

Tomáš Košícký, Ľubomír Beňa, Michal Kolcun, ml.

## Analýza využiteľnosti systémov akumulácie energie pre frekvenčnú reguláciu

Možnosť dynamického uskladňovania energie, ako prídavná funkcia FACTS regulátorov umožňuje kontrolovať toky činného a jalového výkonu v mieste pripojenia zdroja k sústave. Dynamická kontrola činného ako aj jalového výkonu prebieha nezávisle od seba. Reguláciou jalového výkonu je zabezpečená kontrola napätia a stability siete s veľkou dynamickou odozvou. Integrácia možnosti uskladňovania energie v chemickej forme do zásobníkov má potenciál priniesť značné výhody prevádzkovateľom prenosových a distribučných sietí. Zvyšujúci sa podiel distribuovanej výroby, sčasti založený na zdrojoch obnoviteľnej energie vedie k potrebe uskladňovania energie pre potreby poskytovania podporných služieb, umožňujúcich spoľahlivú, cenovo výhodnú a kvalitnú dodávku elektrickej energie

Kľúčové slová: BESS, EOL, SOC, DOD, VSC, STATCOM.

The possibility of dynamic energy storage such as auxiliary function FACTS regulator offers to control flows of active and reactive power in an attachment point to the system. Dynamic control of active and reactive power is running independently from each other. Reactive regulation power provides voltage control and network stability with a huge dynamic response. Integration possibilities of energy storage in a chemical form into the storages, has a potential to bring significant advantages for the transmission operators and distributional networks. Increasing distributed share production, which is based in part on the renewable energy sources, leads to the storage need for some needs that offer supporting services and allow reliable, cost – effective and quality electricity supply.

Keywords: BESS, EOL, SOC, DOD, VSC, STATCOM.

### I. ÚVOD

Sled výkonových rezerv je určený na to, aby si vedeli poradiť s náhlymi, neočakávanými výpadkami vo výrobe alebo v prenose elektrickej energie alebo s prudko vzrastajúcim zaťažením. Primárna, sekundárna a terciárna regulačná rezerva sú k dispozícii postupne podľa časovej dispozície rezervy. Primárna regulácia činného výkonu udržiava rovnováhu medzi výrobou a spotrebou elektriny v rámci synchronnej oblasti pomocou regulátorov otáčok alebo činného výkonu zariadenia poskytujúceho PpS. Spoločnou činnosťou všetkých prepojených elektrizačných sústav má primárna regulácia činného výkonu za cieľ prevádzkovú bezpečnosť energetického systému v synchronnej oblasti a stabilizuje systémovú frekvenciu na rovnovážnej hodnote po poruche v časovom rámci sekúnd, ale bez toho, že by obnovila žiadanú hodnotu systémovej frekvencie a plánovaných výmen činných výkonov (salda). Za rok 2013 predstavoval príspevok Slovenska v rámci spoločnej prenosovej siete UCTE 29 MW [1].

Akumulačné batériové systémy by pritom mali absorbovať alebo dodávať energiu podľa rovnakých požiadaviek ako súčasný poskytovateľ PRV (Primárneho regulačného výkonu) v reálnom čase bez omeškania charakteristického pre točivé stroje. Frekvenčný rozsah pôsobenia primárnej regulácie činného výkonu predstavuje  $\Delta f = \pm 200$  mHz a pásmo necitlivosti regulátora činného výkonu zariadenia poskytujúceho primárnu reguláciu zostane zachované na hodnote  $\eta < \pm 10$  mHz <49,99; 50,01>. Pre porovnanie zmeny životnosti budeme vyhodnocovať aj model primárnej regulácie pri necitlivosti  $\eta < \pm 20$  mHz <49,98; 50,02> [2].

Systémy akumulácie energie (BESS) pripojené na sekundárnej strane cez fázu transformátora k distribučnej sieti predstavujú alternatívu k tradičnej stratégii udržiavania primeraného okraja pohotovostnej zálohy na zmiernenie frekvenčných výkyvov. V reakcii na frekvenčné odchýlky môžu systémy pre akumuláciu energie dodávať primárny regulačný výkon (primárnu rezervu), teda stanovenú energiu rozloženú do niekoľkých cyklov tak, aby umožnila

ostatným zálohám (sekundárna regulácia) pripojiť sa k sieti. Navyše, akumulácia energie umožňuje prevádzkovateľovi prenosovej siete znížiť alebo odstrániť potrebu nákupu podporných služieb primárnej regulácie poskytovanú konvenčnými poskytovateľmi.

