

10 kW/20 kWh 锂电池储能协同风电一次调频 备用的实验验证

李军徽¹, 范兴凯¹, 穆 钢¹, 严干贵¹, 安 军¹, 冯喜超²

(1. 东北电力大学电气工程学院, 吉林 132012; 2. 国网辽宁省电力有限公司沈阳供电公司, 沈阳 110003)

摘 要: 将风电机组的比例弃风电量作为一次调频备用基本单元, 基于电网的 15 min 一次调频备用持续输出要求, 提出储能系统最大值配置法协同风电场作为风电一次调频备用补充, 采用 10 kW/20 kWh 锂电池储能系统对锂电池参与电力系统一次调频能力进行实验验证, 结果表明锂电池储能系统能快速精确跟踪调频调度指令, 具备协同风电参与电力系统一次调频的能力。

关键词: 风电功率; 储能系统; 电网调频; 试验平台

中图分类号: TM73

文献标识码: A

0 引 言

近年来全球风电以每年两位数的速度增长, 2016 年全球新增装机 54 GW 以上, 累计装机达到 487 GW^[1]。当前主流风力发电机型不具备惯性响应及辅助调频能力, 大规模风电替代了部分传统电源, 减小了电力系统的惯性^[2,3], 削弱了其频率调节能力。风电渗透率的快速增长, 使得电网对风电场承担调频能力的要求也逐步凸显, 给系统的安全稳定运行带来严峻挑战。为此, 许多国家和地区的电网公司对风电机组参与电力系统调频做出明确要求, 如德国 EON 公司要求装机容量大于 100 MW 的风电场具备一次调频能力, 其上下调节容量应不小于额定容量的 2%^[4,5]。

在电网风电渗透率不断提高的背景下, 文献[6]构建大规模风电电力系统频率动态评估方法, 仿真分析风电功率波动对电网频率的影响。文献[7]提出一种下垂控制策略, 根据不同的风速确定不同的下垂控制系数, 实现风电机组提供一次调频服务。文献[8]研究了风电机组附加频率控制方式, 提出风电场时序协调的调频控制策略。由于风能固有的随机性和波动性, 风电机组提供的频率支撑能力

很难得到保障^[9,10]。储能系统具有能量的时空平移能力和极快的响应速度^[11-15], 可协调风电机组来共同参与电力系统调频, 储能系统的引入可提高风电机组的频率响应能力, 满足系统对风电场的一次调频要求。

本文将比例弃风法作为风电机组一次调频备用的配置方法, 基于电网的 15 min 一次调频备用持续输出要求, 提出储能系统的最大值配置方法来协同风电场提供系统一次调频备用, 应用 10 kW/20 kWh 锂电池储能系统对锂电池参与电力系统一次调频能力进行验证, 实验通过储能一次调频需求在额定功率内及额定功率外两个不同的场景验证了锂电池储能系统有能力参与电力系统一次调频。

1 电力系统一次调频原理

维持系统频率稳定是保证电网电能质量的重要指标, 是反映电力系统安全稳定运行的重要参数。电网的频率稳定主要通过三级频率控制来调节, 其中电力系统的一次调节主要依靠发电机组的同步调速器自发完成的。系统电源出力与负荷不平衡时, 一次调频可快速响应, 限制电网频率变化

收稿日期: 2017-06-22

基金项目: 国家重点研发计划(2016YFB0900101); 国家自然科学基金(U1766204); 2017 年吉林省发改委产业创新专项(2017C017-2); 吉林省教育厅“十三五”科学技术研究项目(吉教科合字[2016]第 88 号)

通信作者: 李军徽(1976—), 男, 博士、副教授, 主要从事大规模风电联网运行关键技术方面的研究。lijunhui@neepu.edu.cn

但不能使频率恢复至额定值,因此一次调频是一种有差调节。一次调频过程中的功率频率特性可由图 1 来表示。

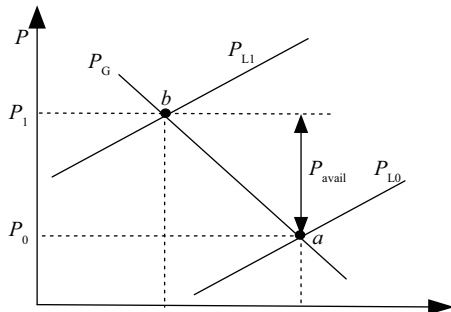


图 1 一次调频原理图

Fig. 1 Principle diagram of primary frequency modulation

稳定运行时系统的电源出力与负荷功率相等,系统频率为 f_0 (图中 a 点),电源出力为 P_0 ;当系统的负荷由 P_{L0} 突然增大到 P_{L1} 时,负荷和发电机的功率-频率曲线向频率下降方向滑动,经过多次震荡后,系统频率变为 f_1 (图中 b 点),此时系统电源功率为 P_1 。该过程称为系统的一次调频,其中系统提供的一次调频备用为 R_{avail} 。

