

Tomáš Košícký, Michal Kolcun, ml., Ľubomír Beňa

Vplyv udržania hodnoty nabitia batériových systémov na kvalitu regulačného výkonu

Batériové systémy v prenosových sústavách sú schopné poskytovať podporné sieťové služby, ako je napríklad primárna regulácia frekvencie, regulácia napätia v uzloch siete alebo štart z tmy. Kapacita batériových systémov (BESS) je často najlimitujúcejším faktorom pre ich širšie využitie pre frekvenčnú reguláciu. Z tohto dôvodu je nutné prispôsobiť požadovanú hodnotu nabitia systému *SoC* a výkon batériových systémov tak, aby spĺňali rovnaké podmienky ako tie, ktoré sú kladené na konvenčných poskytovateľov primárnej regulácie frekvencie. Tento článok sa venuje možnostiam využitia a stability batériových systémov a ich schopnosti podieľať sa na trhu s podpornými službami.

Kľúčové slová: podporné služby; regulácia frekvencie; systémy akumulácie elektrickej energie (BESS); úroveň nabitia batérie (*SoC*).

I. ÚVOD

Podiel primárneho regulačného výkonu Slovenskej republiky v rámci spoločnej prenosovej siete ENTSO-E predstavuje ± 29 MW [1]. Podľa technických podmienok prevádzkovateľa prenosovej siete (TSO) SEPS je maximálny podiel nákupu primárneho regulačného výkonu (PRV) zo zahraničia 30 % [2]. Podiel PRV ± 8 MW v súčasnosti predstavuje import zo susedných prenosových sietí. Z hľadiska zabezpečenia stability dodávky primárneho regulačného výkonu sa stáva problematickým nahradiť niektoré v minulosti odstavené bloky elektrární ako napríklad jadrovú elektráreň Jaslovské Bohunice alebo paroplynovú elektráreň Malženice. Ďalej dochádza u existujúcich zariadení rezerváciou výkonu a následným poskytovaním PRV k znižovaniu životnosti generátorov. V rámci európskeho prenosového systému ENTSO-E existuje tlak na vytvorenie spoločného trhu s primárnou regulačnou energiou, čo ovplyvní aj ekonomickú efektívnosť nasadzovania klasických točivých zdrojov pre poskytovanie PRV.

V prepojenom prenosovom systéme musí byť výroba a spotreba elektrickej energie v každom okamihu vyvážená. Táto rovnováha medzi výrobou a spotrebou sa uskutočňuje pomocou regulátora činného výkonu (resp. otáčok) zariadenia poskytujúceho PpS. Korektor frekvencie ASDR turbíny prispôsobuje činný výkon zariadenia poskytujúceho PpS [2].

Schémy riadenia prenosovej sústavy musia byť schopné zvládnuť nepredvídané udalosti, ako sú napríklad výpadok vedenia alebo regulačného bloku. Ak nastane výkonová odchýlka, zmenia generátory podľa systémovej frekvencie f svoje pracovné body tak, že so zvyšujúcou sa produkciou znižujú svoj výkon alebo s klesajúcou frekvenciou zvýšia výkon generátorov. Zotrvačnosť rotujúcich mäs generátorov definuje rýchlosť zmeny frekvencie pri výkonových odchýlkach a zároveň chráni systémovú frekvenciu od náhlych skokov. V európskej prenosovej sieti sa uplatňuje 3 stupňová regulácia:

1) Primárna regulácia, distribuovaná schéma riadenia rozdeľuje výkon generátorov proporcionálne k výkyvu frekvencie voči nominálnej frekvencii siete.

2) Sekundárna regulácia je centrálné riadená systémová služba udržiavajúca saldo elektrizačnej sústavy SR a frekvenciu ES v rámci zadaných hodnôt.

3) Terciárna regulácia, ktorá je aktivovaná manuálne je centrálné koordinovaná systémová služba, ktorej cieľom je podporovať udržiavanie potrebnej zálohy pre sekundárnu reguláciu výkonu.

Podobné schémy riadenia sa používajú takmer vo všetkých prenosových sústavách.