Systémy FACTS s akumuláciou kombinujú úschovu elektrickej energie vo vysokonapäťových lítiovo-ionových batériách so statickým kompenzátorom jalového výkonu na kompenzáciu jalového výkonu a dynamickú reguláciu napätia. Technológia Voltage Source Converter (VSC) má výhodu v tom, že je schopná takmer okamžite zmeniť pracovný bod, teda môže pracovať v štyroch kvadrantoch a riadiť nezávisle činný a jalový výkon. STATCOM s akumuláciou energie môže regulovať jalový výkon ako bežné SVC, ako aj činný výkon vďaka batériám, čo môže byť využité ako podpora dynamickej stability distribučnej siete najefektívnejšou kombináciou činného a jalového výkonu [3].

### II. NÁVRH SYSTÉMU AKUMULÁCIE PRE REGULÁCIU FREKVENCIE

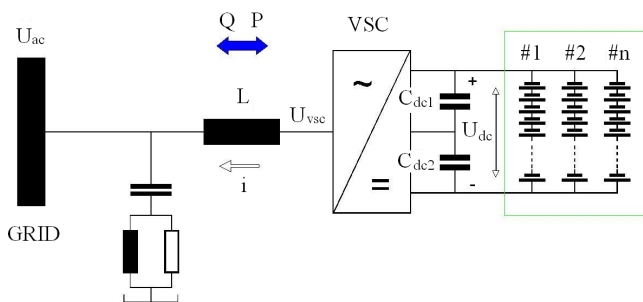
Ako je už známe, STATCOM je statický synchronný kompenzátor využívaný ako regulátor jalového výkonu. So STATCOMom sa môže absorbovaný jalový výkon postupne meniť, pričom na rozdiel od systémov SVC neobsahuje žiadne mechanické spínacie prvky, v dôsledku čoho je schopný čeliť oveľa rýchlejšími zmenám, napríklad napätia, rýchlou zmenou toku jalového výkonu.

Akumulácia energie, ktorá môže byť súčasťou STATCOM, je založená na reťazi batérií. Pretože je potrebné vysoké množstvo energie a požadovaný čas vybíjania/nabíjania je v rozpätí od niekoľko minút do niekoľko hodín [4,5], sú batérie zapojené do série kvôli dosiahnutiu požadovaného napätia a následne paralelne kvôli požadovanému výkonu. Obr. 1 ilustruje systém STATCOM s BESS, ktorý pozostáva z VSC a zo sériovo zapojených radov batérií na jednosmernej strane pre dosiahnutie vyššieho výkonu. Každý rad batérií pozostáva zo sériovo zapojených batérií za účelom dosiahnutia požadovanej napäťovej hladiny.

Ak za minimálnu požiadavku považujeme usporiadať batérie tak, aby dodávali/odoberali  $\pm 2$  MW činného výkonu počas 15 minút, potom minimálna kapacita energie systému batérií s prihliadnutím na 50 % rezervu kapacity je 2 MWh. Úroveň nabitia systému (SOC) je udržiavaná na úrovni okolo 50 % celkovej kapacity, akumulácia energie je navrhnutá na kapacitu energie 2 MWh, aby sme zabezpečili dostatočnú rezervu pre PRV a zároveň pokryli straty kapacity.

Vybíjací výkon článku batérie predstavuje 146 W na jeden článok. Pre kapacitu energie 2 MWh je potrebné minimálne množstvo článkov batérie 13 698 [7].

Paralelné reťazce batérií poskytujú menovité jednosmerné napätie na konvertore a prúd potrebný v čase vybijania. Nainštalované články batérií v počte 13 698 sú potom rozdelené do dvoch radov. V nami uvažovanom prevedení predstavuje inštalovaná kapacita systému batérií 2 MWh.