2 风储系统一次调频备用的配置方法

2.1 风电机组的一次调频备用

比例弃风法是风电场为电力系统一次调频留出上调备用的一种方法,该方法基于风电场最大有功出力,按照一定的比例进行弃风,比例弃风法的弃风容量如式(1)所示:

$$P_{\text{curt}}(t) = (1 - \alpha)P_{\text{avail}}(t) \quad (1)$$

式中, $P_{\text{curt}}(t)$ ——弃风容量; α ——弃风比例系数, $\alpha \in (0, 1)$, α 的具体取值取决于电网调度部门对风电场下达的备用容量要求; $P_{\text{avail}}(t)$ ——瞬时最大可发电容量。

比例弃风法的基本原理如图 2 所示,图中 P_{rat} 为风电场额定容量。当前的风电机组有功功率控制技术能够使风电场按最大出力的某一百分比进行功率输出^[16]。

风能固有的随机性和波动性,使风电机组难以单独满足电力系统的调频需求。储能系统具有能量的时空平移能力和极快的响应速度,可与风电机组相互配合共同满足电力系统的一次调频需求。

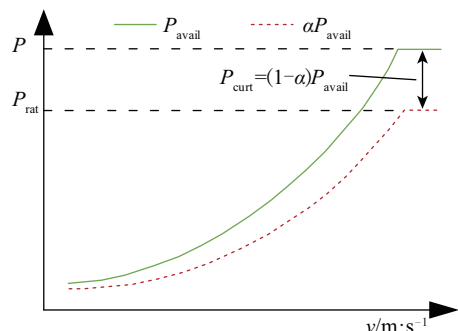


图 2 比例弃风法示意图

Fig. 2 Diagram of proportional curtailment strategy

2.2 协调风电的储能系统一次调频备用

应用比例弃风法,在满足 1 个调度周期 15 min 一次调频备用持续输出的条件下,选择一个调度周期 T 内最大弃风容量为有效备用容量 $R_{\text{avail}-T}$,即:

$$R_{\text{avail}-T} = \max(P_{\text{curtailed}}[t_0, t_0 + T]) \quad (2)$$

式中, $P_{\text{curtailed}}$ ——比例弃风法所产生的弃风容量。当风电场结合储能系统参与电力系统一次调频时,储能系统的放电功率 $P_{\text{ESS-dis}}$ 为:

$$P_{\text{ESS-dis}} = R_{\text{avail}-T} - P_{\text{curtailed}} \quad (3)$$

图 3 中前两个调度周期中的阴影部分为储能系统的放电电量。

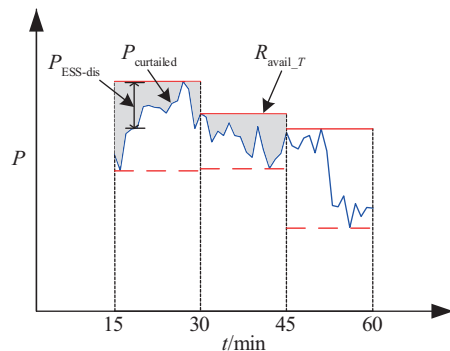


图 3 最大值法中储能系统的控制策略

Fig. 3 Maximum value control strategy of ESS

3 协同风电的锂电池储能系统一次调频实验

基于 10 kW/20 kWh 的锂电池储能试验平台,根据所提的锂电池储能协同风电场提供一次调频备用的配置方法,采用等比例折算的方式验证和分析风储联合调频中储能系统一次调频的响应时间和精度情况。

