

基于风电功率 min 级分量波动特性的 风电场储能容量优化计算

冯江霞¹, 梁军², 冯益坤³

(1. 国网潍坊供电公司, 山东 潍坊 261021; 2. 电网智能化调度与控制教育部重点实验室(山东大学), 山东 济南 250061; 3. 中国重汽技术发展中心, 山东 济南 250116)

摘要: 储能为抑制风电功率随机波动性对电力系统的不利影响提供了可能。为减小风电功率随机波动分量对电力系统的影响, 提出用储能设备平滑风电功率随机波动频繁的 min 级分量, 并通过分析风电功率 min 级分量的波动特性, 建立对应的储能容量优化配置模型。该模型在充分把握风电功率 min 级分量波动特性的基础上, 以概率统计的区间估计理论确定储能系统的容量配置和最大充放电功率。该优化模型可以较小容量的储能设备改善风电功率的平滑输出, 有利于减小风电功率随机波动性对电力系统的不利影响。仿真算例表明了该算法的有效性。

关键词: 风力发电; 储能容量; 最大充放电功率; 置信度

Optimization calculation of wind farm storage capacity based on minute-scale wind power characteristic

FENG Jiangxia¹, LIANG Jun², FENG Yikun³

(1. State Grid Weifang Power Supply Company, Weifang 261021, China; 2. School of Electrical Engineering, Shandong University, Jinan 250061, China; 3. China National Heavy Truck Group Technology Centre, Jinan 250116, China)

Abstract: The energy storage system makes randomly fluctuating wind power feasible for pre-determined power dispatching. To reduce impacts of wind power random fluctuation component on power grid, an optimization method for determining storage capacity is proposed to smooth wind power minute-scale, based on the statistical analysis of wind power minute-scale wave characteristic. Considering the wind power minute-scale characteristic, the optimization model is built to confirm storage capacity and maximum charging and discharging power by using interval theory of probability and statistics. The study can smooth wind power minute-scale by small capacity storage and reduce the impacts of wind power on power grid, and the model is proved to be effective.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 51177091) and Natural Science Foundation of Shandong Province (No. ZR2010EM055).

Key words: wind power; energy storage capacity; maximum charging and discharging power; degree of confidence

中图分类号: TM77 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2015)03-0001-06

0 引言

风电并网给电力系统的电能质量、电压稳定等带来巨大挑战^[1-3], 究其原因, 主要是因为风电本身的随机波动性与间歇性^[4]。由于风电自身特性, 风电功率的预测精度比较低, 尤其是随机波动比较频繁的 min 级分量难以准确预测, 使得相关部门对风

电的调度存在困难, 为应对风电给电力系统带来的影响, 需加大旋转备用容量^[5-7], 以维持电力系统的安全、稳定运行。因此, 如何平滑风电功率, 减少并网风电的随机波动性, 直接影响电力系统消纳风电的能力及电网的可靠运行。

目前, 应对风电功率随机波动的方式有两种^[8]。一是计及风电的优化调度; 二是控制风电输出, 或实施储能。由于风电的随机波动较大, 因此计及风电优化调度时需要有足够的备用电源用于调控风电的波动功率, 调频电厂的容量需要足够大, 对于整个电网

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51177091); 山东省自然科学基金资助项目(ZR2010EM055)

来说不经济；而风电场配置合适容量的储能设备平滑其输出功率，对平滑后的风电功率进行优化调度，可减少调频电厂容量，实现风电接入电网的经济运行。

现阶段，国内外学者对储能系统用于平滑风电场输出功率的研究众多，储能容量的优化多为长时间尺度下的容量配置^[9-15]，其目标是使得平滑输出功率与日调度计划相协调，其容量配置较大。如何配置较小容量的储能设备应对风电功率的随机波动，尤其针对平滑风电功率波动频繁的 min 级分量的研究较少。

风电功率包含持续分量和 min 级分量，其中持续分量较为平滑，预测精度高，而 min 级分量波动幅度较小，但波动频繁，使得风电功率预测准确度下降。若用储能设备平滑 min 级分量，可减少风电输出功率的随机波动性，提高预测精度，进而向相关调度部门提供更有用的风电预测功率。由此，极有必要针对平滑风电功率 min 级分量的风电场储能容量优化问题进行深入研究。