Obr. 1. Schematické znázornenie systému STATCOM s BESS

Ak berieme do úvahy podmienky poskytovania PRV, maximálny výkon musí byť k dispozícii najviac 15 minút, po ktorých bude aktivovaná sekundárna regulácia frekvencie. Z hľadiska funkcie prenosovej siete môže systém uskladňovania s obmedzenou schopnosťou akumulácie vyžadovať časté zásahy pre meniace sa stupne výkonu tak, aby nedošlo k uloženiu príliš veľkého výkonu na jednej strane alebo k nedostatku využiteľného výkonu na druhej strane. Zvolená metodika udržiavania systému batérií v rámci limitov SOC počítaná s 50 % rezervou, ktorá pokrýva straty kapacity batérie a s regulačným algoritmom, ktorý v každom po sebe idúcom 15 minútovom intervale vyrovnáva SOC na hodnotu 50 %.

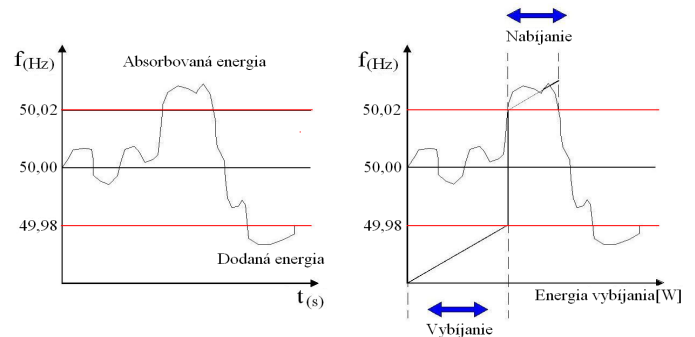
Z hľadiska batérií má obmedzovanie stupňa nabitia SOC dva hlavné dôsledky. Po prvé, každý cyklus nabíjania a vybijania bude predstavovať väčší percentuálny podiel inštalovanej energie, čo má za následok rýchlejšie využitie systému. Po druhé, pomer výkyvov hĺbky vybitia (DOD) počas nabíjania/vybíjania môže byť príliš vysoký na to, aby bol zlučiteľný s dlhodobou predikciou životnosťou batérie. Pre bežné Li-ion batérie s grafitovými negatívnymi elektródami môže viesť nabíjanie/vybíjanie pri vysokých hodnotách DOD k výraznému predčasnému starnutiu, spôsobeného procesom pokovovania lítium [8]. Prijateľný výkon pri nabíjaní/vybíjaní je funkciou typu batérie. Ďalším faktorom je, že systémy BESS môžu byť ľahšie vo vyváženom stave, ak dokážu dodať energiu viacnásobnej hodnoty pri čo najmenšom výkyve do kladných alebo záporných DOD.

### III. VÝKONOVO-FREKVENČNÁ CHARAKTERISTIKA SYSTÉMU AKUMULÁCIE

Obr. 2 zobrazuje priebeh frekvencie (vľavo) v čase a charakteristiku výkonu primárnej regulácie frekvencie (vpravo). V čase, keď je frekvencia v pásme necitlivosti, je pomer nabíjania/vybíjania z batérie nulový. Ak frekvencia prekročí pásmo necitlivosti v hornej hranici, batéria sa nabíja. Ak je frekvencia pod spodným limitom pásma necitlivosti, batéria sa vybijá.

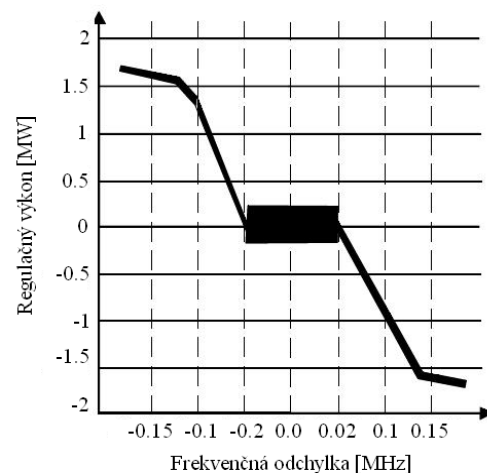
Kým výchylka frekvencie s ohľadom na nominálnu frekvenciu 50 Hz môže byť kladná alebo záporná, akumulácia batérie SOC by mala byť v pozícii, keď hocikedy umožňuje vybijanie ( $f(t) < 49,99$ Hz),