3.1 试验平台介绍

锂电池储能系统(battery energy storage system, BESS)运行示意图如图4所示,图中 $P_{\text{wind}}(t)$ 和 $P_{\text{out}}(t)$ 分别为 t 时刻风电出力和风电并网功率; $P_{\text{BESS}}(t)$ 为 t 时刻储能电池充电功率。电网在每个调度周期根据风电出力情况及自身实际需求向储能管理单元(energy storage manage system, ESMU)发送调度指令,ESMU在每个控制周期根据电网的调度指令信息下发充放电控制指令至变流器控制系统,即调控 $P_{\text{BESS}}(t)$ 大小,并实时监测 BESS 整体工作状态,根据锂电池荷电状态(state of charge, SOC)信息及充放电功率约束条件实时调整储能系统的实时充放电功率,提高对 BESS 充放电控制的安全性。图中 BESS 由 10 kW/20 kWh 锂电池能量管理系统、储能变流器及锂电池组 3 部分组成,电池组由 192 节 40 Ah 磷酸铁锂电池串联而成,分为 16 箱,每箱 12 节^[17]。

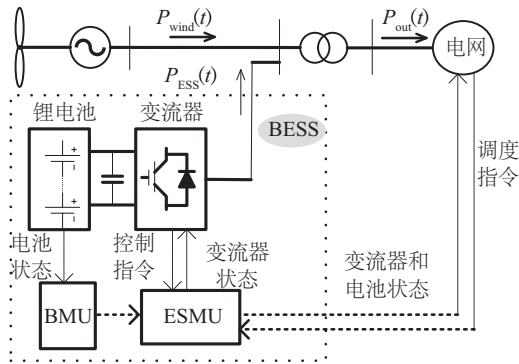


图4 锂电池储能系统运行示意图

Fig. 4 Diagram of lithium battery energy storage system

锂电池储能系统主要通过储能变流器中电力电子器件的开关变换实现电网与锂电池组的能量传输,在运行过程中存在一定的通态损耗和开关损耗。为保证充/放电控制指令的精确响应,需对电池的充放电特性进行分析。

3.2 储能系统充放电特性分析

设置变流器工作于恒功率充电模式下,设计不同的定功率指令对锂电池储能系统充电,此时锂电池储能系统的荷电状态为 0.65。根据电网侧与电池侧采样的电压、电流数据计算充电过程中的功率变化曲线如图5所示,同理放电过程中的功率变化情况如图6所示。

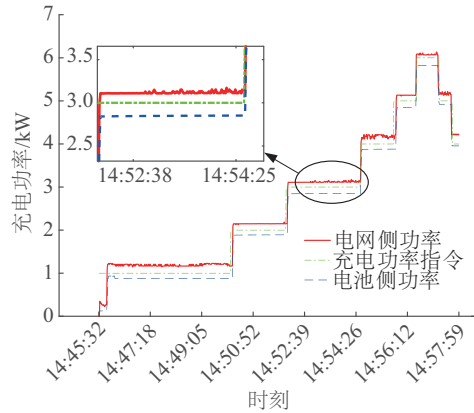


图5 锂电池储能系统充电功率变化情况

Fig. 5 The charging power change of lithium battery energy storage system

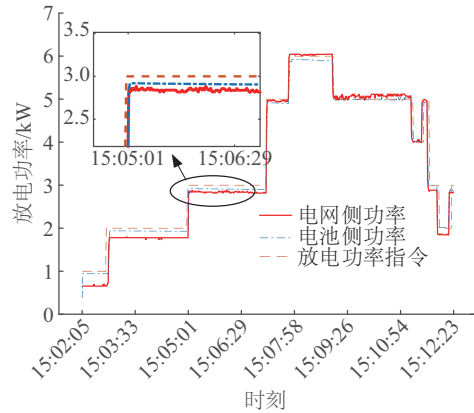


图6 锂电池储能系统放电功率变化情况

Fig. 6 The discharging power change of lithium battery energy storage system

由图5可知锂电池储能系统在响应充电指令时,电网侧充电功率均大于充电的指令值,平均偏差为 0.169 kW。不同充放电指令下,由于变流器造成系统的平均损耗功率为 0.282 kW。

由图6可知在响应放电指令时,电网侧的放电功率均小于放电指令值,平均偏差为 0.119 kW。系统的平均损耗功率为 0.04 kW。为确保电网输出功率的精确性,需根据储能系统的充/放电命令对功率需求值进行修正。本文根据充放电的不同命令对调频指令增加一定的偏差值进行修正。

储能系统能快速响应不同的充电指令,在开始运行时,由于储能系统处于停机状态,当接到充电指令时继电器开始动作,延长了响应时间,储能系统在 5 s 后充电功率达到指令值。但系统启动后的