综上，为平滑风电功率随机波动频繁的 min 级分量，进而提高风电功率预测精度，本文提出计及风电功率 min 级分量波动特性的风电场储能容量优化决策方法。该方法首先充分把握风电功率 min 级分量的分布规律，并综合考虑平滑效果和储能容量的对立关系，以概率统计的区间估计理论为基础，以满足某一置信度的充放电需求为目标，确定储能系统的容量配置。考虑最大充放电功率对储能设备的造价成本及使用性能有较大影响，本文同样以概率统计的区间估计理论法确定储能系统的最大充放电功率。这一研究可以较小容量的储能设备改善风电功率的平滑输出，减少风电功率随机波动性对电力系统的影响。

1 风电功率 min 级分量波动特性分析

风电功率包含持续分量和 min 级分量。其中持续分量波动周期较长，波动性较小，对于电力系统和功率预测的影响较小；而 min 级分量波动周期较短，波动性较大，如果并网风电容量大到一定程度，该分量对于电力系统的电能质量会造成较大影响。

文献[16]中分离负荷 min 级分量的算法，采用滑动平均法分离风电功率 min 级分量。其具体做法是：以每个风电功率值前、后两段功率值滑动求平均得风电功率的持续分量，该分量与风电功率间的差值即为风电功率 min 级分量。如式(1)、式(2)所示。

$$P_m(t) = P(t) - P_f(t) \quad (1)$$

$$P_f(t) = \frac{1}{2M} (P(t+M-1) + P(t+M-2) + \dots + P(t) + P(t+1) + \dots + P(t+M)) \quad (2)$$

式中： $P(t)$ 是 t 时刻的风电功率值； $P_f(t)$ 是 t 时刻的风电功率持续分量； $P_m(t)$ 是叠加在持续分量上的变化量，即风电功率 min 级分量； $2M$ 是滑动平均时段长度。

M 的取值与风电功率幅值的采样和存储周期有关。该值太小，则风电功率的短时波动会反应在持续分量上；反之，则风电功率随时间变化的趋势会反应在 min 级分量上，使得 min 级分量不再是随机变量。依据 min 级负荷分量分离的经验，该值取为 15~30 min 较为合适。

为描述风电功率 min 级分量波动特性，以风电功率 min 级分量数据为基础，形成包含风电功率 min 级分量波动特性的统计公式，如式(3)。

$$\varphi(P_m) = \frac{N(P_m)}{\sum_{P_m = \min\{P_{m1}, P_{m2}, \dots, P_{mn}\}}^{\max\{P_{m1}, P_{m2}, \dots, P_{mn}\}} N(P_m)} \times 100\% \quad (3)$$

其中： $N(P_m)$ 为 $P_m \in \{P_m, P_m + \Delta P_m\}$ 的总次数； $\varphi(P_m)$ 表示风电功率 min 级分量 P_m 出现的概率。

在历史数据充分的条件下，可通过多年度数据加权求均值，以提高分布规律统计的精度。以美国的 Arkansas 和 Michigan 地区风电场为例，进行风电功率 min 级分量的概率分布统计，如图 1 所示。

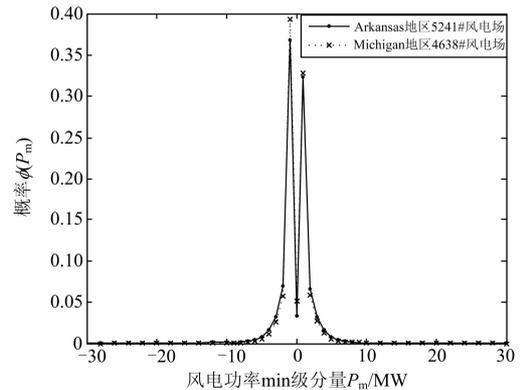


图 1 风电功率 min 级分量分布特性曲线

Fig. 1 Probability distribution of wind power minute-scale

由图 1 所示，风电功率 min 级分量的概率统计规律基本一致，并且近似以 $P_m=0$ 处为左右对称。由此分析，风电功率 min 级分量的概率分布曲线可近似看成以 0 为对称中心的左右对称图形。