ako aj nabíjanie ( $f(t) > 50,01$ Hz). Z tohto dôvodu predstavuje bežná úroveň nabitia batérie SOC 50 %. Je to preto, lebo po cykle vybijania sa môžu objaviť iné následné cykly vybijania a akumulácia batérie môže skončiť úplne vybitá a úroveň SOC dosiahne potom hranicu SOC<sub>min</sub>. Podobne sa môže objaviť niekoľko za sebou nasledujúcich cyklov a akumulácia batérie dosiahne úroveň SOC<sub>max</sub>.



Obr. 2. Operačný princíp nabíjania a vybijania batérie

Treba si všimnúť, že operácie v strede na obr. 3 sú spôsobené tým, že frekvencia neprešla po celý čas cez pásmo necitlivosti. Tieto operácie predstavujú pri pásme necitlivosti  $\eta < \pm 10$  mHz 57,44 % celkového počtu cyklov, pri pásme necitlivosti  $\eta < \pm 20$  mHz 77,28 % celkového počtu cyklov. Operácie v pásme necitlivosti nie sú započítané do strát kapacity. Udržať batérie v strede pásma SOC si vyžaduje samostatný výkon na vybijanie alebo nabíjanie, keď je frekvencia v pásme necitlivosti alebo keď je úroveň SOC mimo úrovně tolerancie, čo je v tomto prípade predpokladaná hodnota 45 % až 55 %.



Obr. 3. Výkonovo-frekvenčná charakteristika

Ako vidíme na obr. 4, v analyzovanom týždni bol BESS vo väčšine prípadov v pásme, kde hodnota SOC prekročila hodnotu 55 %, čo je spôsobené tým, že sa odchýlky frekvencie vyskytujú prevažne v intervale  $f(t) > 50,00$ Hz.

Ak sa frekvencia nachádza v pásme necitlivosti, výkon batérie má hodnotu zodpovedajúcu úrovni nabitia batérie, ktorá je v našom modeli udržiavaná na úrovni 45-55 % SOC.

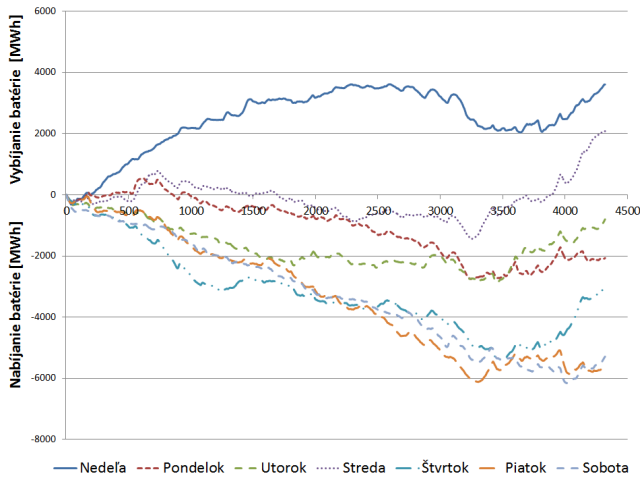
Dodaný regulačný výkon  $f(t) < 49,99$  Hz:

$$P_{\text{dod}} = \int_1^{900} P_{\text{dod}}(t) dt$$

Odoberaný regulačný výkon  $f(t) > 50,01\text{Hz}$ :

$$P_{\text{odob}} = \int_1^{900} P_{\text{odob}}(t) dt$$

Podobne, keď sa frekvencia nachádza v pásme necitlivosti a ak je úroveň nabitia batérie pod minimálnou hodnotou, čo je v tomto prípade 45 %, batéria sa nabíja podľa SOC tak, aby v nasledujúcom 15 minútovom intervale dosiahla vyvážený stav. Rovina nulového výkonu na náčrte nepretržite stúpa a klesá, vytvárajúc tak čiernu plochu na obr. 3.



