

储能系统改善大规模风电场出力波动的策略

袁铁江, 陈洁, 刘沛汉, 王再闯, 杨青斌, 刘佳铭, 葛来福

(新疆大学电气工程学院, 新疆 乌鲁木齐 830008)

摘要: 针对利用储能提高风电对其并网系统的友好性, 给出了一种基于储能平抑风电出力波动的策略。对大规模风电并网的某区域电网负荷与风电出力的数据进行了统计分析, 得到负荷和风电出力的时域分布规律, 提出了利用储能系统协调风电场有功出力与其并网系统负荷功率波动的策略, 并建立了相应的数学模型。基于电力系统分析软件 DIGSILENT-POWER FACTORY13.1进行了仿真验证, 结果表明利用储能改善后的风电有功出力, 能够追踪负荷曲线的变化规律, 并网风储合成出力对电力系统可以起到“削峰填谷”作用, 储能以较低的成本提高了风电对其并网系统的友好性。

关键词: 储能系统; 风力发电; 功率波动; 风电并网; 控制策略

Strategy of improving large-scale wind farm output fluctuation based on energy storage system

YUAN Tie-jiang, CHEN Jie, LIU Pei-han, WANG Zai-chuang, YANG Qing-bin, LIU Jia-ming, GE Lai-fu

(School of Electrical Engineering, Xinjiang University, Urumqi 830008, China)

Abstract: Aiming at using the energy storage to improve the friendliness of wind power to its grid system, a strategy based on energy storage to stabilize the wind power output fluctuations is given. A regional power grid load and wind power output data of large-scale wind power grid are counted and analyzed, the time-domain distribution law of load and wind power output is obtained, the strategy using energy storage to coordinate active power output of the wind farm and load power fluctuations of its power grid system is proposed, and the corresponding mathematical model is established. The simulation is made based on the power system analysis software DIGSILENT-POWERFACTORY13.1. The results show that the modified active power output of wind power through using energy storage can track the load curve variation, the synthesizer output of grid-connected wind power energy storage on the power system can play the role of “load shifting”, and energy storage improves the friendliness of wind power to its grid system at a lower cost.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 51167018/51277157/51367018).

Key words: energy storage system; wind power generation; power fluctuations; grid-connected wind power; control strategy

中图分类号: TM71 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2014)04-0047-07

0 引言

为有效应对日益严峻的能源短缺和环境污染困境, 风电、光伏发电等洁净可再生能源电能大规模并网成为必然。然而风电出力的波动特性, 与电网安全稳定运行对电源输出功率的稳定性要求是矛盾的, 甚至是有害的^[1]。随着储能技术的发展, 储能系统被大规模用来抑制或者平滑风电出力特性, 提高大规模风电出力特性对并网需求的友好性, 正在变

为现实^[1-3], 在智能电网中储能系统必将得到大规模广泛的应用。因此, 研究储能系统改善大规模并网风电场出力波动的策略是十分必要的。

国内外对储能系统在风电并网电力系统中的应用做了大量的研究, 并取得了一定的成果^[4-8]。文献[4]讨论了锂电池、液流电池等在风力发电中有应用前景的储能系统, 并指出通过风力发电系统中的储能装置, 可以使风电这种间歇、波动性很强的可再生能源变得“可控、可调”。文献[5-8]分别从不同的角度研究了储能系统及其控制策略对风电并网系统的稳定性、电能质量方面等的改善。文献[5]利用超级电容器组作为储能元件, 平抑风电场有功、无功功率波动, 维持风电场输出端电压, 降低风电场对

基金项目: 国家电网科技项目 (DG71-12-003); 国家自然科学基金项目 (51167018/51277157/51367018); 新疆大学博士毕业生科研启动基金 (BS120131)