2 基于风电功率波动特性的储能容量估法

2.1 储能容量优化配置

现阶段的储能设备分为功率型和能量型。功率型设备比功率大，比能量低，如超级电容器和飞轮储能；能量型设备与之相反，如蓄电池。平滑风电功率 min 级分量所需的储能容量较小，但需充放电

功率时的快速响应及较高的循环使用寿命,因此选用功率型储能设备(Power Energy Storage System, PESS)作为平滑风功率 min 级分量的储能设备。其储能策略是: min 级分量大于 0 时, PESS 充电; min 级分量小于 0 时, PESS 放电。

风电功率 min 级分量的大小决定了储能设备充放电状态及其充放电功率。为确定风电场需配置的最佳储能容量,将所研究时间段内的风电功率 min 级分量分为连续上调量和连续下调量。其中连续上调量是指某一段时间内 $P_m(t)$ 均大于 0, PESS 处于充电状态;连续下调量是指某一段时间内 $P_m(t)$ 均小于 0, PESS 处于放电状态。分别对连续上调量和连续下调量时间段($t_{j1} \sim t_{j2}$)内的 $P_m(t)$ 进行积分,该积分量称为储能系统充电或放电能量,统称为储能系统充放电能量。如式(4)所示。

$$C_j = \int_{t_{j1}}^{t_{j2}} P_m(t) dt \quad (4)$$

式中, C_j 是第 j 个连续上调或下调时间段内的充放电能量,该值大于 0,则为充电状态,反之,为放电状态。

为描述储能系统充放电量的分布特性,以储能系统充放电能量数据为基础,形成包含储能系统充放电能量波动特性的统计公式,如式(5)所示。

$$\varphi(C) = \frac{N(C)}{\max\{C_1, C_2, \dots, C_n\}} \times 100\% \quad (5)$$

$$P_p = \min\{C_1, C_2, \dots, C_n\}$$

其中: $N(C)$ 为 $C \in \{C, C+\Delta C\}$ 的总次数; $\varphi(C)$ 表示储能系统充放电能量 C 出现的概率。

同样,以美国的 Arkansas 和 Michigan 地区风电场为例,其储能系统充放电量的分布规律如图 2 所示。储能系统的充放电分布规律大体一致,其分布特性曲线近似为左右对称图形,以 $C=0$ 处为左右对称点。

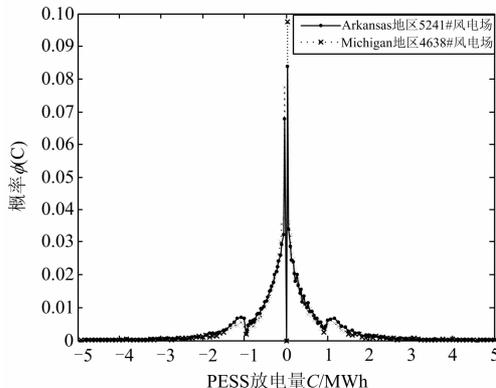


图 2 储能系统充放电能量概率分布特性曲线

Fig. 2 Probability distribution of energy storage system of charging-discharging

对于特定的风电场配置储能容量越大,其平滑效果越好,储能投资成本随之增大。综合考虑风电场储能系统的经济效益及其平滑效果,风电场的储能系统容量满足绝大多数充放电需求时的综合经济效益最佳。本文依据概率统计的区间估计理论,以式(6)确定风电场储能容量的大小。