Obr. 4. Úrovně SOC za analyzovaný týždeň

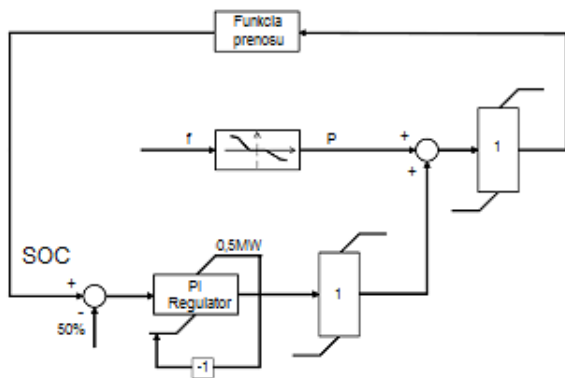
Veľkosť SOC je daná vzťahom:

$$SOC_{\text{avg}} = \frac{1}{\Delta t} \int_{t_{n-1}}^{t_n} SOC(t) dt$$

Úrovně SOC na obr. 4 v analyzovanom týždni sa nachádzajú medzi 5 % a 95 % hodnoty kapacity batérie, čím je splnená podmienka použiteľnosti pre dodávku primárneho regulačného výkonu. Akumulácia batérie  $\pm 2\text{MW}$  je dostatočná pre reguláciu frekvencie v oblasti našou simuláciou.

**IV. ZAVEDENIE REGULAČNÉHO OBVODU SOC**

Obr. 5 zobrazuje zavedenú reguláciu SOC, kde  $f$  je frekvencia elektrizačnej sústavy,  $P$  je výkon podľa charakteristík v Tab. I a SOC je úroveň nabitia.



Obr. 5. Regulačný obvod úrovně nabitia

Na vyhodnotenie väčších SOC výkyvov je potrebné nebrať do

úvahy si menšie výkyvy kapacity v pásme necitlivosti. Úroveň filtrovania (ignorovania výkyvov kapacity) samozrejme ovplyvní výsledky. Zahŕnutie úrovne filtrovania v pásme necitlivosti nám pokrýva straty súvisiace s udržaním systému na úrovni 50 % SOC. Za účelom udržania úrovne pracovného bodu SOC je celkový výkon  $P_{\text{ext}}(t)$  počítaný ako suma  $P_{\text{AS}}(t)$  (ancillary service) a signálu pracovného bodu BESS  $P_{\text{WP}}(t)$  (working point).

$$P_{\text{ext}}(t) = P_{\text{AS}}(t) + P_{\text{WP}}(t) \quad [9]$$

Výsledný výkon je počítaný ako rozdiel medzi maximom a minimom SOC dosiahnutým v časovom intervale 15 minút, ktorý môže byť neskôr vyjadrený ako výkon  $PAS(t)$  pri jednotke kapacity [MW/ MWh].

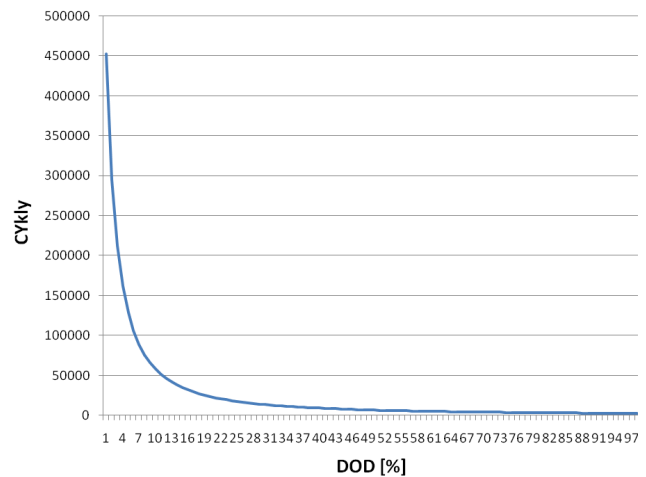
**V. ŽIVOTNÝ CYKLUS LI-ION BATÉRIE**

Batérie degradujú predvídateľne, keď sú podrobené riadeným opakovaným cyklom vybíjania a nabíjania. Obr. 6 zobrazuje krivku životnosti cyklu Saft Li-ion systému batérií založenom na hĺbke vybíjania DOD za každý cyklus [6,7].

