkonu oboma smermi.



Obr. 1. Bloková schéma simulačného modelu

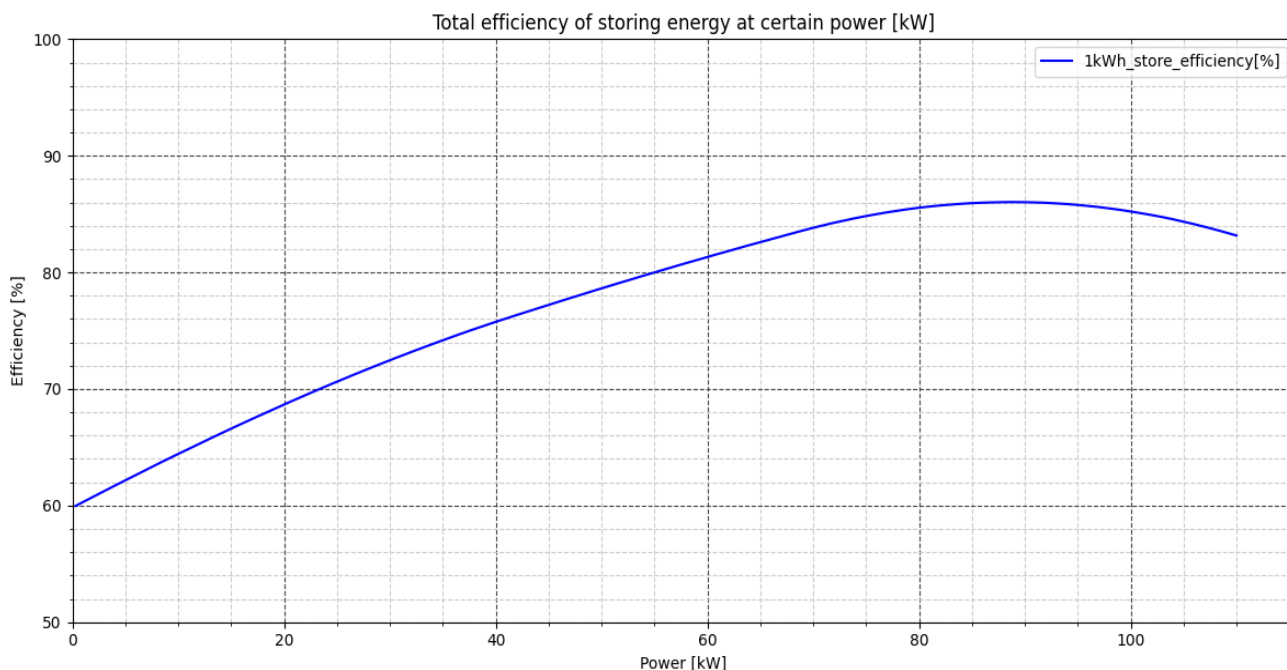
1.1 Nastavenie simulácie

Všetky parametre simulácie (kapacita batérií, maximálny výkon meničov, RK) sa nastavujú parametricky.

1.1.1 Veľkokapacitné úložisko $SLBESS$

Model $SLBESS$ sa skladá z jednotlivých modelov zložených z AC/DC striedačov, DC/DC meničov a batérií. Pro simuláciu boli použité obvyklé charakteristiky účinnosti jednotlivých modulov. Tieto charakteristiky sa definujú niekoľkými bodmi cez celý rozsah ich výkonov. V simulácii sa následne prevedú do hladkých funkcií pomocou metódy interpolácie z bodov daných tabuľkou. Druh interpolácie pre hladké prenosové funkcie je interpolácia pomocou kvadratických a kubických metód. Interpoláciou sa rozumie preloženie bodov $f(x_0)$, $f(x_1)$, ... $f(x_n)$ analytickou krivkou, ktorá umožňuje jednoduchý výpočet funkčných hodnôt vo všetkých medziľahlých bodoch. Kvadratická interpolácia použitá v simulácii je interpolácia funkcie tretieho rádu:

- AC/DC a DC/DC menič - reálne striedače a meniče nemajú konštantnú účinnosť v celom svojom výkonovom rozsahu, a tak sa energia ukladá do úložiska s rôznymi účinnosťami podľa aktuálneho výkonu, pri ktorom sa úložisko prevádzkuje. Vďaka sériovému zapojeniu jednotlivých modulov kontajnera sa účinnosti medzi sebou násobia,
- batérie - účinnosť batérie je nastavená na fixnú hodnotu 98 %.