变功率充电过程中,响应时间极大地减小,响应时间约为 1 s,能对调频充放电指令进行及时响应。

在部分充放电指令下,储能系统的功率值出现了“毛刺”,说明储能系统的运行还不够平稳,为实现储能系统的更为精确的控制,需对储能逆变器的控制性能进行改进,由于篇幅有限不作为本文的研究重点。

3.3 风储一次调频实验验证

某电网最大负荷 2155.9 MW,最大单机容量 200 MW,风电场装机容量为 700 MW,基于全年的风电及负荷实测数据(采样间隔 1 min)对风电和储能系统联合参与一次调频方法有效性进行分析。

根据式(2)、式(3)确定需要一次调频备用周期中的放电功率,其中最大值为 29.93 MW、最小值为零,对其幅值进行累计概率分布统计,统计结果如图 7 所示。

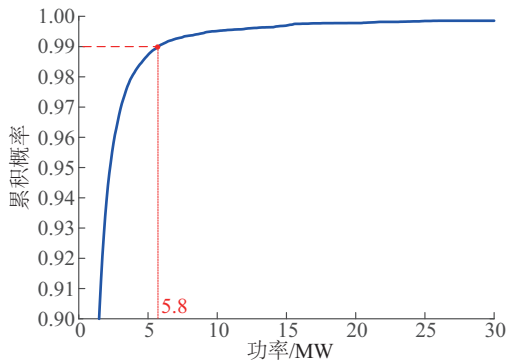


图7 储能系统功率累计概率分布

Fig. 7 Cumulative power probability distribution of energy ESS

根据统计结果可知如果储能系统额定功率设置为 29.93 MW 可 100%满足需求。但对于控制最大值法储能系统所需的功率大于 5.8 MW 只有 1%，如图 7 中虚线标记所示。储能配置功率大于 5.8 MW 时，随着配置功率的增加，其一次调频累积概率增加速度急剧减小。小概率事件的存在大幅增加储能系统的额定功率，将严重影响储能系统的经济性，为此确定所需储能系统的额定功率 $P_{\text{rate}}=5.8 \text{ MW}$ 。

选择典型的调度周期,验证锂电池储能系统的辅助风电场调频的能力。受实验室锂电池储能系统的额定容量 10 kW/20 kWh 条件所限,将算例中

的数据按照所得额定功率与实验室锂电池储能系统的额定功率之比进行等比例缩放处理。电力系统中的负荷及风电功率均随时间变化而变化,因此不同时刻系统的风电渗透率不同,不同时刻系统对应频率的响应能力不同,电力系统对风电场一次调频备用需求也在不断变化。分别在两个不同的一次调频备用需求场景下对锂电池储能系统辅助风电场参与电力系统一次调频能力进行实验验证。

场景一:储能系统的一次调频备用需求功率在额定功率范围内

选择某一典型调度时段,风电渗透率最大为 29.04%,该时段的风电及负荷功率如图 8 所示。在发生 $N-1$ 事故(200 MW 的功率脱落)时,根据电力系统一次调频模型,不启动低频减载时风电场及储能系统需要提供的一次调频备用容量为 20 MW^[18]。采用最大值法时,储能及风电场一次调频备用如图 9 所示,算例中对应储能功率及按实验比例折算得到的储能系统功率如表 1 所示,折算比例为 5.8 MW/10 kW。