Výpočet straty kapacity je daný závislosťou:

$$y = 2498 \cdot x^{-1483} ; R^2 = 0,999$$

kde  $R^2$  je reálna zložka udávajúca hĺbku vybitia batérie DOD a  $y$  je počet cyklov prislúchajúcich k hodnote DOD.



Obr. 6. Životný cyklus batérií

Suma strát kapacity:

$$EOL_{\text{celkova}} = \sum EOL_{(\text{CYK}1)} + EOL_{(\text{CYK}2)} + \dots + EOL_{(\text{CYK}(n))}$$

Výpočet úrovne energie batérie (SOE):

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

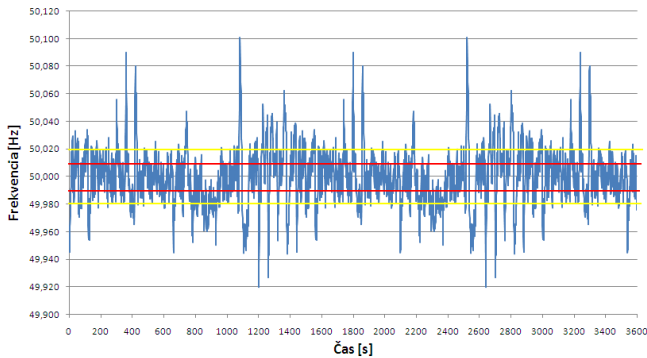
$$SOE(t_i) = SOE(t_{i-1}) + [\Delta E(t_i) / \text{Battery\_rating}(\text{MWh})]$$

Výpočet konca kapacity v dňoch:

$$EOL = 100 - EOL(50) / EOL(t)$$

**VI. ANALÝZA PRIEBEHU REGULÁCIE FREKVENCIE POUŽITÍM BESS**

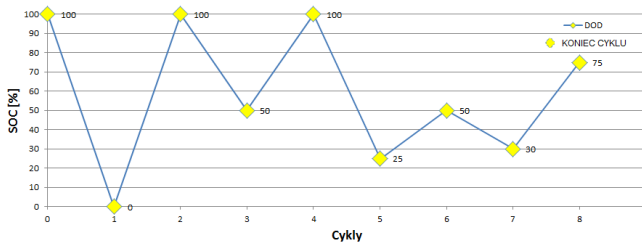
V analyzovanom týždni 37/2012 sme aplikovali výpočet pre každý deň zvlášť, pričom sme porovnávali zavedenie dvoch pásiem necitlivosti <49,99; 50,01> ; <49,98; 50,02>. Obr. 7 zobrazuje hodinový priebeh analyzovanej frekvencie.



Obr. 7. Hodinový priebeh analyzovanej frekvencie

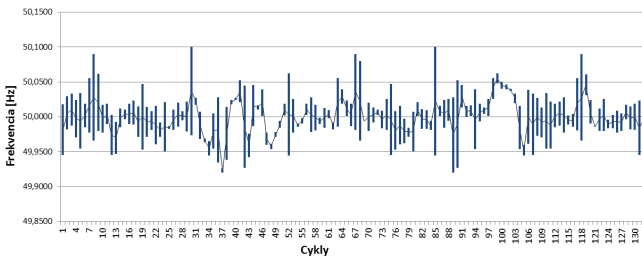
Na obr. 9 vidíme priebeh frekvencie rozdelený algoritmom na jednotlivé cykly, kde koniec cyklu je vždy ohraničený zmenou hodnoty frekvencie stúpaním alebo klesaním obr. 8.

$$\begin{aligned}
 f_{(t)} > 50,01\text{Hz} & \quad f_{(t)} < f_{(t+1)} \rightarrow \text{cyklus } '+- \\
 f_{(t)} < 49,99\text{Hz} & \quad f_{(t)} > f_{(t+1)} \rightarrow \text{cyklus } '- \\
 & \quad f_{(t)} > f_{(t+1)} \rightarrow \text{cyklus } '- \\
 & \quad f_{(t)} < f_{(t+1)} \rightarrow \text{cyklus } '+
 \end{aligned}$$



Obr. 8. Identifikácia cyklov v závislosti na SOC

Pre lepšiu predstavivosť je na obr. 9. vykreslených len 30 najväčších cyklov analyzovanej hodiny.