Obr. 2. Celková účinnosť ukladania energie

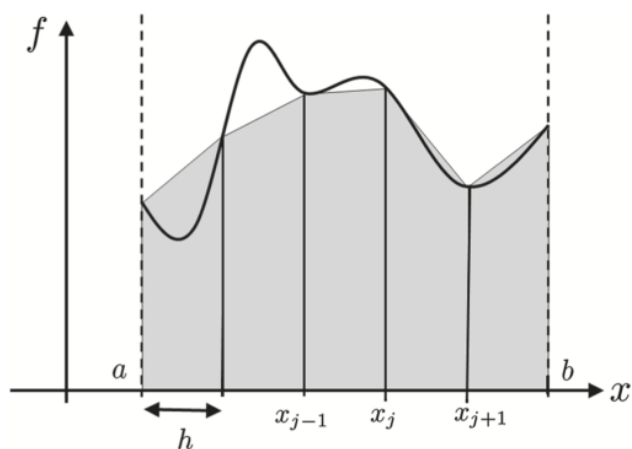
- ukladanie energie - účinnosť celého kontejnera pri ukladaní energie závisí od výkonu, pri ktorom sa daná energia ukladá:

$$\eta_{total} = \eta_{charging} \cdot \eta_{battery} \cdot \eta_{discharging}, \quad (1)$$

$$\eta_{total} = \eta_{DC/DC^2} \cdot \eta_{battery} \cdot \eta_{AC/DC^2}. \quad (2)$$

1.1.2 Zdroj energie FVE

Zdroje energie pre simuláciu sú vždy vzorkované hrubším intervalom, než je vlastný krok simulácie, napr. u stávajúcich historických dát fotovoltaickej elektrárne sú údaje logované každých 15 minút, a to buď v okamžitých výkonoch alebo v 15minutových energiách. K dosiahnutiu presnejšej integrácie energie medzi dvoma zdrojmi sa interpolovaným lichobežníkovým integrálom dopočítavajú medzibody.



Obr. 3. Interpolácia lichobežníkovým integrálom

1.1.3 Distribučná sieť

Simulácia využíva distribučné a dodávateľské modely v režime dodávky do distribučnej siete s vopred stanovenou tarifou:

- fixný poplatok (za RK / mesiac / kW),
- variabilné regulačné poplatky na odber (MWh),
- pokuta za prekročenie RK (kW).

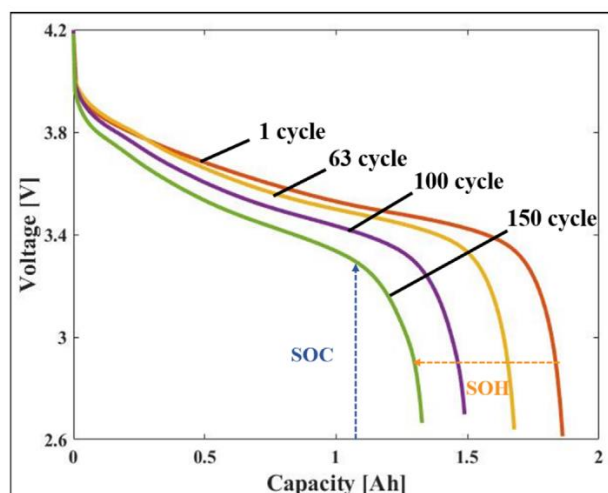
1.2 Metódy simulácie

Z dôvodu dosiahnutia maximálnej presnosti a s ohľadom na integračné problémy neistôt medzi logovanými údajmi poskytovanými existujúcimi zdrojmi energie sa využíva 1-minutový krok pri iterácii simulačných krokov. Dostatočná jemnosť krokov minimalizuje nepresnosť uloženaj/vydanej energie v situáciách, kde obmedzenie stavu nabitia nastane výrazne odlišne od vlastného kroku simulácie. Nepresnosť integrovanej hodnoty energie uloženaj v batériách by potom pri dlhodobej simulácii trvajúcej jeden rok a viac viedla k nerealistickému obrazu skutočného využitia reálneho batériového úložiska.