$$P(-C_{\text{bat}} \leq C \leq C_{\text{bat}}) \geq 1 - \alpha \quad (6)$$

其中: C 是 PESS 充放电能量; C_{bat} 是最佳储能容量; $1-\alpha$ 是置信度。

2.2 储能系统的最大充放电功率的确定

储能系统的充放电状态由风电功率 min 级分量决定,若没有最大充放电功率及容量的限制,则储能系统的充放电功率为

$$P_{\text{bat}}(t) = P_m(t) \quad (7)$$

储能系统充放电功率的概率分布规律与风电功率 min 级分量的分布规律一致,如式(3)所示。考虑到最大充放电功率会影响储能设备的造价成本及使用性能,且出现高充放电功率的概率较小,本文风电场储能系统的最大充放电功率的确定亦用概率统计的区间估计理论获取,如式(8)所示。

$$P(-P_{\text{bat}}^{\text{max}} \leq P \leq P_{\text{bat}}^{\text{max}}) \geq 1 - \beta \quad (8)$$

式中: $P_{\text{bat}}^{\text{max}}$ 是 PESS 的最大充放电功率; $1-\beta$ 是置信度。

2.3 储能系统平滑效果的评价标准

为了定性分析储能系统平滑风电场输出功率的效果,本文提出两个评估指标: 1) 为分析储能平滑风电功率的效果,提出风电场输出功率 min 级分量占有比例; 2) 为分析从不同时间级考虑平滑风电场输出功率的效果,提出用相关系数分析参考出力曲线和经储能系统作用后的风电场出力曲线的逼近程度。

风电功率 min 级分量占有比例可以衡量风电场输出功率经储能平滑作用的效果。通过比较平滑前后风电场输出功率的 min 级分量占有比例,及其变化大小,可以有效评价风电场储能容量配置的合理性及其有效性。其计算公式如式(9)所示。

$$\varphi = \frac{\sum |P_m(t)\Delta t|}{\sum P(t)\Delta t} \times 100\% \quad (9)$$

其中: $\sum |P_m(t)\Delta t|$ 是研究时间内 min 级分量的总和; $\sum P(t)\Delta t$ 是风电场的输出电能总和。

文献[17]考虑风电场储能容量与现有调度计划的适应性,建立风电场储能容量优化模型,从小时级考虑了风电场储能容量优化配置。其算例分析证明,该优化模型可以实现风电场输出功率的分时段平滑输出。为分析本文所提模型与文献[13]所提模

型对风电场输出功率具有等同的平滑效果，定义了风电场参考出力与经储能系统作用后的出力间的相关系数，其值越大，说明两曲线越逼近，达到的预期平滑效果愈好。其计算公式如式(10)所示。

$$r = \frac{\sum_{i=1}^N |P_d(i) - \bar{P}_d| |P_{ref}(i) - \bar{P}_{ref}|}{\sqrt{\sum_{i=1}^N |P_d(i) - \bar{P}_d|^2} \sqrt{\sum_{i=1}^N |P_{ref}(i) - \bar{P}_{ref}|^2}} \quad (10)$$

其中： P_d 为经储能作用后风电场输出功率； \bar{P}_d 为经储能作用后风电场输出功率的平均值； P_{ref} 为风电场参考出力，对于本章模型是风电功率的持续分量 P_r ； \bar{P}_{ref} 为参考出力的平均值。

3 算例分析

本文以美国 Texas 地区的 Sweetwater 风电场的功率数据为基础，因风电输出功率具有年度周期性，以某年的数据为例，以 PESS 作为储能设备，因本模型不涉及 PESS 的具体控制参数，其 PESS 的数学模型可参考文献[17]，对上文所提储能容量优化方法的正确性与有效性进行仿真分析。

3.1 PESS 容量及最大充分电功率优化配置

Sweetwater 风电场的装机容量 585 MW，应用滑动平均法分离风电功率 min 级分量。为适应 min 级短时调度需求，分离风电功率 min 级分量的平滑时间常数取为 15 min。

按式(3)统计风电功率 min 级分量的分布规律，如图 3 所示；按式(4)、式(5)统计储能系统充放电量的分布规律，如图 4 所示(图中只截取概率相对较大的 PESS 充放电电量)。

