

Tomáš Košický, Ľubomír Beňa, Michal Kolcun, ml.

Optimalizácia nasadenia systémov akumulácie elektrickej energie

História nasadenia systémov akumulácie energie (BESS) v prenosových a distribučných sústavách siaha niekoľko desaťročí dozadu. Primárne je uvažované s nasadením systémov akumulácie pre stabilizáciu siete, s poskytnutím výkonu pre štart z tmy, s akumuláciou energie vyrobenej z obnoviteľných zdrojov a s frekvenčnou reguláciou. Výber vhodnej oblasti nasadenia závisí od požiadaviek pomeru výkonu k akumulovanej energii a životného cyklu batérií. V tomto článku sa budeme venovať predikcii udržania systémov akumulácie (BESS) v optimálnom pásme úrovne nabitia pre poskytnutie primárneho regulačného výkonu (PRV). V kapitole 4 bude detailne rozobratá metodika optimalizácie udržania úrovne nabitia SoC a v kapitole 5 budeme analyzovať vplyv účinnosti a strát BESS v závislosti na veľkosti PRV.

Kľúčové slová: BESS, DoD, EoL, AF, FoC, SoC, STATCOM

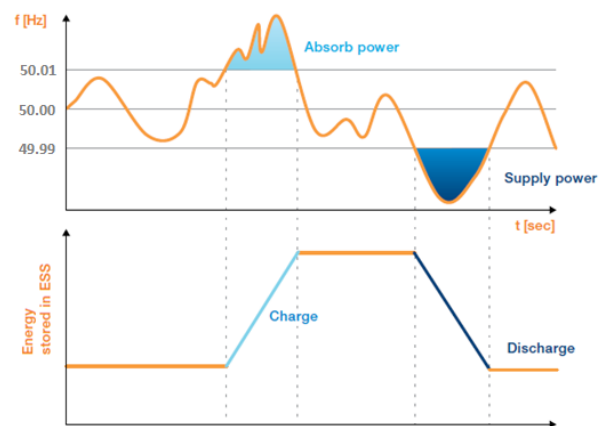
I. ÚVOD

Systémy akumulácie sa postupne stávajú dôležitým prvkom distribučných sietí, pričom v súčasnosti je najväčší počet inštalácií v Severnej Amerike [1]. V Európe sú prvé batériové systémy v prevádzke vo Švajčiarsku a Anglicku. Ďalšie projekty s celkovou kapacitou 24 MW a 10,8 MW budú v blízkej dobe uvedené do prevádzky v Taliansku. Aplikácie BESS poskytujú stabilizáciu sieťových parametrov, podporu štartu z tmy, vyhladenie výkonových špičiek, zmiernenie vplyvu obnoviteľných zdrojov a poskytovanie regulačného výkonu primárnej a sekundárnej regulácie [2]. Kľúčovou metodikou návrhu systému je zohľadnenie pomeru výkonu k požadovanej energii, zohľadnenie strát a udržanie úrovne nabitia batérie SoC 50 %. Primárna regulácia vyžaduje poskytovanie vysokého výkonu počas krátkej doby a s rýchlym prechodom z fázy nabíjania do fázy vybíjania. Smart grid aplikácie, napríklad akumulácia energie obnoviteľných zdrojov, oproti tomu vyžadujú nižší nabíjajúci/vybíjajúci výkon v časovom pásme niekoľkých hodín [3].

Príchodom BESS technológií s vysokým pomerom výkon/energia, ako sú napríklad Li-Ionové batériové články, poskytujúce možnosti manažovať dodávanie/odoberanie energie v krátkych časových pásmach s vysokou účinnosťou a predikovatelnou charakteristikou straty kapacity, vzrástli cykly nabíjania/vybíjania na hodnoty niekoľkých tisícok pri efektívnosti cyklu viac ako 95% [4]. Ďalším dôvodom nasadenia BESS je snaha rozšíriť možnosti integrovania inteligentných sietí Smart Grids. Nepredikovatelná výroba energie z obnoviteľných zdrojov vedie ku kritickým stavom v distribučných sústavách, a to hlavne k prudkým výkyvom sieťovej frekvencie a kolísaniu napätia. V rámci obchodu s primárnym regulačným výkonom v sieti ENTSO-E sa očakáva v ďalšom desaťročí nárast prudkých výkyvov na strane výroby a spotreby elektrickej energie [6]. Obrázok 1 zobrazuje princíp BESS pre primárnu reguláciu, kde je priebeh frekvencie (hore) v čase a charakteristika výkonu primárnej regulácie BESS (dole). V čase, keď je frekvencia v pásme necitlivosti (49,99Hz - 50,01Hz), je pomer nabíjania/vybíjania z batérie nulový. Ak frekvencia prekročí pásmo necitlivosti v hornej hranici, batériový

systém sa nabíja. Ak je frekvencia pod spodným limitom pásma necitlivosti, batériový systém sa vybíja.