1.2.1 Výpočty vnútorných premenných

Hodnota SOC je vyjadrená v jednotkách kWh a je priebežne integrovaná v simulácii s každým iteračným krokom. Simulácia obsahuje ochranu pred prekročením hodnoty SOC nad 100 % alebo pod 0 %. Výpočet SOC prebieha v 1minutových krokoch a predpokladá lineárne využitie batérií, čo umožňuje nabíjanie až do 100 % výkonu a vybíjanie až na nulu, a to až do dosiahnutia plnej hodnoty SOC .

Hodnota SOH vyjadruje pomer aktuálnej kapacity batérie k jej nominálnej výrobnjej kapacite pri novom stave. Tato hodnota môže dosahovať až 100 %. S každým cyklom, ktorý batéria absoljuje, klesá hodnota SOH . V simulácii sa cyklus považuje za kompletný, pokiaľ sa súčet minútových energetických zmien pri nabíjaní a vybíjaní zhoduje s pohybom SOC od minima do maxima a naspäť. Jeden cyklus sa teda počíta ekvivalentnou energiou odpovedajúcou plnému vybitiu a plnému nabitíu batérie.



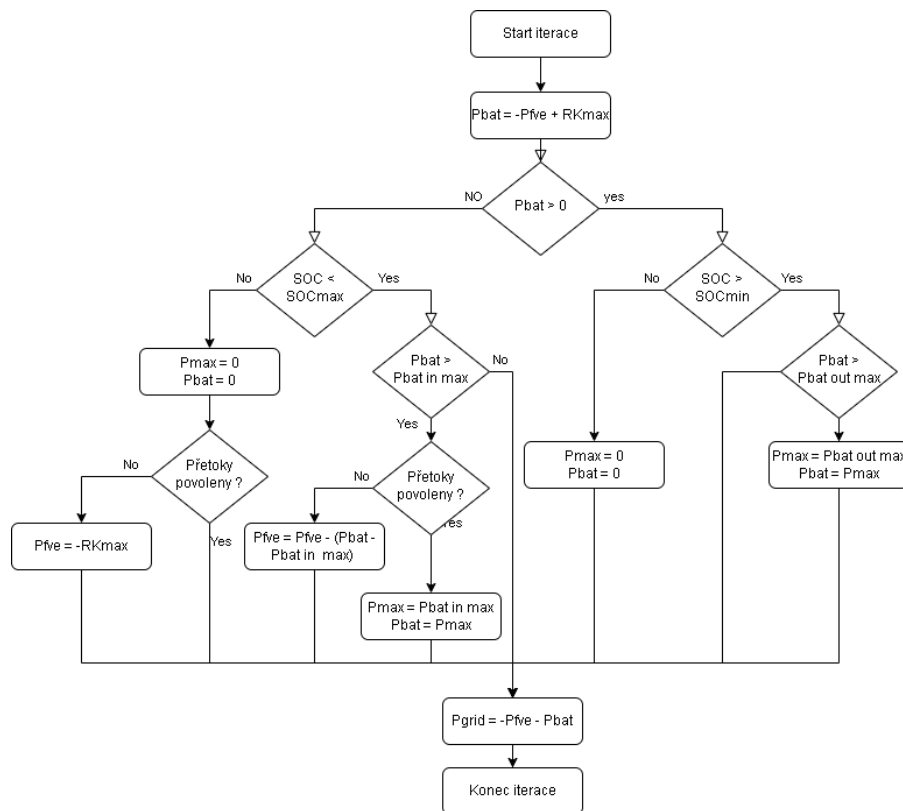
Obr. 4. Zmena závislosti kapacity batérie (SOC) v závislosti od životnosti (SOH) [2]