Spomenutá schéma riadenia garantuje bezpečnosť a spoľahlivosť európskej siete. Ak uvažujeme s narastajúcim podielom obnoviteľných zdrojov, bude v budúcnosti nevyhnutné vyriešiť adekvátnosť nasadenia točivých strojov pre poskytovanie primárneho regulačného výkonu a síce z dvoch dôvodov:

1) Elektrárne, ktoré sa zúčastňujú na primárnej regulácii majú v intervale do 30 sekúnd zareagovať na odchýlku frekvencie. Odchýlku zotrvačnosti poskytovaného PRV vyhodnocuje prevádzkovateľ siete v 30-minútových intervaloch. Obnoviteľné zdroje majú väčšinou malú alebo žiadnu rotačnú zotrvačnosť, pretože sú pripojené k sieti cez napäťové meniče. Pri zvyšovaní sa výkonu obnoviteľných zdrojov dochádza k redukcii zotrvačnosti v rámci siete a rýchlejšej skokovej zmene systémovej frekvencie. Predpokladá sa, že tieto rýchle zmeny rámp (ramp rates) generátorov poskytujúcich primárnu reguláciu prispievajú k zníženiu frekvenčných odchýlok [3].

2) Predpokladajme, že máme systém s veľkým pomerom obnoviteľných zdrojov. Konvenčné generátory poskytujú podporné služby, aj keď je dostatočná produkcia energie obnoviteľných zdrojov, ktoré by mohli na seba prevziať časť poskytovaného regulačného výkonu. Táto situácia je v rozpore s cieľom hospodárneho využitia dostupných zdrojov a znižovania emisií oxidu uhličitého. Taktiež generátory poskytujúce frekvenčnú reguláciu majú zvyčajne nižšiu efektívnosť ako generátory s pracovným bodom pri maximálnom výkone [4].

Signál podpornej služby primárnej regulácie v priebehu času väčšinou nie je v okolí pásma necitlivosti $\eta < \pm 10$ mHz. Preto batérie majú dostatok času nabíjať sa alebo vybíjať počas dlhšej časovej periódy a tým dorovnať svoju úroveň nabitia *SoC*. Dôležité je zvoliť vhodnú stratégiu znovunabíjania, ktorá bude garantovať, že v každom časovom intervale bude systém akumulácie BESS schopný kopírovať signál podporných služieb. Táto stratégia je podrobne rozpisovaná v kapitole 3.

V tomto článku sa zameriavame na batériové systémy a možnosti udržania ich úrovne nabitia v optimálnom pásme *SoC* v čase, keď je systém aktívny, pričom využívame prevádzkovateľom siete dovolené odchýlky medzi požadovaným a skutočným výkonom primárnej regulácie. Analýzou dát v priebehu kalendárneho týždňa 37/2012 sme sa snažili dokázať vhodnosť nami navrhnutej stratégie udržania systémovej stability BESS. Porovnali sme týždenný vývoj *SoC* pri dorovnávaní úrovne nabitia - v prvom prípade pri maximálnom možnom dorovnaní bez ohľadu na kvalitu poskytovanej služby primárnej regulácie. Táto stratégia je vhodná, ak je poskytovateľ PRV súčasťou väčšej bilančnej skupiny alebo samostatným vývodom dokáže stabilizovať úroveň nabitia batérií. V druhom prípade sme obmedzili hodnoty dobijacieho výkonu *Frame of Charge (FoC)*,

Frame of Discharge (FoD) tak, aby boli splnené podmienky kvality PRV.

II. STRATÉGIE UDRŽANIA ÚROVNE NABITIA

V minulosti sa uvažovalo s rôznymi stratégiami udržania úrovne nabitia BESS. V nasledujúcom texte je uvedený ich krátky prehľad.

Plánované dobíjanie. Kunich [4] popisuje pilotný projekt pre akumuláciu systém poskytujúci frekvenčnú reguláciu v ostrovnom systéme „West-Berlin“. Zo skúseností získaných na tomto projekte, bolo navrhnuté nabíjanie trikrát týždenne počas nízkej prevádzky (v časoch, keď batérie neposkytujú PRV). Iný pilotný projekt prezentovaný Swierczynskym [9] využíva fakt, že v Dánsku je oddelene obchodovaná ponuka pre kladnú a zápornú primárnu regulačnú rezervu. Preto sa pontúka iba kompenzovanie kladných výkyvov a znovunabíjanie sa uskutočňuje vtedy, ak systém prekročí limity SoC .