Kým výchylka frekvencie s ohľadom na nominálnu frekvenciu 50Hz môže byť kladná alebo záporná, akumulácia batérie SoC by mala byť v pozícii, keď v každom okamihu umožňuje vybíjanie ($f_{(t)} < 49,99\text{Hz}$), ako aj nabíjanie ($f_{(t)} > 50,01\text{Hz}$). Z tohto dôvodu predstavuje úroveň nabitia batérie SoC 50 %, pretože po cykle vybíjania sa môžu objaviť ďalšie nasledujúce cykly vybíjania a akumulácia batérie môže skončiť úplne vybitá. Úroveň SoC dosiahne potom hranicu SoC_{min} . Podobne sa môže objaviť niekoľko za sebou nasledujúcich cyklov nabíjania a akumulácia batérie dosiahne úroveň SoC_{max} .



Obr.1 Operačný princíp BESS pre frekvenčnú reguláciu.

Pre určenie optimálnej veľkosti BESS musíme zohľadniť počiatočné investičné náklady a predpokladaný životný cyklus batérií, kde používame metodiku založenú na vyhodnocovaní hĺbky vybitia (DoD) v priebehu jedného cyklu k absolútnej hodnote (SoC) a aktuálnej veľkosti dodaného výkonu.

V tomto článku prezentujeme metodiku udržania úrovne nabitia optimálnej hodnoty SoC a zohľadnenie účinnosti výkonových prvkov a batérií. Kapitoly 3 a 4 hovoria o metodike dorovnania hladiny SoC na úroveň 50 % identifikovaním Active Frame (AF), Frame of Charge (FoC), Frame

of Discharge (*FoD*), predikcie výchylky *SoC* a jej dorovnanie pri čo najmenejšej zmene *DoD* cyklu.

II. APLIKÁCIE BESS

Podporné služby

Podporné služby (PS) zahŕňajú reguláciu napätia a poskytovanie primárnej regulačnej rezervy [7]. Charakteristická požiadavka pre PS je rýchly nábeh na maximálny výkon, rýchla odozva na zmeny sieťovej frekvencie a vysoká spoľahlivosť dodávky. Očakávame, že trh s podpornými službami bude narastať spolu so vzrastajúcou výrobou elektriny z obnoviteľných zdrojov.

Frekvenčná regulácia

Frekvenčná regulácia zabezpečuje stabilitu siete udržiavaním hodnoty sieťovej frekvencie na úrovni 50Hz. Frekvenčný rozsah pôsobenia primárnej regulácie činného výkonu predstavuje $\Delta f = \pm 200$ mHz a pásmo necitlivosti regulátora činného výkonu zariadenia poskytujúceho primárnu reguláciu zostáva na hodnote $\eta \pm 10$ mHz [2]. Frekvenčná regulácia je poskytovaná kombináciou viacerých zdrojov – jadrové, tepelné, vodné elektrárne atď. Výkon plynových a parných turbín je riadený automaticky regulátorom s lineárnym priebehom, reagujúcim na signál sieťovej frekvencie, ktorý podľa potreby zvyšuje a znižuje výkon dodávaný do siete a tým zabezpečuje vyvážený stav medzi výrobou a spotrebou v sieti. Ekonomické aspekty v súčasnosti diktujú výber poskytovateľa primárnej regulácie, pričom v posledných rokoch vzrastá kapacita BESS systémov vybavených vysoko-kapacitnými Li-Ion batériami, ktoré predstavujú technicko-ekonomickú alternatívu ku konvenčným poskytovateľom primárnej regulácie. EKZ Dietikon s inštalovaným výkonom 1 MW a kapacitou 518 kWh je prvým BESS v prevádzke v Európe. Umožňuje kombináciu PRV, reguláciu napätia, akumuláciu solárnej elektriny a jej dodávku v ostrovej prevádzke [7].