1.2.2 Výstup pre optimalizáciu

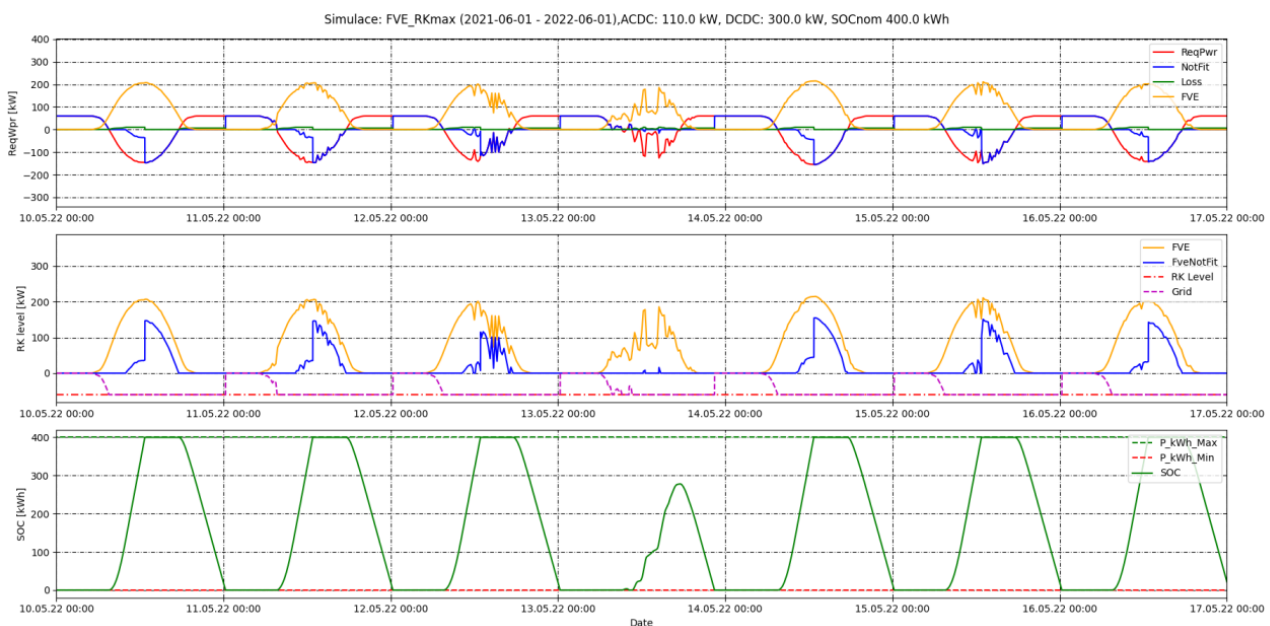
Simulácia vykonáva viacero simulačných prípadov, každý pre jednotlivú variantu SOC . Celkové výstupy všetkých simulačných variant exportujú celkovú prehľadovú tabuľku, ktorá obsahuje všetky koncové stavy všetkých variant. Pre úlohu nás zaujíma závislosť množstva dodanej energie do siete od kapacity SOC , ktorú optimalizujeme. Ich pomerom dostaneme kritériálnu funkciu, ktorá po optimalizácii zaisťuje najlepší pomer najviac predanej energie za najnižšie investičné náklady.

1.3 Princíp simulácie

Riadenie toku energie je postavené na princípe udržiavania hodnoty RK v mieste pripojenia FVE . Tato úroveň je kritická a nesmie byť prekročená. Programovo sa vypočíta veľkosť nabíjacieho výkonu do batérie, ktorý zodpovedá výkonu z fotovoltaickej elektrárne s odčítaním výkonu dodávaného do siete.



Obr. 5. Blokový diagram riadenia



Obr. 6. Týždenný priebeh simulácie - letné obdobie

V súlade so smerom toku energie batérie sa následne kontrolujú limity *SOC*. Pokiaľ je *SLBESS* plne nabitý, je nutné zabezpečiť, aby hodnota *RK* nebola prekročená. To možno dosiahnuť znížením výkonu *FVE* tak, že dočasne znížime výkon *FVE* tak, aby jej výkon do siete bol pod hodnotu *RK*. Pri simulácii kontajnera sú interne využívané premenné *Fit* a *NoFit*. Každý modul poskytuje hodnotu výkonu, ktorý môže v danom požadovanom okamihu dosiahnuť, t. j. premenná *Fit*, a časť, kedy ju nie je

schopný dosiahnuť, čo je označené ako premenná *NotFit*. Simulácie celého *SLBESS* prebieha nasledujúcim spôsobom z vyššej úrovne: Najskôr sa inicializujú a nakonfigurujú všetky potrebné parametre. Počas simulácie sa v každom iteračnom kroku vypočítava požiadavka na výkon zo *SLBESS* do distribučnej siete alebo opačne, pričom sa volá iteračná metóda výpočtu. V simulácii sú zahrnuté poplatky za služby a distribúciu elektrickej energie

(*EE*) a profity z predaja *EE*, pričom sa predpokladajú optimálne podmienky pre sieťové pripojenie *SLBESS*. V nasledujúcom diagrame riadenia je znázornený priebeh vyhodnocovania levelu *RK* a možnosti dodávať/odoberať *EE* do / z distribučnej siete.