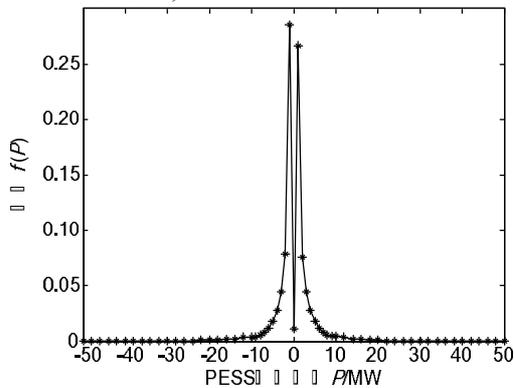


图 3 PESS 充放电功率概率分布

Fig. 3 Probability distribution of PESS

综合考虑风电场储能系统的经济效益及其平滑效果，依据式(6)和式(8)确定最佳容量及最大充放电功率。算例结果如表 1 所示。

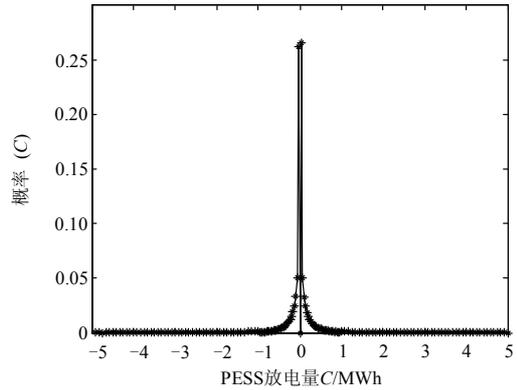


图 4 储能充放电电量概率分布

Fig. 4 Probability distribution of energy storage system of charging-discharging

表 1 算例结果

Table 1 Example system optimization results

	优化值	满足概率 P/%
C_{bat}/MWh	0.633	90.18
P_{bat}^{max}/MW	5.0	92.36

其中， α 、 β 均取为 0.10，即置信度为 0.90。风电场的最佳储能容量为 0.633 MWh，最大充放电功率为 5.0 MW。

3.2 平滑效果评估

依据本文所提风电场储能容量配置模型，满足 Sweetwater 风电场平滑 min 级风电功率分量需要配置的储能容量是 0.633 MWh，其最大充放电功率是 5.0 MW。以 PESS 作为储能设备，其平滑效果如图 5 所示，PESS 充放电功率与风电场输出功率 min 级分量的对比图如图 6 所示。

由图 5、图 6 可见，经储能平滑的风电场输出功率与滑动平滑而得的理想输出功率曲线及 PESS 的充放电功率与风电场输出功率 min 级分量基本一致，某些时刻存在差异。出现上述现象的原因是：
 ①当 PESS 容量超过其最大容量限制时，下一时刻 PESS 不再充电，PESS 在此时间段内的充电功率用平均值表示。同理，当 PESS 容量小于其最低容量限制时，下一时刻 PESS 不再放电，该时刻风电场输出功率为原始风电机组输出功率，PESS 在此段时间内的放电功率用平均值表示。
 ②当风电功率 min 级分量大于 PESS 最大充电功率或小于最大放电功率时，PESS 充放电功率是 PESS 充放电功率的上下限。