Znovunabíjanie v pásme necitlivosti. Primárna frekvenčná regulačná rezerva sa aktivuje po prekročení pásma necitlivosti nominálnej frekvencie. V kontinentálnej Európe je pásmo necitlivosti definované v rámci ± 10 mHz od nominálnej frekvencie 50 Hz. Podľa stratégie Oudalov [5] a Mercier [6] sa batérie nabíjajú alebo vybíjajú v čase, keď je systémová frekvencia v rámci pásma necitlivosti. Mimo pásma necitlivosti výkon kopíruje systémovú frekvenciu bez prispôbenia sa požadovanej hodnote SoC . Podľa tohto prístupu, batérie poskytujú presne očakávaný výkon pri odchýlke systémovej frekvencie od nominálnej hodnoty, čo ale v hraničných prípadoch môže znamenať, že limity SoC_{min} , SoC_{max} nemusia byť udržiavané. Oudalov [5] ukazuje, že SoC zostáva v rámci limitov počas jedného mesiaca simulácie na základe historických údajov.

On-line nabíjanie. V poslednej dobe boli publikované dve stratégie, spoliehajúce sa na on-line vyrovnávanie žiadaných hodnôt SoC . Borsche [7] a Megel a kol. [8] uvažujú s prispôbením dynamiky off-setu signálu sieťovej frekvencie tak, aby bola zaistená spoľahlivosť poskytovania služby PRV. Regulácia potom nerešpektuje definitívne signál požadovaného PRV, ale využíva skutočnosť, že je prípustné, aby elektrárne vykonávali zmeny v dodávanom regulačnom výkone po ohlásení tejto zmeny prevádzkovateľovi prenosovej sústavy (Transmission System Operator). Megele a kol. [8] navrhuje prispôbenie pracovného bodu kedykoľvek, ak batérie dosiahnu určitú úroveň SoC . Nastavenie pracovného bodu prebieha pomocou rámp s obmedzeným nábehom a tiež s časovým oneskorením, aby bolo možné zabezpečiť off-setovú energiu z alternatívneho zdroja v rámci jednej bilančnej skupiny. Problémom navrhovanej stratégie je nepresnosť merania hladiny SoC a nelineárne správanie sa batérii v blízkosti limitov SoC . Prístup Theodora Borsche [7] je podobný ako v prípade stratégie *On-line nabíjania*, ale používa kľavý priemer pre dobíjanie batérii a určenie strát počas nabíjania a vybíjania. Ak P^1 je požadovaná hodnota primárneho regulačného výkonu, ktorý je vypočítaný z odchýlky systémovej frekvencie Δf a S predstavuje statiku korektora frekvencie, potom:

$$P^1 = -\frac{1}{S} \Delta f$$

Výstupný výkon batérie P^{bat} sa potom prispôbi pomocou offsetu P^{off}

$$P^{off}(k+d) = \frac{1}{a} \sum_{j=k-a}^k (P^{loss}(j) - P^1(j))$$

$$P^{bat} = P^1 + P^{off}$$

Parameter a definuje čas priemerovania. Jeho zvýšením sa znižuje nábehová hrana off-setu a tým aj nábeh požadovanej hodnoty služby poskytujúcej dobíjanie energie. Premenná d je oneskorenie, ktoré by mohlo byť užitočné v prípade, ak je regulačný výkon zazmluvnený na intra-day trhu. Hodnota P^{loss} sú straty batérie, ktoré možno merať alebo predikovať.

Nabíjanie v rámci aktívnych bodov. Stratégia nabíjania v rámci aktívnych bodov vychádza z predpokladu efektívneho využitia času,

keď je systém aktívny a zároveň je prekročené pásmo necitlivosti $\eta \pm 10$ mHz. Využitím dovolenej odchýlky požadovaného a skutočného výkonu sledovanej operátorom siete, dokážeme udržať hladinu SoC_{min}/SoC_{max} v rámci limitov. Takáto schéma riadenia redukuje straty, ktoré vznikajú pri dorovnávaní hladiny SoC v pásme necitlivosti, pretože frekvenčné meniče vykazujú pri nízkych výkonoch najvyššie straty. Ďalej sme sa v rámci našej simulácie zameriavali na udržanie SoC v rámci aktívnych bodov (AF) spôsobom, ktorý nespôsobuje výrazné zníženie kapacity batérii.