Obr. 9. Rozdelenie priebehu frekvencie do cyklov

V rámci jedného cyklu nám rozdiel odchýlok systémovnej frekvencie  $\Delta f$  podľa Tab. I udáva hodnotu aktivovaného primárneho regulačného výkonu.

Odhadovaná životnosť batérií na základe identifikovania subcyklov potom vychádza z grafu priebehu životnosti batérie na Obr. 6, kde je každému cyklu na základe jeho DOD priradená strata

kapacity. Súčet jednotlivých strát kapacít potom tvorí celkovú stratu kapacity BESS. Je dôležité uviesť si, že táto hodnota neustále klesá a klesá aj celkový disponibilný výkon systému.

TABUĽKA I

Závislosť regulačného výkonu od systémovej odchýlky frekvencie

Čas aktivácie [s]	Kladna odchylka systémovej frekvencie [Hz]	Zaporna odchylka systémovej frekvencie [Hz]	Aktivovaný regulačný výkon bez BESS [MW]	Aktivovaný regulačný výkon s BESS [MW]
1	50,00667	49,99333	0,9	0,07
2	50,01334	49,98666	1,8	0,13
3	50,02001	49,97999	2,7	0,20
4	50,02668	49,97332	3,6	0,27
5	50,03335	49,96665	4,5	0,33
6	50,04002	49,95998	5,4	0,40
7	50,04669	49,95331	6,3	0,47
8	50,05336	49,94664	7,2	0,53
9	50,06003	49,93997	8,1	0,60
10	50,06670	49,93330	9	0,67
11	50,07337	49,92663	9,9	0,73
12	50,08004	49,91996	10,8	0,80
13	50,08671	49,91329	11,7	0,87
14	50,09338	49,90662	12,6	0,93
15	50,10005	49,89995	13,5	1,00
16	50,10672	49,89328	14,4	1,07
17	50,11339	49,88661	15,3	1,13
18	50,12006	49,87994	16,2	1,20
19	50,12673	49,87327	17,1	1,27
20	50,13340	49,86660	18	1,33
21	50,14007	49,85993	18,9	1,40
22	50,14674	49,85326	19,8	1,47
23	50,15341	49,84659	20,7	1,53
24	50,16008	49,83992	21,6	1,60
25	50,16675	49,83325	22,5	1,67
26	50,17342	49,82658	23,4	1,73
27	50,18009	49,81991	24,3	1,80
28	50,18676	49,81324	25,2	1,87
29	50,19343	49,80657	26,1	1,93
30	50,20010	49,79990	27	2,00

Ak budeme brať do úvahy, že pri 50 % strate kapacity budeme musieť jednotlivé batériové články vymeniť alebo znížiť maximálny možný PRV, musíme tento parameter zohľadniť aj pri určovaní ekonomického prínosu BESS.

TABUĽKA II

Identifikovanie sub-cyklov pre pásmo <49,99–50,01Hz>

Stred SOC	Výchylka SOC	Mikrocykly za deň	Deň/strata kapacity [%]
0,01	<2%	2657	0,003215338
0,03	2~4%	1145	0,00252804
0,05	4~6%	0	0
0,07	6~8%	621	0,003832635
0,09	8~10%	151	0,001700302
0,125	10~15%	35	0,000679913
0,175	15~20%	12	0,000332519
0,25	20~30%	4	0,000199152
0,35	30~40%	0	0
0,45	40~50%	0	0
0,55	50~60%	0	0
0,65	60~70%	0	0
0,75	70~80%	0	0
0,85	80~90%	0	0
0,95	90~100%	0	0
Celková strata kapacity za deň [%]			0,012487899
Celková strata kapacity za rok [%]			4,558083193
Zostávajúci čas do -50% kapacity [roky]			10,96952335

TABUĽKA III  
Identifikovanie sub-cyklov pre pásmo <49,98–50,02Hz>

Stred SOC	Výchylka SOC	Mikrocykly za deň	Deň/strata kapacity [%]
0,01	<2%	3573	0,004323825
0,03	2~4%	712	0,001572021
0,05	4~6%	0	0
0,07	6~8%	261	0,001610818
0,09	8~10%	58	0,000653096
0,125	10~15%	15	0,000291391
0,175	15~20%	4	0,00012107
0,25	20~30%	2	9,05482E-05
0,35	30~40%	0	0
0,45	40~50%	0	0
0,55	50~60%	0	0
0,65	60~70%	0	0
0,75	70~80%	0	0
0,85	80~90%	0	0
0,95	90~100%	0	0
Celková strata kapacity za deň [%]			0,008662769
Celková strata kapacity za rok [%]			3,161910616
Zostávajúci čas do -50% kapacity [roky]			15,81322374