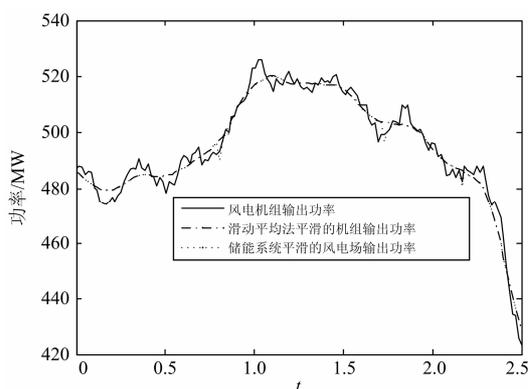


图 5 储能平滑后的风电场输出功率

Fig. 5 Wind output power of optimal storage capacity

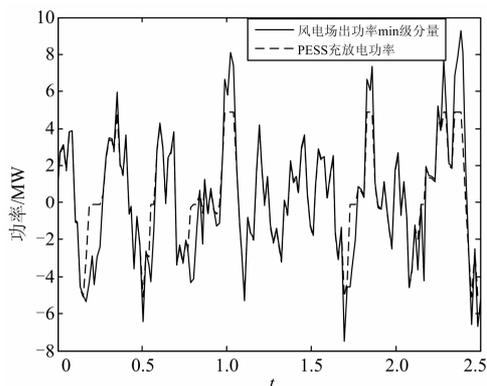


图 6 PESS 充放电功率

Fig. 6 Charging curves of PESS

依据式(9)计算储能容量平滑效果的风电功率 min 级分量占有比例如表 2 所示。

表 2 储能容量评估指标

Table 2 Evaluation indicator of storage capacity

	平滑前风电功率	平滑后风电功率
φ	1.225%	0.232%

由表 2 可见, 储能平滑前后风电场输出功率的 min 级风电功率分量占有比例相差较大, 验证了本文所提优化模型的正确性。平滑后风电场输出功率 min 级分量占有比例不为 0, 是因为储能设备容量及最大充放电功率的限制, 少数情况不能满足需求, 仍有风电功率 min 级分量。

本文和文献[17]分别从 min 级、小时级的时间级来考虑如何配置风电场储能容量。依据式(10)计算两个模型的相关系数, 其计算结果如表 3 所示。

由表 3 可见, 分钟级模型的优化储能容量是 0.633 MWh, 小时级模型的优化储能容量是 153.68 MWh, 两者相差近 250 倍。然而, 两种模型的参考出力与经储能作用后风电场输出功率间的相关系数

表 3 储能容量及相关系数的比较
Table 3 Comparison of storage capacity and correlation coefficient

模型	储能容量 $C_{bat,N}/MWh$	相关系数 r
分钟级模型	0.633	0.999
小时级模型	153.68	0.998

均在 0.99 左右, 说明本文所提模型可以较小容量的储能设备达到与小时级模型相同的预期效果。区别在于两种模型平滑风电场输出功率实现的效果不同, 小时级模型是实现风电场输出功率的分段平滑输出, 而分钟级模型是为平滑风电场输出功率中波动频繁的 min 级分量。

4 结论

为减小风电功率随机波动性对电力系统的影响, 实现风电功率平滑输出, 本文提出用储能设备平滑风电功率 min 级分量, 并建立基于风电功率波动特性的储能容量优化配置模型。该模型在充分把握风电功率 min 级分量波动的基础上, 以概率统计的区间估计理论确定储能系统的容量配置及其最大充放电功率。该优化模型使得经过储能系统作用输出的风电功率实现平滑输出, 减少了风电功率随机波动性对电力系统的影响, 同时达到最佳经济效益。

参考文献

- [1] KARKI R, HU P, BILLINTON R, et al. A simplified wind power generation model for reliability evaluation[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2006, 21(2): 533-540.
- [2] 胡国伟, 别朝红, 王锡凡. 考虑运行可靠性的含风电电力系统优化调度[J]. 电工技术学报, 2013, 28(5): 58-65.
HU Guowei, BIE Chaohong, WANG Xifan. Optimal dispatch in wind integrated system considering operation reliability[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2013, 28(5): 58-65.
- [3] 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 Jiandong, MAO Chengxiong, 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.
- [4] 武小梅, 白银明, 文福栓. 基于 RBF 神经网络的风电功率短期预测[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(15): 80-83.
WU Xiaomei, BAI Yinming, WEN Fushuan. Short-term