V nami uvažovanom modeli sme pri simulácii poskytovania podporných služieb zvolili regulačný výkon batérii ± 2 MW, pričom z formulácie maximálnej možnej odchýlky definovanej TSO vyplýva, že rozdiel medzi skutočným a požadovaným výkonom pri takejto veľkosti zdroja je definovaný vzťahom:

$$\Delta P_{PRV} \leq 0,05 \cdot (PRR)$$

$$\Delta P_{PRV} \leq 0,2$$

V reálnej prevádzke predstavuje odchýlka vplyvom šumu generátorov pri vysokých výkonoch blokov okolo 25 % v okolí korekčnej krivky statora. V našej simulácii sme vychádzali z $\Delta P_{PRV} \leq 0,2$. To znamená, že maximálna absolútna odchýlka, ktorá definuje nabíjajúci/vybíjajúci výkon FoC , FoD nesmie prekročiť túto hodnotu a zároveň musí byť dostatočná na udržanie úrovne nabitia batériového systému v rámci limitov.

$$FoC = \left| \frac{\int_{t=1}^{t_r,k} P_{TARGET}(t) dt}{AF_{avg}} \right|$$

$$FoC \leq 0,2$$

$$FoD = \left| \frac{\int_{t=1}^{t_r,k} P_{TARGET}(t) dt}{AF_{avg}} \right|$$

$$FoD \leq 0,2$$

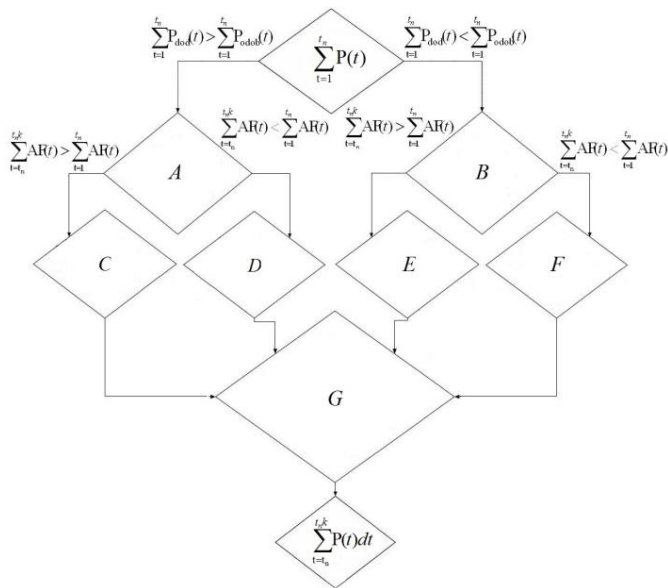
$$t \in \langle 1; 900 \rangle [s], t \in N$$

Počas celej doby simulácie nesmie skončiť systém úplné vybitie $SoC = 0$ % alebo úplné nabitie $SoC = 100$ %. Dôležité je potom definovať takú veľkosť batérie, pri ktorej nedôjde k výraznému zníženiu životnosti (kapacity) a zároveň musí mať systém schopnosť dorovnať hladinu SoC . Faktor, ktorý nevieme ovplyvniť v rámci simulácie on-line nabíjania je počet aktívnych bodov, v rámci ktorých môžeme meniť výkon BESS. Pri simulácii vychádzame z dlhodobej predikcie rozdelenia početnosti nenulových aktívnych bodov AF_{avg} :

$$\forall AF : f(AF) > \eta$$

III. PRIEBEH SIMULÁCIE

Model BESS pre Slovenskú prenosovú sústavu používa na analýzu vplyvu batérii na primárnu reguláciu frekvencie dáta z týždňového priebehu systémovej frekvencie. Obrázok 1 predstavuje vývojový diagram nami navrhnutého algoritmu vyrovnávania kladného alebo záporného výkonového salda. Pre udržanie SoC systému BESS sme zaviedli regulačný obvod, pri ktorom po prvých 15 minútach poskytovania PRV počítame s aktiváciou sekundárnej regulácie frekvencie (SRV) a odchýlka kapacity od 50 % SoC bude vyregulovaná v ďalšej štvrthodine.