电网电能质量的影响。文献[6]为改善风力发电机的输出特性,设计出一种基于双馈感应电机的具有储能、发电和调相等多种功能的飞轮储能装置。文献[7]将串并联型超级电容器储能系统用来提高风力发电系统稳定性和改善电能质量。文献[8]利用飞轮储能系统对并网风电系统进行有功和无功功率调节,还对基于异步电机的飞轮储能系统应用于并网风电系统时的效率问题进行了研究。文献[9]以基于超级电容器的永磁直驱式风力发电系统为研究对象,提出一种基于模糊算法的实现平抑风电机组功率波动和避免储能装置出现过度充电或深度放电状况的储能系统优化控制策略。文献[10]研究了电池储能系统对风电场及其并网系统的电能质量和稳定性的改善。文献[11]对风电波动功率进行了分解,并研究其平抑过程对储能系统性能需求的基础上,研制了一种新型混合储能系统,通过对其运行控制方式的设计。文献[12]在研究储能系统的主要结构及工作模式的基础上,对并网模式下储能系统的控制策略进行了分析,得到一种适用于 MW 级储能系统的故障诊断及处理策略。文献[13]中我国台湾学者仿真探讨了为减少风电场出力的波动电池储能系统的容量配置,和电池储能系统在改善系统电压、频率等方面的作用。文献[14]提出 SMES 变流器对系统功率补偿的控制方法,针对电网负荷变化产生的功率波动状态,实现毫秒级内对电力系统的快速功率输出和波动抑制。文献[15]从经济调度角度研究了储能系统用于平滑风电出力波动的价值。但是,这些研究都没有从协调风电场有功功率与其并网系统负荷功率波动的角度,针对性地研究储能系统改善风电场出力波动的策略。

本文在对大规模风电并网的某区域电网当地负荷分布曲线与风电出力曲线的分布规律总结分析基础上,采用储能装置抑制风电场功率曲线的波动,提出基于协调风电场有功功率与其并网系统负荷功率波动的储能系统平滑风电场出力曲线策略,并建立了协调风电场有功功率与其并网系统负荷功率波动的储能系统改善风电场出力特性策略的数学模型,并进行了仿真验证,结果表明基于本文策略平滑后的风电功率曲线,能够追踪负荷曲线的变化规律,使并网风电对系统起到“削峰填谷”作用,对系统运行更加友好。研究结果为储能系统及风电大规模并网,提供了新的技术支持和依据,对于推动建设中国特色的坚强智能电网具有一定的理论和实践价值。

1 基于协调风电功率和负荷功率波动的储能系统改善风电场出力波动策略建模

1.1 基于某区域电网风电和负荷功率特性的储能系统改善风电场出力波动策略的提出

本文所研究的区域电网东西伸展约2 000多 km、南北约3 300多 km,覆盖地域约120万 km²,是世界上覆盖面积最广的220 kV区域性电网,电气联系薄弱。截至2009年底,该电网电源总装机容量为11 911.63 MW,其中:火电8 292.85 MW,水电2 291.158 MW,风电712 MW,燃气电站591.62 MW,生物质能24 MW。风电装机容量占总装机容量的6%,风电比重大。该电网特性决定了其对风电特性具有较高的敏感度,以其作为研究对象,得到的关于储能系统与电网关系的结论,对于全国大部分非典型电网都具有较高的可靠冗余度和参考价值。

本文对该区域电网2008年和2009年全年负荷有功功率数据,和2009年全网风电有功功率数据进行了汇总分析。图1和图2分别是2009年1月每天的负荷和风电功率曲线。分析负荷功率曲线和风电功率曲线可以得到:①负荷有功功率以天为周期有规律的变化。②风电出力没有显性的与时间关联的分布规律可寻。③如果以每日0:00~23:55为统计时段,按照一定的原则对负荷时段进行划分,总会