TABULKA I
Výkonové parametre BESS v EKZ Dietikon

Jednotka	Hodnota	Poznámka
Výkon	1MW	v oboch smeroch
Kapacita	580 kWh	250 kWh \uparrow 1MW
Dodávateľ batérií	LG Chem	
Typ batérií	Li-Ion	
Počet článkov	10 368	
Životnosť	3500 Cyklov ¹	2 Cykly/Deň, 250kWh

Investičné náklady cca. 2,5 mil. CHF, z toho cca. 700 000 CHF Batérie

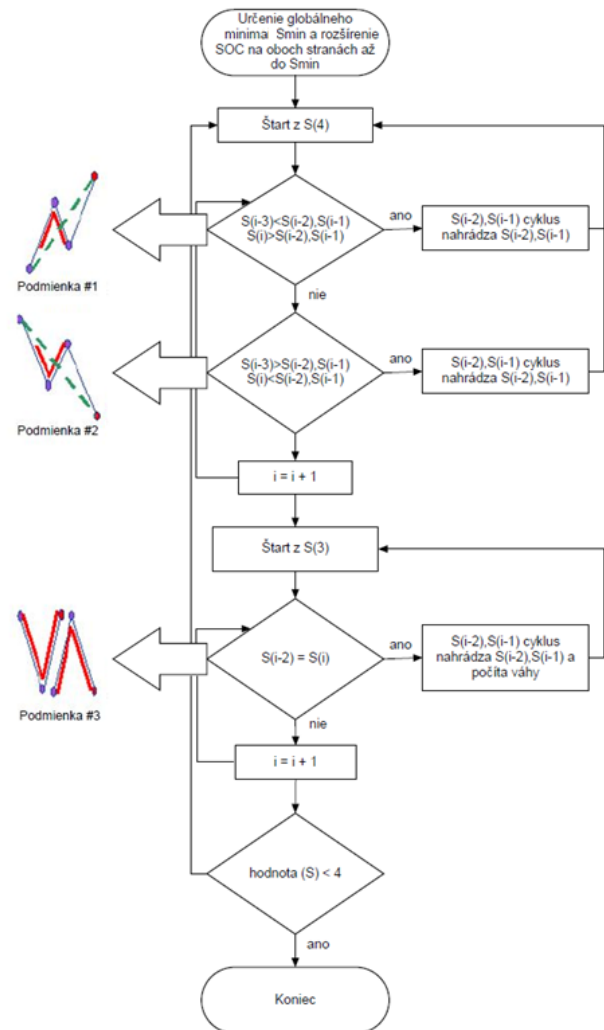
¹Výrobca garantuje v reálnom nasadení podstatne vyššiu životnosť

III. IDENTIFIKÁCIA SUB-CYKLOV

Pre účely našej analýzy musíme sieťovú frekvenciu aplikovanú na model batériového systému rozdeliť do jednotlivých sub-cyklov podľa hodnoty *DoD* pre každý cyklus, ktorý je definovaný ako pomer zmeny *SoC* k absolútnej hodnote kapacity.

Rainflow algoritmus výpočtu cyklov je najpoužívanejším algoritmom pre analýzu starnutia batérií, kde je hĺbka vybitia BESS rozdelená do jednotlivých sub-cyklov, pričom jeden cyklus je definovaný ako úplne vybitie a nabitie z hodnoty *SoC* 50%. Vývojový diagram Rainflow algoritmu je zobrazený na obrázku 2. V algoritme predstavuje *S* inflexné body zmeny úrovne *SoC*, kde sa hodnota *SoC* mení zo stúpajúcej na klesajúcu alebo z klesajúcej na stúpajúcu, a to buď v čase nabíjania ako aj vybijania batérie. To znamená, že aj v čase nabíjania (vybijania) sa môžu objaviť ďalšie menšie sub-cykly. Algoritmus začína vo štvrtom bode *S*(4) a pokračuje identifikovaním sub-cyklov založených na troch podmienkach uvedených v rozhodovacích boxoch.

Každý sub-cyklus predpokladá vyvolanie určitej degradácie batérie na základe čiastkových zmien *DoD* cyklu. Hodnota straty kapacity jednotlivých sub-cyklov (*DoD*) sa násobí podľa frekvencie výskytu tohto čiastkového cyklu, čím dosiahneme teoretickú hodnotu konca životnosti batérie.



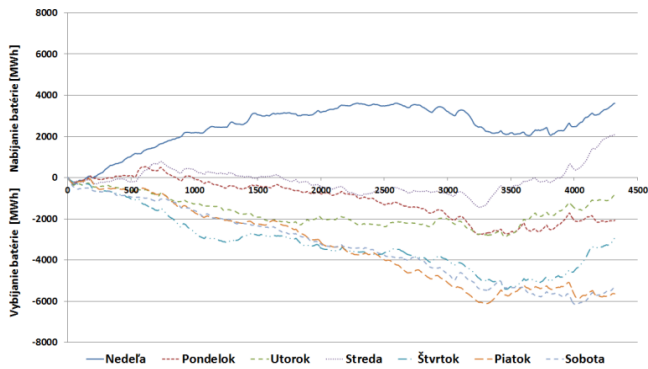
Obr. 2 Vývojový diagram Rainflow algoritmu