Obr. 1 Vývojový diagram vyrovnávania úrovne SoC na hodnotu 50%

$$A = FoC = \frac{\int_{t=1}^{t,k} P(t) dt}{AF_{avg}}$$

$$B = FoD = \frac{\int_{t=1}^{t,k} P(t) dt}{AF_{avg}}$$

$$C = \sum_{t=1}^{t,k} P_{REAL(ODOB)}(t) = \sum_{t=1}^{t,k} P_{TARGET(ODOB)}(t)$$

$$D = P_{AB(DOD)}(t) dt = \sum_{t=1}^{t,k} P(t) dt - \sum_{t=1}^{t,k} P_{REAL(DOD)}(t)$$

$$E = \sum_{t=1}^{t,k} P_{REAL(DOD)}(t) = \sum_{t=1}^{t,k} P_{TARGET(DOD)}(t)$$

$$F = P_{AB(ODOB)}(t) dt = \sum_{t=1}^{t,k} P(t) dt - \sum_{t=1}^{t,k} P_{REAL(ODOB)}(t)$$

$$G = \Delta P(t) = \left[\sum_{t=1}^{t,k} P_{TARGET(DOD)}(t) - \sum_{t=1}^{t,k} P_{TARGET(ODOB)}(t) \right] + \left[\sum_{t=1}^{t,k} P_{AB(ODOB)}(t) + \sum_{t=1}^{t,k} P_{AB(DOD)}(t) \right]$$

Keďže batérie poskytujú regulačný výkon, až keď frekvencia prekročí hranicu necitlivosti $\eta \pm 10$ mHz, bude aj výkon potrebný na vyrovnanie kapacity aktivovaný len mimo tohto pásma. Čas, v ktorom sa systém vybíja/nabíja, označujeme AF (Active Framework). Pre každých ďalších 15 minút potom budeme dodávať jednotku výkonu FoC (Frame of Charge) alebo odoberať FoD (Frame of Discharge) na dorovnanie SoC 50 % podľa vzťahu:

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

Celkový výkon $P_{ext}(t)$ je počítaný ako suma $P_{AS}(t)$ (Ancillary Service), signálu pracovného bodu BESS $P_{WP}(t)$ (Working Point) a vyrovnávacieho výkon $P_{soc}(t)$ (State of Charge).

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

$$P_{WP}(t) = P_{\eta(bat)}(t) + P_{\eta(Pcs)}(t)$$

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

$$\sum_{t=1}^{t,k} AF_i > \sum_{t=1}^{t_n} AF_i$$

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 vzťahu:

$$P_{rk} = \left[\int_{t=+}^{t,k} P_{TARGET(DOD)} - \int_{t=1}^{t,k} P_{TARGET(ODOB)} \right] + \left[\int_{t=1}^{t,k} \Delta P_{(ODOB)} + \int_{t=1}^{t,k} \Delta P_{(DOD)} \right]$$

TABUĽKA I

Vyjadrenie strát bez zavedenia regulačného algoritmu AF

Stred SOC	Výchylka SOC	Mikrocykly	Strata kapacity [%]
0,01	<2%	17664	0,02137589
0,03	2~4%	8162	0,01802084
0,05	4~6%	349	0,00118041
0,07	6~8%	4345	0,02681610
0,09	8~10%	1146	0,01290428
0,125	10~15%	217	0,00421546
0,175	15~20%	67	0,00189365
0,25	20~30%	11	0,00053464
0,35	30~40%	1	0,00008798
0,45	40~50%	0	0,00000000
0,55	50~60%	0	0,00000000
0,65	60~70%	0	0,00000000
0,75	70~80%	0	0,00000000
0,85	80~90%	0	0,00000000
0,95	90~100%	0	0,00000000
Celková strata kapacity za týždeň [%]			0,08702926
Celková strata kapacity za rok [%]			4,87363848

TABUĽKA II

Vyjadrenie strát pri fixnom regulačnom algoritme AF_{avg}

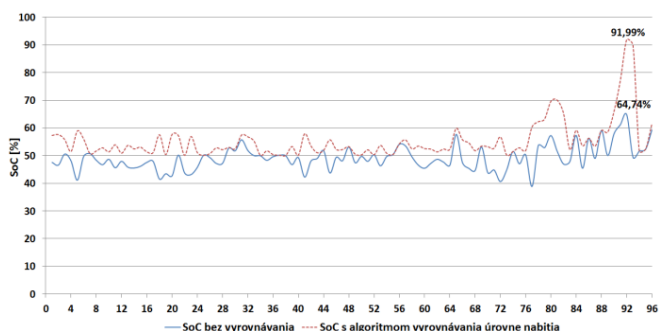
Stred SOC	Výchylka SOC	Mikrocykly	Strata kapacity [%]
0,01	<2%	18426	0,02700736
0,03	2~4%	8162	0,02175649
0,05	4~6%	0	0,00064940
0,07	6~8%	4345	0,03234421
0,09	8~10%	1146	0,01517464
0,125	10~15%	217	0,00563819
0,175	15~20%	67	0,00270527
0,25	20~30%	11	0,00055071
0,35	30~40%	1	0,00013475
0,45	40~50%	0	0,00000000
0,55	50~60%	0	0,00000000
0,65	60~70%	0	0,00000000
0,75	70~80%	0	0,00000000
0,85	80~90%	0	0,00000000
0,95	90~100%	0	0,00000000
Celková strata kapacity za týždeň [%]			0,10596101
Celková strata kapacity za rok [%]			5,93381651