- P_{fve} - výstupný výkon fotovoltaickej elektrárne,
- P_{bat} - požadovaný výkon po *SLBESS* (kladný alebo záporný),
- P_{max} - limit výkonu *SLBESS*,
- P_{grid} - výkon dodaný do distribučnej siete.

2 SIMULAČNÉ PRIEBEHY

Výsledné výstupné simulácie obsahujú tri základne časti zobrazovaných priebehov. Výstupné simulácie možno realizovať v rôznych nastaviteľných časových oknách.

Prvá časť zobrazuje:

- oranžová - priebeh výkonu *FVE*,
- červená - požadovaný výkon *SLBESS*,
- modrá - hodnota požadovaného výkonu, ktorý nedokáže *SLBESS* splniť,
- zelená - straty v prenose energie.

Druhá časť zobrazuje:

- oranžová - priebeh výkonu *FVE*,
- červená čiarkovaná - hodnota zadaného *RK*,
- fialová - výkon dodávaný do distribučnej siete,
- modrá - *FveNotFit* hodnota výkonu z *FVE*, ktorá nie je využitá k nabíjaniu ani nie je dodaná do distribučnej siete.

Tretia časť zobrazuje:

- zelená - priebežná hodnota *SOC*
- čiarkovaná - max/min limit *SOC*

Na obr.6 je týždňová simulácia v letnom období so zvolenými vstupnými parametrami:

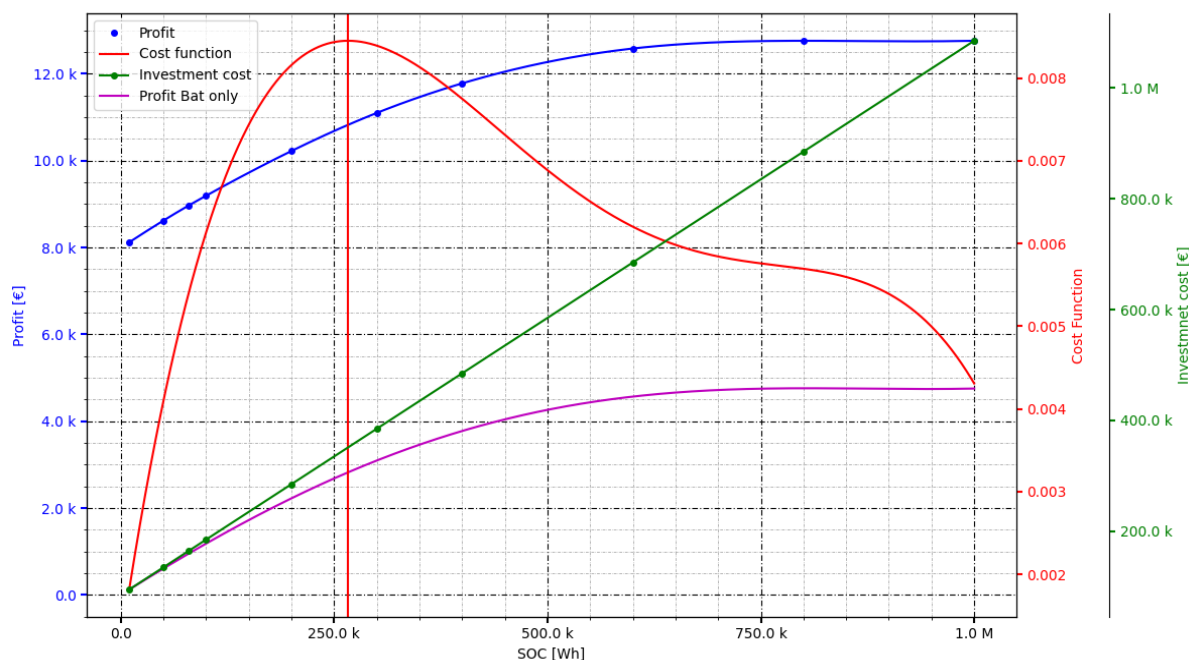
- $P_{AC/DC} = 110$ kW,
- $P_{DC/DC} = 150$ kW,
- $P_{FVE} = 250$ kWp,
- $SOC = 400$ kWh,
- $RK_{max} = 60$ kW.