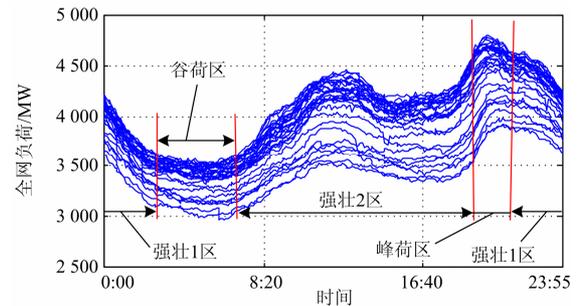


图1 2009年1月每天的负荷功率曲线

Fig. 1 Daily load power curve in January 2009

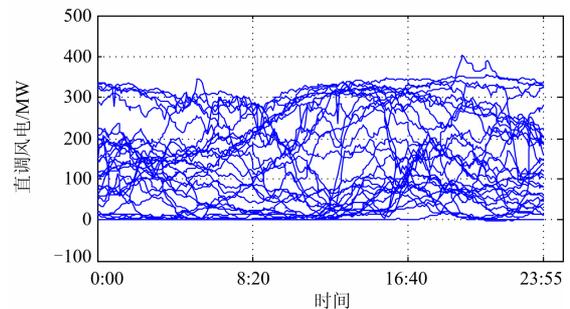


图2 2009年1月每天的风电功率曲线

Fig. 2 Daily wind power curve in January 2009

有一个负荷较低时段（谷荷区）和一个负荷较高时段（峰荷区）。

从系统运行角度来看，风电出力的无规律性带来的挑战表现为两个重要的方面。其一：风电出力变化超出了系统备用的响应能力（包括响应速度和容量），增大了系统不能维持功率平衡的风险；其二：在谷荷区或者峰荷区情况下，系统对风电的反负荷变化趋势（谷荷区时风电出力增加，峰荷区时风电出力减少）极其敏感，风电出力变化给系统经济性、安全稳定运行和电能质量控制带来很大的威胁。

因此，本文提出基于协调风电功率和负荷功率波动的储能系统的改善风电场出力波动策略是：储能系统接入风电并网系统的目的是平滑风电出力曲线，协调风电功率和负荷功率波动，提高风电对其并网系统运行的友好性。因此，在谷荷区和峰荷区时，储能系统的作用是防止风电出力的反负荷变化，在其他时段储能系统的作用是防止风电出力的变化超出系统备用的响应能力。同时考虑到经济性，在确保一定的安全冗余度下，储能系统容量应最小。

1.2 储能系统改善风电场出力波动策略数学建模

负荷区间的划分如图 1 所示。设风电场出力为 P_W ；储能系统充电功率为 P_{charge} ；储能系统的放电功率为 $P_{\text{sincharge}}$ ； δ_{up} 和 δ_{down} 分别为系统能够接纳的风电出力最大的增大和减小速度，在数值上都大于 0，单位为 MW/s。则本文提出的基于协调风电功率和负荷功率波动的储能系统的改善风电场出力波动策略，在对应负荷区间内的数学模型分述如后。

(1) 在强壮 1 区，储能系统需要在平抑风电对系统冲击的同时，确保达到负荷谷值区间前，储能装置拥有最大的充电能力。

A. 如果 $\left| \frac{dP_W}{dt} \right| < \min(\delta_{\text{up}}, \delta_{\text{down}})$ ，则储能系统启动放电，最大放电功率如式 (1) 所示。

$$P_{\text{sincharge}} = \int_0^t [\min(\delta_{\text{up}}, \delta_{\text{down}}) - \frac{dP_W}{dt}] dt \quad (1)$$

B. 如果 $\frac{dP_W}{dt} \geq \min(\delta_{\text{up}}, \delta_{\text{down}})$ ，则为确保系统安全，储能系统启动充电，最小充电功率如式 (2) 所示，一般取小值。

$$P_{\text{charge}} = \int_0^t \left[\frac{dP_W}{dt} - \min(\delta_{\text{up}}, \delta_{\text{down}}) \right] dt \quad (2)$$

C. 如果 $\frac{dP_W}{dt} \geq \min(\delta_{\text{up}}, \delta_{\text{down}})$ ，且 $\frac{dP_W}{dt} < 0$ ，则储能系统启动放电，最大放电功率如式 (3) 所示。

$$P_{\text{sincharge}} = \int_0^t [\min(\delta_{\text{up}}, \delta_{\text{down}}) - \frac{dP_W}{dt}] dt \quad (3)$$