Tabuľky II a III zobrazujú rozdelenie cyklov podľa výchyliek SOC pre analyzovaný deň 9.9.2012, kde rozdiel medzi pásmami necitlivosti spôsobí posunutie cyklov smerom k nižším výchylkám SOC, a tým aj k menším stratám kapacity.

## VII. ZÁVERY

Z tejto analýzy vyplýva, že uskladňovanie energie v batériových systémoch predstavuje efektívny spôsob poskytovania primárneho regulačného výkonu. Zavedenie pásma necitlivosti frekvencie a SOC regulačného obvodu uchováva batérie v rámci primeraného pásma úrovne nabitia a minimalizuje dopad na životnosť batérií. Odhadovaná strata životnosti batérií na 50 % kapacity sa pri zväčšení pásma necitlivosti z  $\eta < \pm 10$  mHz <49,99; 50,01> na  $\eta < \pm 20$  mHz <49,98; 50,02> zvýšila z 10,9 roku na 15,8 roku. Počet cyklov v pásme necitlivosti z 57,44% na 77,28% pri  $\eta < \pm 20$  mHz.

V našej analýze sme sa nevenovali vyčísleniu ekonomického prínosu BESS zariadení. S predpokladaným znižovaním cien za

jednotku inštalovanej elektrickej kapacity a zvyšovaním hustoty elektrickej energie uloženej v batériových systémoch predpokladáme v nasledujúcich rokoch širšie nasadenie systémov BESS v elektrizačnej sústave.

V nasledujúcich prácach sa budeme venovať spôsobom, ako zlepšiť základné algoritmy prezentované v tomto článku, a to najmä s prihliadnutím k poplatkom za držanie a poskytovanie primárnej regulačnej rezervy.

## POĎAKOVANIE

Túto prácu podporila Vedecká grantová agentúra Ministerstva školstva, vedy, výskumu a športu Slovenskej republiky a Slovenskej akadémie vied projektom VEGA 1/0388/13.

## LITERATÚRA

- [1] Technické Podmienky Prístupu a Pripojenia, Pravidlá Prevádzkovania Prenosovej Sústavy, SEPS 2012
- [2] B. J. Kirby, " Frequency Regulation Basics and Trends," DOE report TM-2004/291, 2004
- [3] EPRI-DOE Handbook, "Energy Storage for Transmission and Distribution Applications", Dec 2003.
- [4] A. Nourai. (2003, Dec.). Comparison of the Costs of Energy Storage Technologies for T&D Applications [Online]. Available: <http://electricitystorage.org/pubs/2004/EPRIDOE%20Storage%20Costs-ESA.pdf>
- [5] J. Svensson and W. Hermansson, " Dynamic Energy Storage using SVC Light," Cigré conference Paris, France, August 24-19, 2008.
- [6] Proceedings of Electrical Energy Storage Applications and Technologies (EESAT) Oct 2009, Seattle.
- [7] IEEE Draft Recommended Practice for the Characterization and Evaluation of Emerging Energy Storage Technologies in Stationary Applications, IEEE Standard P1679TM/D13-2010, Jan. 2010.
- [8] IEEE Draft Recommended Practice for the Characterization and Evaluation of Emerging Energy Storage Technologies in Stationary Applications, IEEE Standard P1679TM/D13-2010, Jan. 2010.
- [9] Power and Energy Capacity Requirements of Storages Providing Frequency Control Reserves, IEEE 2013.

## ADRESY AUTOROV

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

[tomas.kosicky@tuke.sk](mailto:tomas.kosicky@tuke.sk)

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

[lubomir.bena@tuke.sk](mailto:lubomir.bena@tuke.sk)

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

[kolcun.michal@gmail.com](mailto:kolcun.michal@gmail.com)