3 OPTIMALIZÁCIA

V simulovanom scenári možno pozorovať, že batériové úložisko je najviac využívané v období s vysokým výkonom *FVE*. Inými slovami, v obdobiach bez výroby energie z *FVE* zostáva investícia nevyužitá, t. j. bolo by vhodné úložisko s menšou inštalovanou kapacitou *SOC*. Naopak, v období s veľmi produktívnou výrobou z *FVE* by bolo vhodné úložisko s väčšou inštalovanou kapacitou *SOC*. Z toho vyplýva úloha nájsť optimálnu kapacitu batériového úložiska tak, aby bol zisk z dodanej energie do siete čo najlepší pri čo najnižších investičných nákladoch.

Podľa výsledných priebehov v obr. 7 možno vybrať najvhodnejší pomer kapacity úložiska *SLBESS* voči požadovanej hodnote *RK* a veľkosti *FVE*, tak aby sa pri prevádzke maximalizoval zisk pri najnižších investičných nákladoch..

Optimalizačný výpočet je vykonaný pre hodnotu $RK = 60$ kW a inštalovaný výkon $FVE = 250$ kWp.



Obr. 7. Optimalizácia *SOC*

- modrá - celkový zisk z predaja energie do siete,
- fialová - zisk z predaja energie uloženej v batériách do siete,
- zelená - investičné náklady na *SLBESS*,
- červená - funkcia ceny.

Investičné náklady tvoria fixné a variabilné položky. Fixné zahŕňa: mechanické komponenty kontajnerového riešenia, elektro-výzbroj, stavebné úpravy a iné. Variabilná časť sa lineárne navyšuje s kapacitou (počtom batériových článkov) a výkonovým požiadavkám na meniče.

Optimálnu konfiguráciu SOC_{optim} pre čo najrýchlejšiu návratnosť možno stanoviť z krivky. Optimalizačná metóda je nájdenie minima polynómu štvrtého rádu pomocou funkcie derivácie. Konkrétna stanovená optimálna kapacita *SLBESS* pro vyššie zadané parametre je 266 kWh.

ZÁVER

S rastúcim rozvojom elektromobility rastie počet vyrobených batérií, ktoré bude potrebné recyklovať. Jednou z možností recyklácie je využitie opotrebovaných, ale stále funkčných batérií v energetických úložiskách, kde im je daný tzv. druhý život.

Táto štúdia na výpočet optimálnej kapacity *SLBESS* v spojení s *FVE* a s ohľadom na technické možnosti pripojenia *SLBESS* a *FVE* do siete, ktoré sú stanovené hodnotou *RK* naznačuje možnosti, ako pripojiť do siete *FVE* s výkonom vyšším ako je dovolená *RK* pre pripojenie takéhoto zdroja a to prostredníctvom využitia akumulácie.

Štúdiu možno ďalej rozširovať o optimalizáciu ostatných parametrov celkového riešenia, jak kapacitu *SLBESS*, tak navyiac aj o zmenu *RK*, veľkosť *FVE*.

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] MUKHERJEE, N. - STRICKLAND, D. (2014): *Second life battery energy storage systems: Converter topology and redundancy selection*. In: 7th IET International Conference on Power Electronics, Machines and Drives (PEMD), Manchester, UK, pp. 1-6, doi: 10.1049/cp.2014.0256.
- [2] LEE, J.-H. - LEE, I.-S. (2022): *Estimation of Online State of Charge and State of Health Based on Neural Network Model Banks Using Lithium Batteries*. In: School of Electronic and Electrical Engineering, Kyungpook National University, Daegu 41566, Korea, doi: 10.3390/s22155536.