此时储能系统的最小放电功率如式 (4) 所示。

$$P_{\text{sincharge}} = \int_0^t \left[\left| \frac{dP_W}{dt} \right| - \min(\delta_{\text{up}}, \delta_{\text{down}}) \right] dt \quad (4)$$

一般取大值。

(2) 在谷荷区，系统对风电出力波动非常敏感，尤其出力正向波动会产生挤出效应，进一步恶化系统运行环境，所以储能系统至少应该全部“消耗”风电向正方向变化多余的能量。

A. 如果 $\frac{dP_W}{dt} > 0$ ，则储能系统启动充电，最小充电功率如式 (5) 所示。

$$P_{\text{scharge}} = \int_0^t \frac{dP_W}{dt} dt \quad (5)$$

最大充电功率如式 (6) 所示。

$$P_{\text{scharge}} = \int_0^t \left[\frac{dP_W}{dt} + \min(\delta_{\text{up}}, \delta_{\text{down}}) \right] dt \quad (6)$$

为保证储能系统拥有最大的充电能力，一般取小值。

B. 如果 $\frac{dP_W}{dt} < 0$ ，且 $\frac{dP_W}{dt} \geq \min(\delta_{\text{up}}, \delta_{\text{down}})$ ，则为确保系统安全，储能系统需要启动放电以抑制风电出力的波动对系统的威胁，最小放电功率如式 (7) 所示，一般取小值。

$$P_{\text{sincharge}} = \int_0^t \left[\left| \frac{dP_W}{dt} \right| - \min(\delta_{\text{up}}, \delta_{\text{down}}) \right] dt \quad (7)$$

C. 如果 $\frac{dP_W}{dt} < 0$ ，且 $\frac{dP_W}{dt} < \min(\delta_{\text{up}}, \delta_{\text{down}})$ ，则储能系统关闭待机。

(3) 在强壮 2 区，储能系统需要在平抑风电对系统冲击的同时，确保达到负荷峰值区间前，储能装置拥有最大的放电能力。

A. 如果 $\frac{dP_W}{dt} < \min(\delta_{\text{up}}, \delta_{\text{down}})$ ，则储能系统启动充电，最大充电功率如式 (8) 所示。

$$P_{\text{scharge}} = \int_0^t [\min(\delta_{\text{up}}, \delta_{\text{down}}) + \frac{dP_W}{dt}] dt \quad (8)$$

B. 如果 $\frac{dP_W}{dt} \geq \min(\delta_{\text{up}}, \delta_{\text{down}})$ ，则为确保系统安全，储能系统启动充电，最小充电功率如式 (9) 所示。

$$P_{\text{scharge}} = \int_0^t \left[\frac{dP_W}{dt} - \min(\delta_{\text{up}}, \delta_{\text{down}}) \right] dt \quad (9)$$

此时储能系统的最大充电功率如式 (10) 所示。

$$P_{\text{charge}} = \int_0^t \left[\left| \frac{dP_w}{dt} \right| + \min(\delta_{\text{up}}, \delta_{\text{down}}) \right] dt \quad (10)$$

一般取大值。

C. 如果 $\frac{dP_w}{dt} \geq \min(\delta_{\text{up}}, \delta_{\text{down}})$ ，且 $\frac{dP_w}{dt} < 0$ ，则储能系统启动放电，最小放电功率如式(11)所示，一般取小值。

$$P_{\text{sincharge}} = \int_0^t \left[\min(\delta_{\text{up}}, \delta_{\text{down}}) + \frac{dP_w}{dt} \right] dt \quad (11)$$