IV. VÝKONOVÁ ANALÝZA BESS SYSTÉMU

Ako bolo spomenuté v úvodnej kapitole, zamerali sme sa na prekonanie obmedzenia disponibilnej kapacity systému akumulácie energie úpravou pracovného bodu tak, že v priebehu poskytovania PRV dosahuje BESS skutočnú strednú hodnotu *SoC*. Odchýlka *SoC* je závislá aj na niektorých špecifických parametroch BESS, ako je účinnosť systému (straty) a samovybijanie, ako aj na úprave parametrov pracovného bodu, oneskorení nábehu výkonu a predikcii výchylky kapacity. Metóda pre analýzu bola navrhnutá tak, aby bolo možné poskytovať PRV v za sebou nasledujúcich časových intervaloch a aby vyrovňavanie hladiny *SoC* malo čo najmenší vplyv na stratu kapacity batérií a straty vznikajúce účinnosťou batérií $\eta(\text{bat})$ a výkonových prvkov BESS (meniče napätia a spínacie prvky) $\eta(\text{Pcs})$ [8].

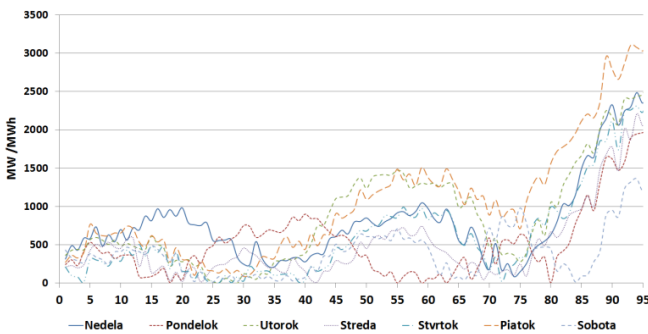
V analyzovanom kalendárnom týždni 37/2012 sme pre primárny regulačný výkon uvažovali s kapacitou systému 2 MWh, kde je započítaná aj 50 % rezerva straty kapacity batérií. Maximálna výchylka kapacity po 15 minútach regulácie potom predstavuje 0,5MWh. Vplyvom nesymetrie výkyvov sieťovej frekvencie by

system akumulácie po určitom čase skončil mimo pásma SoC a nebol by schopný splniť podmienky pre poskytovanie PRV[6]. Ako vidíme na obrázku 3, každý pracovný deň boli výkyvy frekvencie vplyvom prevládajúcej výroby nad $f(t) < 50,00\text{Hz}$, čím batérie skončili vybité na spodnom limite SoC_{min} . V čase nižšej spotreby, napr. cez víkend, prevláda počet frekvenčných výkyvov $f(t) > 50,00\text{Hz}$, pričom sa batérie nabíjajú až po dosiahnutí limitu kapacity SoC_{max} .



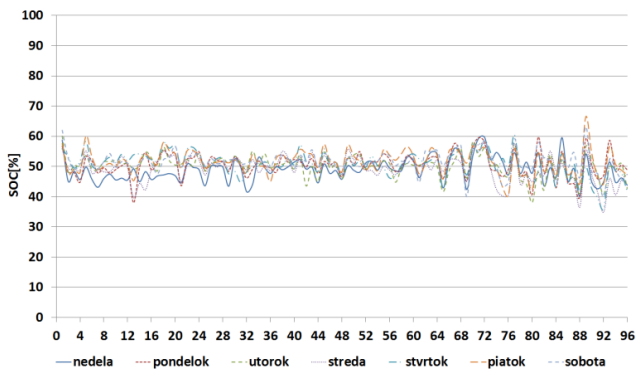
Obr. 3 Týždňový priebeh vybijacieho/nabíjacieho výkonu BESS

Obrázok 4 zobrazuje celkový akumulovaný výkon v absolútnych hodnotách pre každý analyzovaný deň v 15 minútových intervaloch.

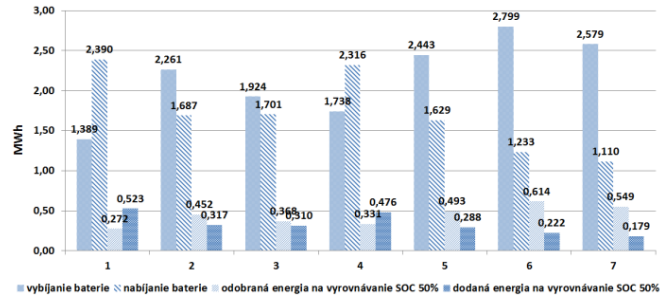


Obr. 4 Celkový denný akumulovaný výkon BESS

Ako vidíme na obrázku 5, s regulačným výkonom, ktorý udržiava kapacitu systému na úrovni 50 % nabitia, sa výchylky kapacity po každom 15 minútovom intervale vrátili do požadovaného pásma, pričom najväčšie výchylky predstavovali hodnoty 36,55% - 66,45% SoC .