Zavedenie algoritmu udržania hladiny SoC podľa vzťahu $P_{ext}(t) = P_{AS}(t) + P_{WP}(t) \pm P_{soc}(t)$ spôsobí, že výkonový príspevok P_{soc} zložený buď zo zložky nabíjania FoC alebo zložky vybíjania FoD ovplyvní absolútnu veľkosť cyklov batériového systému.

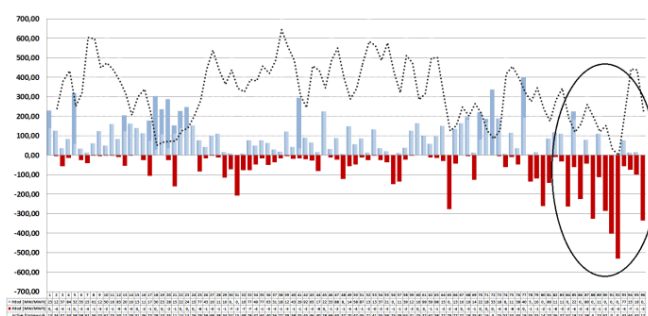
Tabuľky I a II zobrazujú zmenu vo veľkosti výchyľky hĺbky vybitia DoD a tomu zodpovedajúce zvýšenie straty kapacity. Zvýšenie straty kapacity o 1,1% za rok je zanedbateľné, ak vezmeme do úvahy nepresnosť merania a ďalšie faktory ovplyvňujúce stratu kapacity BESS.

Ako vidíme na Obr. 2, počas analyzovaného dňa bola v nami uvažovanom modeli hodnota SoC udržiavaná v rámci limitov. Počas niekoľkých 15 minútových intervalov na konci dňa spôsobila kladná výchylka systémovej frekvencie tak, že sa batérie nabíjali, systém v rámci aktívnych bodov AF nestihol postupne znížiť hladinu SoC a batérie sa postupne nabíjali na hodnotu 91,99 % kapacity. V časových

intervaloch t_n rovnom 91 a 92 neboli žiadne AF mimo pásma necitlivosti. V nasledujúcich t_n rovnom 93 a 94 pri veľkom počte aktívnych bodov systém poskytoval regulačný výkon počas trvania ktorého znížil hladinu nabitia SoC znovu na hodnotu 50 %.



Obr. 2 Vývoj hodnôt SoC počas analyzovaného dňa 13.09.2012



Obr. 3. 15-minútové hodnoty dodaného/odoberaného výkonu a Active framework

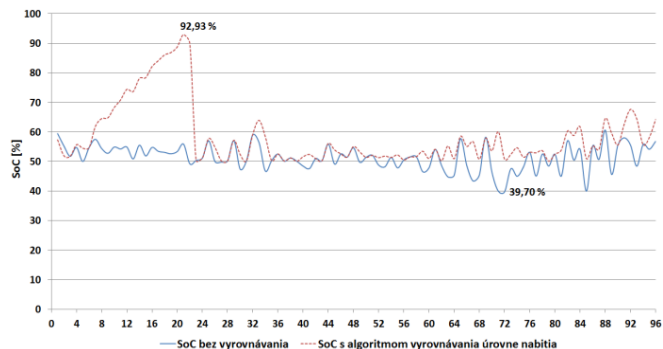
TABUĽKA III
Priebeh vyrovnávania SoC počas analyzovaného dňa

t_n [s]	Pdod [MW/MWh]	Podob [MW/MWh]	Average Framework	Active Framework [AF]	Frame of Charge [FoC]	Frame of Discharge [FoD]	SoC [%]
90	0	284,803	302	67	1,607	0	57,943
91	0	402,997	178	0	7,741	0	69,138
92	0	530,939	89	0	4,178	0	83,886
93	77,600	56,314	292	435	0	0,053	50,591
94	15,493	73,423	403	448	0,145	0	51,609
95	16,805	100,025	400	430	0,302	0	52,312
96	0	335,179	276	12	0	0	61,522