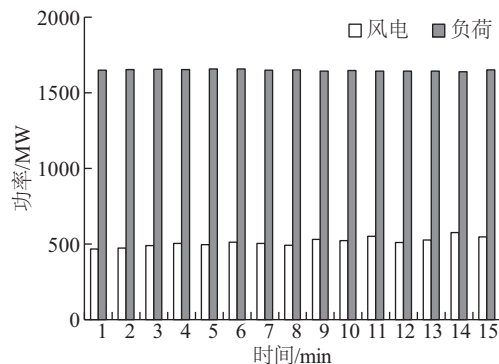


图8 场景一对应风电功率及负荷

Fig. 8 Wind power and load in the first scene

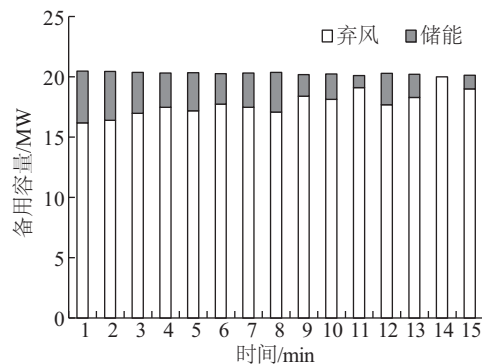


图9 场景一对应一次备用容量

Fig. 9 Primary reserve in the first scene

表1 场景一折算前后储能系统功率					
Table 1 The pre and post convert power in the first scene					
时间/ min	功率		时间/ min	功率	
	折算前/ MW	折算后/ kW		折算 前/MW	折算后/ kW
1	4.3	7.4	9	1.8	3.1
2	4.0	7.0	10	2.1	3.6
3	3.4	5.9	11	1.0	1.7
4	2.8	4.9	12	2.6	4.5
5	3.2	5.4	13	1.9	3.3
6	2.5	4.4	14	0.0	0.0
7	2.8	4.9	15	1.1	1.9
8	3.3	5.7	—	—	—

根据表1中折算之后得到的储能系统功率参考值,控制锂电池储能系统进行充放电运行,由表1可知在该调度周期内储能系统的功率均小于额定功率。在充放电控制主界面的控制方法一栏选择跟踪调度指令的控制方法,完成1个调度周期15 min运行控制后,对储能系统充放电功率跟踪调度指令的能力进行分析,实验结果如图10所示。由图10可知,锂电池储能系统能够较好的跟踪给定的调度指令。

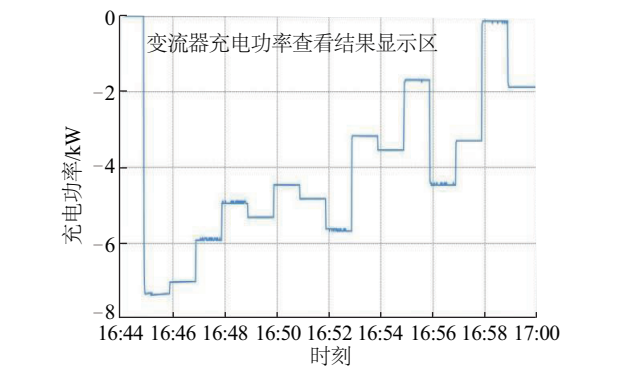


图10 场景一储能系统跟踪调度指令效果图
Fig. 10 Result of scheduling order tracking in the first scene

场景二:储能系统一次调频备用需求功率超出额定功率范围

选择某一典型调度时段,风电渗透率最大为40.9%,在发生N-1事故(200 MW的功率脱落)时,根据电力系统一次调频模型,不启动低频减载时风电场及储能系统需要提供的一次调频备用容量为

50.5 MW^[18],即采用最大值法时储能及风电场弃风电量之和为50.5 MW。算例中对应储能功率及按实验比例折算得到的储能系统功率如表2所示,折算比例为5.8 MW/10 kW。

表2 场景二折算前后储能系统功率					
Table 2 The pre and post convert power in the second scene					
时间/ min	功率		时间/ min	功率	
	折算前/ MW	折算后/ kW		折算前/ MW	折算后/ kW
1	4.4	7.7	9	3.2	5.5
2	8.3	14.2	10	4.9	8.5
3	9.2	15.9	11	0.0	0.0
4	5.8	9.9	12	2.4	4.1
5	4.8	8.3	13	5.8	10
6	6.3	10.9	14	3.9	6.8
7	5.1	8.8	15	8.8	15.2
8	4.9	8.4	—	—	—

根据表2中折算之后得到的储能系统功率,对锂电池储能系统进行控制,由表2可知在该调度周期内第2、3、6、15调度子时段储能系统的功率大于额定功率,其他子时段的功率小于额定功率。在充放电控制主界面的控制方法一栏选择跟踪调度指令的控制方法,完成1个调度周期15 min的运行控制后,通过数据管理分析界面的变流器充电功率查看功能验证储能系统的充电功率是否能够跟踪调度指令,实验结果如图11所示。

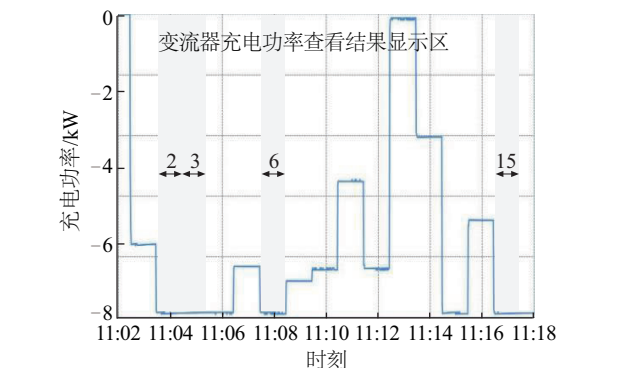


图11 场景二储能系统跟踪调度指令效果图
Fig. 11 Result of scheduling order tracking in the second scene