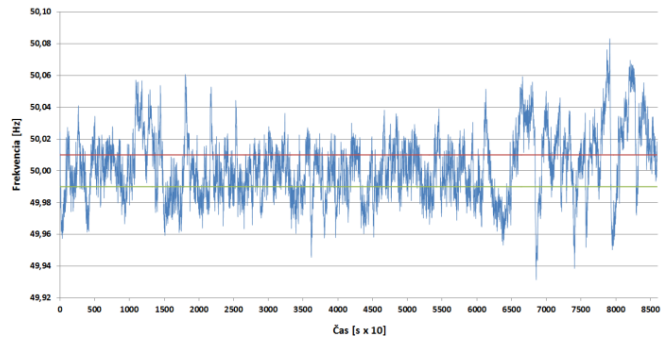


Obr. 5 Úrovně SoC v 15- minútových intervaloch



Obr.6 Dodaný/odoberaný regulačný výkon a energia potrebná na vyrovnanie úrovne SoC v týždni 37/2012

Na obr. 6 vidíme dodaný/odoberaný výkon a energiu potrebnú na vyrovnanie úrovne SoC 50% pre jednotlivé dni týždňa. Priebeh sieťovej frekvencie je zobrazený na obrázku 7. Pre túto veľkosť batérie je pomocou Rainflow algoritmu frekvencia rozdelená na jednotlivé cykly nabíjania/vybíjania.



Obr.7 Sieťová frekvencia pre analyzovaný deň

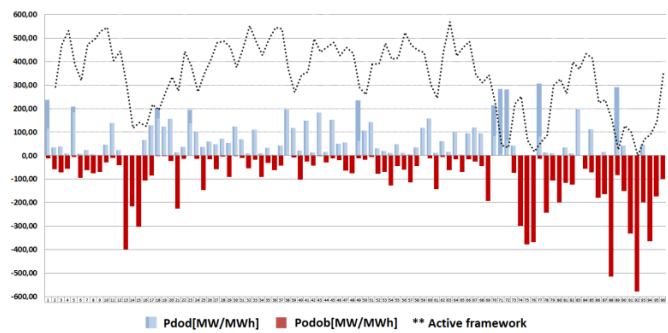
Výpočet úrovne energie batérie (SoE):

$$\Delta E(t_i) = \frac{[MW(t_i) + MW(t_{i-1})](t_i - t_{i-1})}{2} \quad (1)$$

$$SoE(t_i) = SoE(t_{i-1}) + \frac{\Delta E(t_i)}{\text{Battery rating (MWh)}} \quad (2)$$

Výpočet SoC :

$$SoC_{avg} = \frac{1}{\Delta t} \int_{t_{n-1}}^{t_n} SoC(t) dt \quad (3)$$



Obr. 8 15-minútové hodnoty dodaného/odoberaného výkonu a Active framework

Pre udržanie kapacity systému v rovnovážnom stave sme zaviedli

regulačný obvod, pri ktorom vychádzame z toho, že po prvých 15 minútach poskytovania PRV bude aktivovaná sekundárna regulácia frekvencie (SRV) a odchýlka kapacity od 50% SoC bude vyregulovaná v ďalších 15 minútach. Keďže batérie poskytujú regulačný výkon až keď frekvencia prekročí hranicu necitlivosti $\eta < \pm 10$ mHz, bude aj výkon potrebný na vyrovnanie kapacity aktívny len mimo tohto intervalu. Čas, v ktorom systém dodáva/odoberá výkon, označujeme AF (Active Framework). Pre každých ďalších 15 minút potom budeme dodávať FoC (Frame of Charge) alebo odoberať FoD (Frame of Discharge), jednotku výkonu na dorovnanie SoC 50 % podľa vzorca:

$$FoC = \frac{\sum_{t=1}^{900} P_{TARGET(odob)}(t)}{AF} \quad (4)$$

$$FoD = \frac{\sum_{t=1}^{900} P_{TARGET(dod)}(t)}{AF} \quad (5)$$

Po zmene kapacity v prvých 15 minútach budeme vyrovnávať SoC 50 % podľa vzorca

$$P_{ext}(t) = P_{AS}(t) \pm P_{soc}(t),$$

kde v ďalších 15 minútach regulácie v každom AF dodáme/odoberáme jednotku FoC/FoD k požadovanému regulačnému výkonu, pričom vychádzame z predpokladu že:

$$\sum_{t=901}^{1800} AF(t) > \sum_{t=1}^{900} AF(t) \quad (6)$$

Ak je suma AF v čase $t=(901s,1800s)$ menšia ako v predchádzajúcom intervale, tak nebol dodaný celý potrebný výkon pre dorovnanie SoC 50%. Rozdiel medzi skutočným $P_{REAL}(MWh)$ a požadovaným výkonom $P_{TARGET}(MWh)$ je potom dopočítaný k požadovanému dodanému/odoberanému výkonu v ďalšom 15 minútovom intervale podľa vzorca:

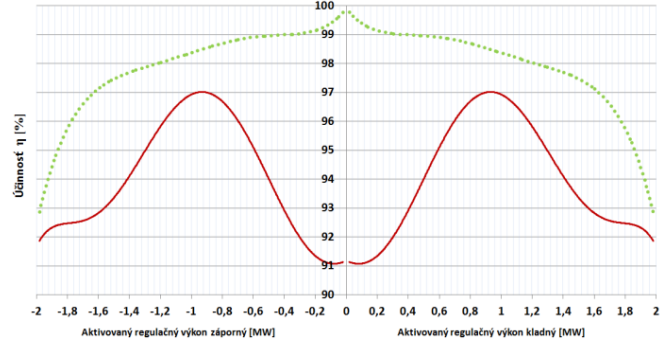
$$\sum_{t=901}^{1800} P(t) = \left[\sum_{t=901}^{1800} P_{TARGET(DOD)}(t) - \sum_{t=901}^{1800} P_{TARGET(ODOB)}(t) \right] + \left[\sum_{t=901}^{1800} P_{AB(ODOB)}(t) + \sum_{t=901}^{1800} P_{AB(DOD)}(t) \right] \quad (7)$$

V. ZOHLADNENIE STRÁT A URČENIE PRACOVNÉHO BODU

Za účelom udržania úrovne pracovného bodu SoC, je celkový výkon $P_{ext}(t)$ počítaný ako suma $P_{AS}(t)$ (Ancillary Service) a signálu pracovného bodu BESS $P_{WP}(t)$ (Working Point) a vyrovnávacieho výkonu $P_{SoC}(t)$ (State of Charge).

$$P_{ext}(t) = P_{AS}(t) + P_{WP}(t) \pm P_{soc}(t) \quad (8)$$

$$P_{wp}(t) = P_{\eta(bat)}(t) + P_{\eta(Pcs)}(t) \quad (9)$$



Obr. 9 Účinnosť batérií a výkonových prvkov

Výkon pracovného bodu $P_{WP}(t)$ potom predstavuje krytie strát pri nabíjaní/vybíjaní batérií $P_{\eta(bat)}$ (prerušovaná čiara na obr. 10) a strát na výkonových prvkoch $P_{\eta(Pcs)}$ (plná čiara na obr. 10) v závislosti na veľkosti dodaného výkonu. Batérie z chemického hľadiska premeny energie majú najvyššiu účinnosť pri čo najmenšom aktivovanom výkone. Účinnosť výkonových prvkov stúpa lineárne a dosahuje najvyššiu hodnotu pri 50 % zaťaženi systému, následne lineárne klesá približením sa k maximálnemu aktivovanému výkonu.