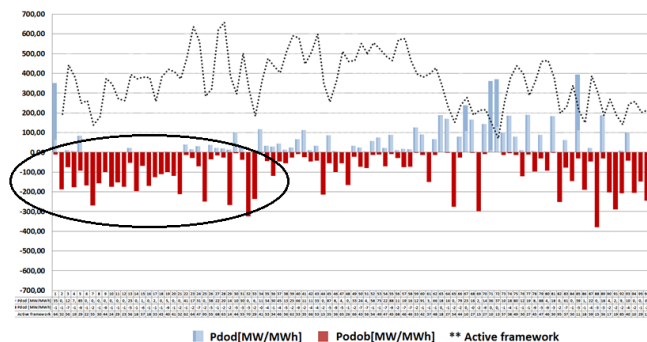
TABUĽKA IV
Priebeh vyrovnávania SoC pri obmedzení hodnoty FoC, FoD

t_n [s]	Pdod [MW/MWh]	Podob [MW/MWh]	Average Framework	Active Framework [AF]	Frame of Charge [FoC]	Frame of Discharge [FoD]	SoC [%]
90	0	284,803	302	67	0,200	0	66,053
91	0	402,997	178	0	0,200	0	77,247
92	0	530,939	89	0	0,200	0	91,995
93	77,600	56,314	292	435	0	0	89,782
94	15,493	73,423	403	448	0,145	0	51,609
95	16,805	100,025	400	430	0,200	0	52,312
96	0	335,179	276	12	0	0	61,556

Počas ďalšieho analyzovaného dňa zobrazeného na Obr. 2 v nami uvažovanom modeli sa vplyvom kladných odchýlok frekvencie systém BESS nabíjal na hodnotu 92,93 %. V časových intervaloch t_n rovnom 2 až 21 batérie takmer výlučne odoberali výkon zo siete P_{odob} . Vplyvom nerovnováhy medzi dodaným a odoberaným výkonom nastalo vyrovnanie hladiny SoC v časovom intervale t_n .



Obr. 4 Vývoj hodnôt SoC počas analyzovaného dňa 09.09.2012



Obr. 5 15-minútové hodnoty dodaného/odoberaného výkonu a Active framework

TABUĽKA V
Priebeh vyrovnávania SoC počas analyzovaného dňa

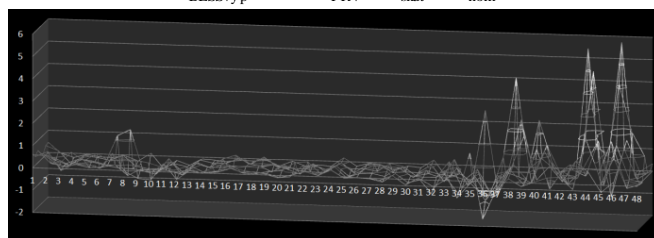
t_n [s]	Pdod [MW/MWh]	Podob [MW/MWh]	Average Framework	Active Framework [AF]	Frame of Charge [FoC]	Frame of Discharge [FoD]	SoC [%]
18	0,289	110,468	198	437	0,341	0	46,94
19	5,800	98,525	323	403	0,354	0	47,42
20	0,000	119,557	262	414	0,412	0	46,68
21	0,289	211,028	290	329	0,529	0	44,15
22	41,504	12,490	398	626	0,000	-0,086	50,81
23	17,542	28,990	337	649	0,040	0	49,68
24	31,381	71,949	284	474	0,134	0	48,87

TABUĽKA VI
Priebeh vyrovnávania SoC pri obmedzení hodnoty FoC, FoD

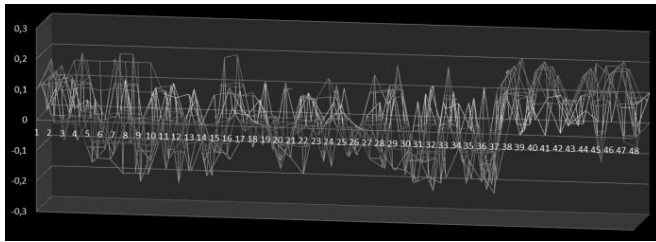
t_n [s]	Pdod [MW/MWh]	Podob [MW/MWh]	Average Framework	Active Framework [AF]	Frame of Charge [FoC]	Frame of Discharge [FoD]	SoC [%]
18	0,289	110,468	198	437	0,2	0	86,05
19	5,800	98,525	323	403	0,2	0	86,83
20	0,000	119,557	262	414	0,2	0	88,70
21	0,289	211,028	290	329	0,2	0	92,94
22	41,504	12,490	398	626	0	0	89,92
23	17,542	28,990	337	649	0,040	0	50,32
24	31,381	71,949	284	474	0,134	0	51,13