(4) 在峰荷区，系统对出力波动非常敏感，尤其出力负向波动会产生反调峰效应，进一步恶化系统运行环境，所以，储能系统至少要全部“补偿”风电向负方向变化减少的能量。

A. 如果 $\frac{dP_w}{dt} < 0$ ，则储能系统启动放电，最小放电功率如式(12)所示。

$$P_{\text{sincharge}} = \int_0^t \left| \frac{dP_w}{dt} \right| dt \quad (12)$$

最大放电功率如式(13)所示。

$$P_{\text{sincharge}} = \int_0^t \left[\left| \frac{dP_w}{dt} \right| + \min(\delta_{\text{up}}, \delta_{\text{down}}) \right] dt \quad (13)$$

为保证储能系统拥有最大的放电能力，一般取小值。

B. 如果 $\frac{dP_w}{dt} > 0$ ，且 $\left| \frac{dP_w}{dt} \right| \geq \min(\delta_{\text{up}}, \delta_{\text{down}})$ ，则为确保系统安全，储能系统需要启动充电以抑制风电出力的波动对系统的威胁，最小充电功率如式(14)所示，一般取小值。

$$P_{\text{charge}} = \int_0^t \left[\frac{dP_w}{dt} - \min(\delta_{\text{up}}, \delta_{\text{down}}) \right] dt \quad (14)$$

C. 如果 $\frac{dP_w}{dt} > 0$ ，且 $\left| \frac{dP_w}{dt} \right| < \min(\delta_{\text{up}}, \delta_{\text{down}})$ ，则储能系统关闭待机。

2 基于某区域电网的算例仿真

本文采用电力系统分析软件 DIgSILENT-POWERFACTORY13.1，针对风电场的有功出力的变化对系统电压的影响进行了仿真，得到系统能够接受的风电出力的变化极限值约为 5 min 内增大或者减少 28 MW。

正确的负荷分区是通过控制实现基于风储一体化系统中储能装置充放电目标的基础。储能装置的重要作用“削峰填谷”。对于一个装机容量为 P_w (MW) 的风电场，在最恶劣情况下，谷荷区风电场满发出力为 P_w (MW)，峰荷区出力为 0 MW；另一方面，当负荷出力值大于或者等于最小负荷出力值 $P_{\text{dfh.min}}$

加上风电场的满发出力值时，或者当负荷出力值小于或者等于最大负荷出力值 $P_{\text{dfh.max}}$ 减去风电场的满发出力值时，一个合理的系统运行策略应该保证常规机组有足够的容量使系统处在安全稳定和经济运行状态中。因此，基于风储一体化系统中的储能装置发挥“削峰填谷”效益的合理预期负荷区间划分方法为

$$\text{谷荷区间: } [P_{\text{dfh.min}}, P_{\text{dfh.min}} + \alpha \cdot P_w]$$

$$\text{峰荷区间: } [P_{\text{dfh.max}} - \alpha \cdot P_w, P_{\text{dfh.max}}]$$

$$\text{正常负荷区间: } [P_{\text{dfh.min}} + \alpha \cdot P_w, P_{\text{dfh.max}} - \alpha \cdot P_w]$$

其中 α 为考虑到风电场用电等因素形成的冗余系数，通常情况下其值大于 1，本文取为 1.2。

下面就仿真结果进行分析。图 3 表示了某一典型研究日的负荷曲线及其区间划分结果。图 4 表示了该典型研究日储能系统的出力和储能系统平抑风电出力前后风电出力的仿真结果。图 5~图 7 分别表示了典型研究日所在的当月的负荷功率、风电功率和储能系统平抑风电出力波动的仿真结果。表 1 为基于不同季节的样本数据在本文提出的策略下风储一体化中风电场单独输出功率和风储系统合成输出功率的波动情况统计表。