TABUĽKA II
15-minútové hodnoty výkonov a vyrovnávanie SoC

t900[s]	Pdod [MW/MWh]	Podob [MW/MWh]	Active framework [AF]	Frame of charge [FOC]	Frame of discharge [FOD]
1	238,728	-11,558	115	1,975	0,000
2	35,782	-58,905	470	0,098	0,000
3	39,125	-71,914	473	0,139	0,000
4	11,032	-56,262	590	0,153	0,000
5	208,608	-6,415	184	0,000	-0,761
6	7,837	-94,192	454	0,380	0,000
7	23,923	-61,626	492	0,153	0,000
8	6,834	-75,179	494	0,277	0,000
9	1,303	-70,475	566	0,244	0,000
10	46,875	-29,109	524	0,000	-0,014
11	139,667	-9,605	286	0,000	-0,443
12	23,119	-40,216	604	0,057	0,000
13	0,000	-399,549	0	0,000	0,000
14	0,000	-216,885	233	1,862	0,000
15	0,000	-302,526	47	20,241	0,000
16	65,911	-105,803	202	0,395	0,000
17	130,516	-85,521	231	0,000	-0,195
18	202,416	-0,145	157	0,000	-1,197
19	124,068	-0,579	376	0,000	-0,328
20	157,682	-22,522	294	0,000	-0,368
21	13,627	-226,380	255	1,725	0,000
22	37,063	-14,023	629	0,000	-0,037
23	195,908	0,000	136	0,000	-1,308
24	100,528	-13,956	407	0,000	-0,213
25	38,458	-147,472	291	0,834	0,000
26	60,111	-15,710	521	0,000	-0,085
27	49,398	-58,698	439	0,058	0,000
28	73,034	-4,063	535	0,000	-0,129
29	54,066	-90,605	388	0,237	0,000
30	125,113	-1,737	363	0,000	-0,324
31	70,976	-9,610	545	0,000	-0,113
32	9,737	-53,742	559	0,157	0,000
33	110,275	-16,871	411	0,000	-0,171
34	11,210	-89,858	444	0,354	0,000
35	33,745	-31,756	542	0,000	-0,004
36	4,060	-62,227	546	0,213	0,000
37	43,156	-41,930	533	0,000	0,000
38	196,842	0,000	202	0,000	-0,974
39	117,490	-7,851	335	0,000	-0,327
40	21,744	-101,450	350	0,455	0,000

TABUĽKA III

15-minútové hodnoty výkonov a vyrovnávanie SoC (pokračovanie tab. II)

t900[s]	Pdod [MW/MWh]	Podob [MW/MWh]	Active framework [AF]	Frame of charge [FOC]	Frame of discharge [FOD]
41	150,110	-25,222	361	0,000	-0,346
42	15,067	-42,037	633	0,085	0,000
43	183,097	-2,171	247	0,000	-0,599
44	15,410	-29,023	679	0,040	0,000
45	153,401	-12,233	284	0,000	-0,441
46	51,476	-18,658	565	0,000	-0,058
47	56,653	-64,672	357	0,079	0,000
48	0,000	-76,305	514	0,297	0,000
49	236,796	-12,319	64	0,000	-1,420
50	105,927	-16,878	457	0,000	-0,195
51	142,786	-6,249	322	0,000	-0,342
52	31,563	-77,561	460	0,200	0,000
53	20,074	-70,137	496	0,202	0,000
54	11,780	-127,226	326	0,814	0,000
55	49,032	-45,411	504	0,000	-0,007
56	13,232	-59,329	544	0,169	0,000
57	6,184	-113,492	394	0,609	0,000
58	34,997	-44,717	502	0,039	0,000
59	118,540	0,000	376	0,000	-0,302
60	158,140	-11,724	228	0,000	-0,446
61	12,352	-143,248	262	0,999	0,000
62	62,266	-6,453	629	0,000	-0,089
63	16,023	-61,409	508	0,200	0,000
64	103,700	-14,776	339	0,000	-0,163
65	4,516	-69,541	581	0,224	0,000
66	94,801	-15,853	391	0,000	-0,093
67	120,890	-25,800	297	0,000	-0,291
68	94,430	-44,268	323	0,000	-0,155
69	0,145	-192,440	362	1,062	0,000
70	213,816	0,000	83	0,000	0,000
71	284,932	0,000	5	0,000	-56,986
72	283,082	0,000	63	0,000	-4,493
73	43,575	-73,230	375	0,158	0,000
74	0,000	-298,029	128	4,962	0,000
75	0,000	-378,539	3	459,106	0,000
76	0,000	-368,766	32	23,048	0,000
77	307,697	-13,200	81	0,000	-3,636
78	13,474	-242,817	90	5,097	0,000
79	10,097	-106,658	506	0,382	0,000
80	0,000	-198,526	144	3,717	0,000
81	34,714	-115,726	385	0,421	0,000
82	10,455	-123,388	412	0,548	0,000
83	197,578	0,000	323	0,000	-0,461
84	0,000	-55,358	545	0,203	0,000
85	113,161	-70,810	284	0,000	0,000
86	0,000	-179,585	168	2,138	0,000
87	16,222	-164,862	304	0,978	0,000
88	0,000	-514,811	0	0,000	0,000
89	291,561	-83,676	51	0,000	-4,076
90	44,074	-150,222	204	1,041	0,000
91	0,000	-331,766	0	0,000	0,000
92	0,000	-577,420	0	0,000	0,000
93	46,469	-198,994	140	2,179	0,000
94	0,000	-363,900	41	23,013	0,000
95	0,000	-173,175	246	1,408	0,000
96	1,303	-100,920	477	0,418	0,000