由图11可知,当储能功率小于储能系统额定功率时锂电池储能系统能较好地跟踪给定调度指

令,但当储能功率大于储能系统额定功率时,为保证储能系统不过载运行,储能系统以额定值输出功率,如图 11 中标记的 4 个调度子时段所示。此种情况下储能系统协调风电场参与电力系统一次调频不能满足电力系统要求,虽然出现这种情况的概率很低,但如遇到这种情况调度部门要提前安排增加部分火电机组的备用容量,以防系统频率跌落过低。

综合分析两个场景的实验结果,锂电池储能系统的一次调频功率偏差为额定功率的 2.1%,响应时间为 1 s。由于实验采用的储能系统功率和容量限制,其功率的变化对电网频率变化影响微乎其微,其对电网频率的改善效果仍需大容量储能系统验证。

4 结 论

本文采用比例弃风法作为风电机组参与电力系统一次调频备用的配置方法,考虑风电功率固有的波动性和不确定性,提出储能系统最大值配置法来协调风电场作为电力系统一次调频备用,基于实验室现有 10 kW/20 kWh 锂电池储能系统分额定功率内和额定功率外两个不同的场景对协调风电的锂电池储能系统参与调频的能力进行实验验证,结果表明 10 kW/20 kWh 锂电池储能系统协调风电场参与电力系统的一次调频的响应时间为 1 s,功率偏差为额定功率的 2.1%,10 kW/20 kWh 锂电池储能系统具备协调风电参与电网一次调频的能力。

[参考文献]

- [1] GWEC. Global wind stats 2016 final[R]. 2017.
- [2] 李欣然,周婷婷,黄际元.跟踪风电计划出力下的混合储能系统容量配置[J].太阳能学报,2016,37(9):2194—2200.
- [2] Li Xinran, Zhou Tingting, Huang Jiyuan. The hybrid energy storage system capacity configuration in tracking wind power project output[J]. Acta Energaie Solaris Sinica, 2016, 37(9): 2194—2200.
- [3] 姜素华,吴耀武,崔艳昭,等.电池储能平抑短期风电功率波动运行策略[J].电力系统自动化,2014,38(2):17—22.
- [3] Lou Suhua, Wu Yaowu, Cui Yanzhao, et al. Operation strategy of battery energy storage system for smoothing short-term wind power fluctuation[J]. Automation of Electric Power Systems, 2014, 38(2): 17—22.
- [4] Eskom System Operations and Planning Division. Grid code requirements for wind energy facilities connected to distribution or transmission system in South Africa (Version 4.4)[EB/OL]. <http://www.nersa.org.za>, 2016-06-21.
- [5] Hydro Québec TransÉnergie. Transmission provider technical requirements for the connection of power plants to the hydro-québec transmission system[R]. Quebec: Hydro-Québec TransÉnergie, 2009.
- [6] 崔 杨,刘 嘉,严干贵,等.联网风电功率波动对电力系统频率影响评估[J].太阳能学报,2014,35(4):617—623.
- [6] Cui Yang, Liu Jia, Yan Gangui, et al. Effect of on-grid wind power fluctuation on frequency stability of electric power system[J]. Acta Energaie Solaris Sinica, 2014, 35(4): 617—623.
- [7] 唐西胜,苗福丰,齐智平,等.风力发电的调频技术研究综述[J].中国电机工程学报,2014,34(25):4304—4314.
- [7] Tang Xisheng, Miao Fufeng, Qi Zhiping, et al. Survey on frequency control of wind power[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(25): 4304—4314.
- [8] 何成明,王洪涛,孙华东,等.变速风电机组调频特性分析及风电场时序协同控制策略[J].电力系统自动化,2013,37(9):1—6,59.
- [8] He Chengming, Wang Hongtao, Sun Huadong, et al. Analysis on frequency control characteristics of variable speed wind turbines and coordinated frequency control strategy of wind farm[J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(9): 1—6,59.
- [9] 刘 巨,姚 伟,文劲宇,等.大规模风电参与系统频率调整的技术展望[J].电网技术,2014,38(3):638—646.
- [9] Liu Ju, Yao Wei, Wen Jinyu, et al. Prospect of technology for large-scale wind farm participating into power grid frequency regulation[J]. Power System Technology, 2014, 38(3): 638—646.
- [10] Kiaee M, Cruden A, Infield D. Utilisation of alkaline electrolyzers to improve power system frequency stability with a high penetration of wind power[J]. Renewable Power Generation, IET, 2014, 8(5): 529—536.
- [11] 冯天舒,刘 芳.基于复合储能的微电网运行的切换控制策略[J].东北电力大学学报,2016,36(3):11—15.
- [11] Feng Tianshu, Liu Fan. Control strategy for operation