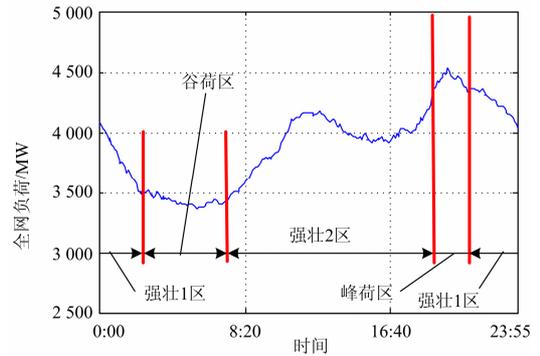


图 3 典型日负荷功率曲线

Fig. 3 Load power curve of typical day

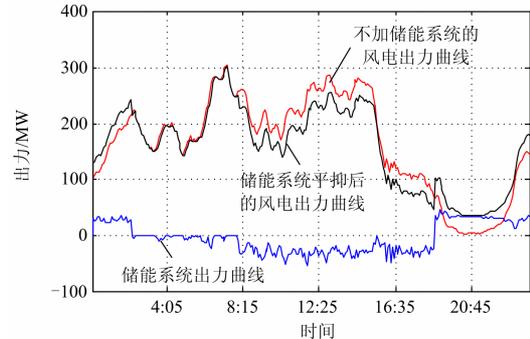


图 4 典型日储能系统及风电功率曲线

Fig. 4 Energy storage system and wind power curve of typical day

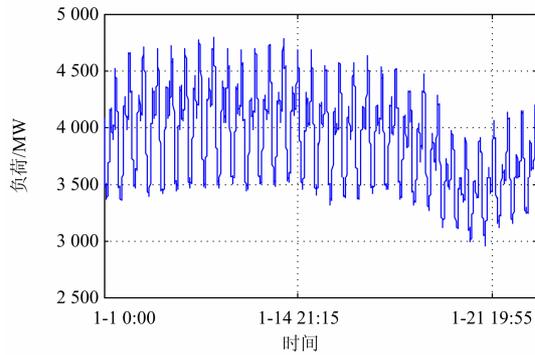


图5 月负荷功率曲线

Fig. 5 Monthly load power curve

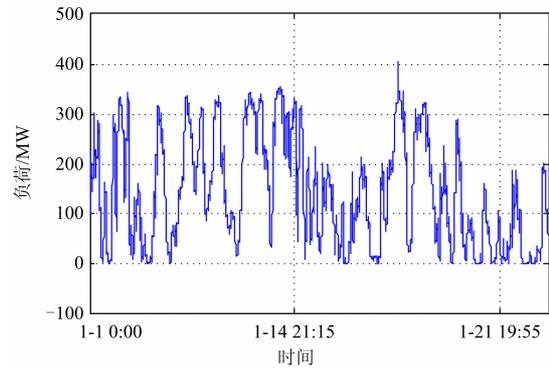


图6 月风电功率曲线

Fig. 6 Monthly wind power curve

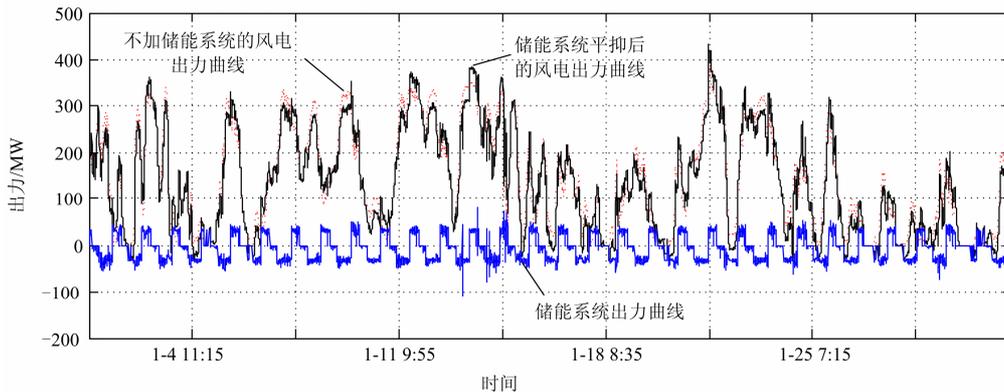


图7 月储能系统及风电功率曲线

Fig. 7 Monthly energy storage system and wind power curve

表1 加装储能前后风电场输出功率波动统计表

Table 1 Statistical table of the power fluctuations of wind farms output before and after the installation of energy storage system