Obr. 5 a 6 zobrazujú hodnoty jednotiek výkonu FoC/FoD pre sledovaný 30 minútový interval, kde bola veľkosť vyrovnávacieho výkonu obmedzená tak, aby sa skutočné hodnoty výkonu počas vyhodnotených štvrt'hodín nachádzali v operátorom siete určenom tolerančnom pásme podľa vzťahu:

$$\Delta P_{\text{BESSvyp}} = -5 \cdot P_{\text{PRV}} \cdot (f_{\text{skut}} - f_{\text{nom}})$$



Obr. 5 Hodnoty FoC, FoD počas dvoch po sebe nasledujúcich štvrt'hodín pre analyzovaný týždeň



Obr. 6 Hodnoty FoC , FoD počas dvoch po sebe nasledujúcich štvrt'hodín pre analyzovaný týždeň pri zavedení algoritmu udržania podmienok kvality PRV

IV. ZÁVERY

V tomto článku boli rozobraté stratégie využitia batériových systémov pre primárnu reguláciu frekvencie. Bolo preukázané, že udržanie limitov SoC pritom môže byť explicitne realizované bez potreby použitia externých zdrojov v rámci operátorom siete predpísaného tolerančného pásma. Nami zavedený algoritmus nespôsobil predčasnú stratu kapacity BESS. Počas simulácie nedošlo k prekročeniu limitov SoC_{min}/SoC_{max} . Ďalej táto analýza ukázala výhody použitia batériových systémov a ich schopnosť zabezpečiť službu frekvenčnej regulácie pri rovnakých podmienkach, aké sú kladené na konvenčných poskytovateľov PRV.

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] ENTSO-E, Operation Handbook, 2009, ch. Policy 1: Load-Frequency

Control and Performance.

- [2] Technické Podmienky Prístupu a Pripojenia, Pravidlá Prevádzkovania Prenosovej Sústavy, SEPS 2012
- [3] Angel Molina-Garcia, Francois Bouard, and Daniel S Kirschen: Decentralized demand-side contribution to primary frequency control. IEEE Transactions on Power Systems, 26(1):411{419, 2011. doi: 10.1109/TPWRS.2010.2048223
- [4] H. J. Künisch, K. G. Krämer, and H. Dominik: Battery energy storage another option for load-frequency-control and instantaneous reserve. IEEE Transactions on Energy Conversion, EC-1(3):41{46, 1986.
- [5] Alexandre Oudalov, Daniel Chartouni, and Christian Ohler: Optimizing a Battery Energy Storage System for Primary Frequency Control. IEEE Transactions on Power Systems, 22(3):1259{1266, August 2007. ISSN 0885-8950. doi: 10.1109/TPWRS.2007.901459.
- [6] Pascal Mercier, Rachid Cherkaoui, and Alexandre Oudalov: Optimizing a battery energy storage system for frequency control application in an isolated power system. IEEE Transactions on Power Systems, 24(3): 1469{1477, 2009. doi: 10.1109/TPWRS.2009.2022997.
- [7] Theodor Borsche, Andreas Ulbig, Michael Koller, and Göran Andersson: Power and Energy Capacity Requirements of Storages Providing Frequency Control Reserves. IEEE PES General Meeting, Vancouver, 2013.
- [8] Olivier Mégel, Johanna L. Mathieu, and Göran Andersson: Maximizing the potential of energy storage to provide fast frequency control. 4th IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies Europe (ISGT Europe), Copenhagen, 2013.
- [9] Maciej Swierczynski, Daniel-Ioan Stroe, Ana-Irina Stan, Remus Teodorescu, Rasmus Laerke, and Philip Carne Kjaer: Field Tests Experience from 1 . 6MW / 400kWh Li-ion Battery Energy Storage System providing Primary Frequency Regulation Service. 4th IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies Europe (ISGT Europe), Copenhagen, 2013. ISBN 9781479929849.

ADRESY AUTOROV

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

tomas.kosicky@tuke.sk

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

kolcun.michal@gmail.com

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

lubomir.bena@tuke.sk