ZÁVER

V tomto článku sme sa venovali základným podmienkam a požiadavkám na optimalizáciu akumulácie energie BESS systémov. Z analýzy vyplýva nutnosť zavedenia algoritmov pre udržanie stability systému tak, aby boli straty kapacity čo najmenšie a zároveň bola udržaná potreba regulačného výkonu $P_{SoC}(t)$. Taktiež je potrebné uvažovať aj so stratami samovybíjaním batérií vplyvom účinnosti jednotlivých cyklov nabíjania/vybíjania. BESS sa nepochybne stanú dôležitými prvkami prenosových sietí aj vzhľadom k budúcemu znižovaniu výrobných nákladov komponentov, ako sú batérie a výkonové prvky. V ďalšej práci máme v úmysle detailne vyhodnotiť algoritmy udržania vyváženého stavu akumulácie a ich vplyv na stratu kapacity.

POĎAKOVANIE

Publikácia bola vypracovaná v rámci operačného programu Výskum a vývoj, pre projekt: Univerzitný vedecký park TECHNICOM pre inovačné aplikácie s podporou znalostných technológií, kód ITMS: 26220220182, spolufinancovaný zo zdrojov Európskeho fondu regionálneho rozvoja.“

„Podporujeme výskumné aktivity na Slovensku/Projekt je spolufinancovaný zo zdrojov EÚ“

LITERATÚRA

- [1] K. Divya and J. Østergaard: “Battery energy storage technology for power systems – an overview,” *Electric Power Systems Research*, vol. 79, no. 4, pp. 511–520, 2009.
- [2] M. Mercang’oz, J. Hemrle, L. Kaufmann, A. Z’Graggen, and C. Ohler: “Electrothermal energy storage with transcritical CO₂ cycles,” *Energy*, vol. 45, no. 1, pp. 407–415, 2012, the 24th International Conference on Efficiency, Cost, Optimization, Simulation and Environmental Impact of Energy, ECOS 2011.
- [3] A. Oudalov, D. Chartouni, and C. Ohler: “Optimizing a battery energy storage system for primary frequency control,” *Power Systems, IEEE Transactions on*, vol. 22, no. 3, pp. 1259–1266, aug. 2007.
- [4] P. Mercier, R. Cherkaoui, and A. Oudalov: “Optimizing a battery energy storage system for frequency control application in an isolated power system,” *Power Systems, IEEE Transactions on*, vol. 24, no. 3, pp.1469–1477, Aug. 2009.
- [5] Swissgrid, “Transmission code 2008,” VSE, Aug 2008. [Online]. Available: www.swissgrid.ch
- [6] ENTSO-E, Operation Handbook, 2009, ch. Policy 1: Load-Frequency Control and Performance.
- [7] Swissgrid, “Rahmenvertrag zur Lieferung von Primärregelleistung,” November 2009, version 2.0.[Online]. Available: www.swissgrid.ch
- [8] M. Koller, T. Borsche, A. Ulbig, and G. Andersson: “Defining a degradation cost function for optimal control of a battery energy storage system,” submitted to *PowerTech 2013*.

ADRESY AUTOROV

Tomáš Košícký, Technická Univerzita Košice, Katedra elektroenergetiky, Mäsiarska 74, 041 20, Košice, Slovenská Republika,

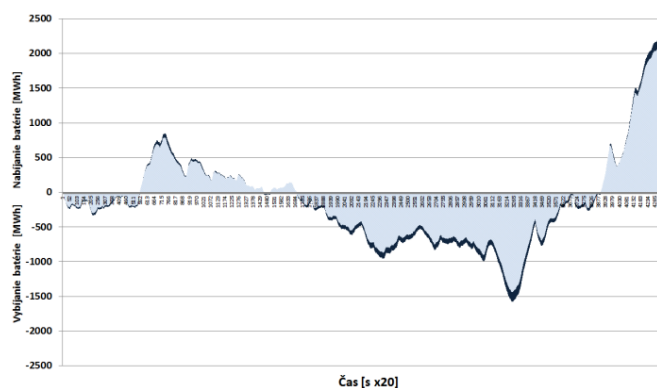
tomas.kosicky@tuke.sk

Lubomír Beňa, Technická Univerzita Košice, Katedra elektroenergetiky, Mäsiarska 74, 041 20, Košice, Slovenská Republika,

lubomir.bena@tuke.sk

Michal Kolcun, ml., Technická Univerzita Košice, Katedra elektroenergetiky, Mäsiarska 74, 041 20, Košice, Slovenská Republika,

kolcun.michal@gmail.com



Obr. 10 Denný priebeh dodanej/odoberanej energie s uvažovaním strát