样本数据来源	最大波动率		小于波动极限概率		反调峰概率	
	风电	风储	风电	风储	风电	风储
春季	20.5%	16.6%	0.997	1	35%	0
夏季	33.6%	16.7%	0.990	1	33%	0
秋季	12.2%	13.9%	1	1	16%	0
冬季	17.6%	14.4%	0.997	1	19%	0

分析表1中数据可知: 储能并网运行后, 风储合成出力的波动率均被抑制在允许的极限波动率内, 风储合成出力的不再出现反调峰现象。使平抑后的风电场出力在系统运行高危时段(谷荷区和峰荷区)追踪负荷变化规律, 有效提高了风电对并网系统运行的友好性。这是因为在本文的策略下, 并不追求全时段大幅值的平抑风电波动, 而是从风电并网系统安全稳定运行及电能质量控制对风电出力需求角度, 在基本维持风电出力既有总的出力分布

基础上, 针对性地平抑其关键时间节点上的变化趋势和平抑功率波动越过系统所能接受的变化极限值的风电出力。这就真正做到了较小副作用的中医调理式“对症下药”, 使研究结论既满足系统运行对平抑风电波动的要求又为避免研究数据局限带来的“数据陷阱”, 对基于更长时间跨度数据得到的仿真结果如图5~图7所示, 进行的对比分析可知, 在得到与前述相同的结论外, 还发现虽然风电出力没有任何显性的规律, 但储能系统的出力却大致呈现与负荷分布相同的规律, 即以天为周期有规律地变化。本文对其他11个月的数据进行了仿真, 可以得到同样的结论, 鉴于篇幅仿真结果不一列出。这就提示我们对于特定的风电并网系统来讲, 基于本文策略的储能系统容量有一个极限值, 对于本文研究的某区域电网, 初步的研究结论是储能系统的最小能量约为185.6 MWh左右, 考虑到适当的冗余度储能系统能量约为250 MWh左右, 这对于目前的技术条件来讲是可行的。这就进一步论证了本文提出的基于协调负荷和风电功率波动的储能系统改善风电场出力曲线策略的工程实践意义。

3 结论

本文提出的基于负荷和风电功率波动的储能系统改善风电场出力曲线策略,以较低的成本实现了利用储能系统平抑风电功率波动,提高风电对其并网系统的友好性,为储能系统大规模并网提供了一定的理论和技术支持,对于推动风电的大规模发展和我国坚强智能电网的发展具有一定的理论和应用价值。