- transfer of micro-grid based on hybrid energy storage system [J]. Journal of Northeast Dianli University, 2016, 36(3): 11—15.
- [12] 潘文霞, 傅中兴, 王鹏飞, 等. 基于风功率预测的风电场平滑控制电池容量的需求分析[J]. 太阳能学报, 2013, 34(3): 490—495.
- [12] Pan Wenxia, Fu Zhongxing, Wang Pengfei, et al. Analysis on battery capacity demand for wind farm smooth control based on wind power prediction[J]. Acta Energaie Solaris Sinica, 2013, 34(3): 490—495.
- [13] 黄冠能, 高贞彦, 耿博, 等. 全资源调度下主动配电网削峰填谷优化运行研究[J]. 东北电力大学学报, 2016, 36(3): 1—6.
- [13] Huang Guanneng, Gao Zhenyan, Gen Bo, et al. Research on peak load shifting optimal operation of active distribution network based on whole resource system dispatching[J]. Journal of Northeast Dianli University, 2016, 36(3): 1—6.
- [14] Maciej S, Daniel S, Ana-Irina S, et al. The lifetime of the LiFePO₄/C battery energy storage system when used for smoothing of the wind power plant variations [A]. Industrial Electronics Society, IECON 2013—39th Annual Conference of the IEEE [C], Vienna, Austria, 2013.
- [15] Saurabh Tewari, Ned Mohan. Value of NAS energy storage toward integrating wind: results from the wind to battery project [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2013, 28(1): 532—541.
- [16] ENSTO E. Operational reserve AD HOC team report, final version [EB/OL]. <http://www.entsoe.eu>, 2012-05-31.
- [17] 李军徽, 冯喜超, 朱星旭, 等. 10 kW/20 kWh 锂电池能量管理系统的设计与实现[J]. 太阳能学报, 2014, 35(12): 2490—2496.
- [17] Li Junhui, Feng Xichao, Zhu Xingxu, et al. Design and implementation of energy management system for a 10 kW/20 kWh lithium-ion battery [J]. Acta Energaie Solaris Sinica, 2014, 35(12): 2490—2496.
- [18] Kundur P. Power system stability and control [M]. New York: McGraw-hill, 1994, 389—415.

EXPERIMENTAL ANALYSIS OF 10 kW/20 kWh LITHIUM BATTERY ENERGY STORAGE SYSTEM WITH COMBINED WITH WIND POWER AS PRIMARY FREQUENCY MODULATION RESERVE

Li Junhui¹, Fan Xingkai¹, Mu Gang¹, Yan Gangui¹, An Jun¹, Feng Xichao²

(1. School of Electrical Engineering, Northeast Electric Power University, Jilin 132012, China;

2. Shenyang Electric Power Supply Company, State Grid Liaoning Electric Power Company, Shenyang 110003, China)

Abstract: Most of the currently installed wind turbines are not equipped with frequency response capability. The large scale wind power integration poses a great challenge to power system frequency stability. It is necessary to further improve the frequency regulation ability of high wind penetration power system. In this paper, wind turbine proportional curtailment power is reserved as basic unit to provide primary frequency regulation. Base on the requirements of fifteen minutes continuous output in primary reserve, a maximum method for energy storage system is proposed to coordinate wind farm to supplement primary reserve. Capability of lithium battery energy storage system participating in power system primary frequency regulation is verified based on the 10 kW/20 kWh lithium battery energy storage system in the laboratory. At last, it is confirmed that the lithium battery energy storage system can quickly and accurately track frequency modulation scheduling instructions, and has the ability to take part in primary frequency regulation.

Keywords: wind power; energy storage; electric frequency control; experimental platform