参考文献

- [1] 陈星莺, 刘孟觉, 单渊达. 超导储能单元在并网型风力发电系统的应用[J]. 中国电机工程学报, 2001, 21(12): 63-66.
CHEN Xing-ying, LIU Meng-jue, SHAN Yuan-da. Application of super conducting magnetic energy storage system—SMES in wind power system of network-forming[J]. Proceedings of the CSEE, 2001, 21(12): 63-66.
- [2] 崔林, 文劲宇, 程时杰. 超导储能系统抑制风力发电功率波动的研究[J]. 电力科学与技术学报, 2008, 23(1): 24-30.
CUI Lin, WEN Jin-yu, CHENG Shi-jie. Research on the application of superconducting magnetic energy storage unit to damp wind generation power fluctuating[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2008, 23(1): 24-30.
- [3] 李剑楠, 乔颖, 鲁宗相, 等. 大规模风电多尺度出力波动性的统计建模研究[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 36(3): 36-43.
LI Jian-nan, QIAO Ying, LU Zong-xiang, et al. Research on statistical modeling of large-scale wind farms output fluctuations in different spacial and temporal scales[J]. Power System Protection and Control, 2012, 36(3): 36-43.
- [4] 李建林. 大规模风力发电储能系统[J]. 变频器世界, 2009(19): 20-21.
LI Jian-lin. Energy storage system for large-scale wind generation[J]. The World of Inverters, 2009(19): 20-21.
- [5] 李霄, 胡长生, 刘昌金, 等. 基于超级电容储能的风电场功率调节系统建模与控制[J]. 电力系统自动化, 2009, 33(9): 86-90.
LI Xiao, HU Chang-sheng, LIU Chang-jin, et al. Modelling and controlling of SCES based wind farm power regulation system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2009, 33(9): 86-90.
- [6] 刘世林, 孙海顺, 顾明磊, 等. 一种新型风力发电机与飞轮储能联合系统的并网运行控制[J]. 电工技术学报, 2012, 27(4): 248-254.
LIU Shi-lin, SUN Hai-shun, GU Ming-lei, et al. Novel structure and operation control of a flywheel energy storage system associated to wind generator connected to power grid[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2012, 27(4): 248-254.
- [7] 张步涵, 曾杰, 毛承雄, 等. 串并联型超级电容器储能系统在风力发电中的应用[J]. 电力自动化设备, 2008, 28(4): 1-4.
ZHANG Bu-han, ZENG Jie, MAO Cheng-xiong, et al. Application of series-parallel energy storage system with super-capacitor in wind power generation[J]. Automation of Electric Power Systems, 2008, 28(4): 1-4.
- [8] Cimuca G O, Saudemont C, Robyns B, et al. Control and performance evaluation of a flywheel energy-storage system associated to a variable-speed wind generator[J]. IEEE Trans on Industrial Electronics, 2006(52): 1074-1085.
- [9] 张坤, 吴建东, 毛承雄, 等. 基于模糊算法的风电储能系统的优化控制[J]. 电工技术学报, 2012, 27(10): 235-241.
ZHANG Kun, WU Jian-dong, MAO Cheng-xiong, et al. Optimal control of energy storage system for wind power generation based on fuzzy algorithm[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2012, 27(10): 235-241.
- [10] 张步涵, 曾杰, 毛承雄, 等. 电池储能系统在改善并网风电场电能质量和稳定性中的应用[J]. 电网技术, 2006, 30(15): 54-58.
ZHANG Bu-han, ZENG Jie, MAO Cheng-xiong, et al. Improvement of power quality and stability of wind farms connected to power grid by battery energy storage system[J]. Power System Technology, 2006, 30(15): 54-58.
- [11] 于芑, 赵瑜, 周玮, 等. 基于混合储能系统的平抑风电波动功率方法的研究[J]. 电力系统保护与控制, 2011,

- 39(24): 35-40.
- YU Peng, ZHAO Yu, ZHOU Wei, et al. Research on the method based on hybrid energy storage system for balancing fluctuant wind power[J]. Power System Protection and Control, 2011, 39(24): 35-40.
- [12] 徐涛, 徐习东. 大容量储能系统的保护策略研究[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(8): 16-22.
- XU Tao, XU Xi-dong. Research on protection strategy of large-scale energy storage system[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(8): 16-22.
- [13] LU Ming-shun, CHANG Chung-liang, Lee Wei-Jen, et al. Combining the wind power generation system with energy storage equipment[J]. IEEE Trans on Industry Applications, 2009, 45(6): 2109-2115.
- [14] 诸嘉慧, 宝旭峰, 丘明, 等. 基于混合高温超导储能系统的电网动态功率补偿策略与试验[J]. 电工技术学报, 2012, 27(8): 14-20.
- ZHU Jia-hui, BAO Xu-zheng, QIU Ming, et al. Power fluctuation compensation research in power system using a high temperature hybrid SMES[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2012, 27(8): 14-20.
- [15] Mary Black, Goran Strbac. Value of bulk energy storage for managing wind power fluctuations[J]. IEEE Trans on Energy Conversion, 2007, 22(1): 197-205.

收稿日期: 2013-04-13; 修回日期: 2013-12-24

作者简介:

袁铁江(1975-), 男, 副教授, 研究方向为储能技术和风力发电及其并网技术; E-mail: xjuytj@163.com

陈洁(1975-), 女, 副教授, 研究方向为新能源发电技术和智能材料技术;

刘沛汉(1988-), 男, 在读研究生, 研究方向为风力发电及其并网技术。