- wind power forecast based on the radial basis function neural network[J]. Power System Protection and Control, 2011, 39(15): 80-83.
- [5] 于晗, 钟志勇, 黄杰波, 等. 考虑负荷和风电出力不确定性的输电系统机会约束规划[J]. 电力系统自动化, 2009, 33(2): 20-24.
YU Han, ZHONG Zhiyong, HUANG Jiebo, et al. A chance constrained transmission network expansion planning method associated with load and wind farm variations[J]. Automation of Electric Power Systems, 2009, 33(2): 20-24.
- [6] 陈海炎, 陈金富, 段献忠. 含风电场电力系统经济调度的模糊建模及优化算法[J]. 电力系统自动化, 2006, 30(2): 22-26.
CHEN Haiyan, CHEN Jinfu, DUAN Xianzhong. Fuzzy modeling and optimization algorithm on dynamic economic dispatch in wind power integrated system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2006, 30(2): 22-26.
- [7] 张宁, 周天睿, 段长刚, 等. 大规模风电场接入对电力系统调峰的影响[J]. 电网技术, 2010, 34(1): 153-158.
ZHANG Ning, ZHOU Tianrui, DUAN Changgang, et al. Impact of large-scale wind farm connecting with power grid on peak load regulation demand[J]. Power System Technology, 2010, 34(1): 153-158.
- [8] 王成福, 梁军, 张利, 等. 基于机会约束规划的风电预测功率分级处理[J]. 电力系统自动化, 2011, 35(17): 14-19.
WANG Chengfu, LIANG Jun, ZHANG Li, et al. Classified treatment of wind power predictive power based on chance constrained programming[J]. Automation of Electric Power Systems, 2011, 35(17): 14-19.
- [9] 韩涛, 卢继平, 乔梁, 等. 大型并网风电场储能容量优化方案[J]. 电网技术, 2010, 34(1): 169-173.
HAN Tao, LU Jiping, QIAO Liang, et al. Optimized scheme of energy storage capacity for grid-connected large-scale wind farm[J]. Power System Technology, 2010, 34(1): 169-173.
- [10] ASAO T, TAKAHASHI R, MURATA T, et al. Evaluation method of power rating and energy capacity of superconducting magnetic energy storage system for output smoothing control of wind farm[C] // Proceedings of the 2008 International Conference on Electrical Machines, 2008: 1-6.
- [11] 许丹, 丁强, 潘毅, 等. 基于经济调度的微电网蓄电池容量优化[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(17): 55-59.
XU Dan, DING Qiang, PAN Yi, et al. Study on optimizing capacity of storage battery in microgrid system based on economic dispatch[J]. Power System Protection and Control, 2011, 39(17): 55-59.
- [12] 蒋泽甫, 谢开贵. 基于时序负荷的独立电网风/柴/储电源系统容量优化[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(20): 119-124.
JIANG Zefu, XIE Kaigui. Capacity optimization of power supply system for the isolated grid containing WT/DU/ESS based on chronological loads[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(20): 119-124.
- [13] 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 Shilin, SUN Haishun, GU Minglei, 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.
- [14] 邱培春, 葛宝明, 毕大强. 基于蓄电池储能的光伏并网发电功率平抑控制研究[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(3): 29-33.
QIU Peichun, GE Baoming, BI Daqiang. Battery energy storage based power stabilizing control for grid-connected photovoltaic power generation system[J]. Power System Protection and Control, 2011, 39(3): 29-33.
- [15] MENNITI D, PINNARELLI A, SORRENTION N, et al. A method to improve microgrid reliability by optimal sizing pv/wind plants and storage systems[C] // 20th International Conference on Electricity Distribution, 2009: 1-4.
- [16] 张浩, 马爱军, 李文斌, 等. 风电场日出力曲线和储能容量关系研究[J]. 中国电力, 2012, 45(6): 77-81.
ZHANG Hao, MA Aijun, LI Wenbin, et al. Research of the relationship between wind farm output and energy storage[J]. Electric Power, 2012, 45(6): 77-81.
- [17] 冯江霞, 梁军, 张峰, 等. 考虑调度计划和运行经济性的风电场储能容量优化计算[J]. 电力系统自动化, 2013, 37(1): 90-95.
FENG Jiangxia, LIANG Jun, ZHANG Feng, et al. A method for the optimization calculation of wind farm energy storage capacity[J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(1): 90-95.

收稿日期: 2014-02-03; 修回日期: 2014-05-19

作者简介:

冯江霞(1988-), 女, 通信作者, 硕士, 主要研究方向为风力发电的控制及其对电力系统的影响; E-mail: fengjiangxia2006@126.com

梁军(1956-), 男, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为电力系统运行与控制;

冯益坤(1985-), 男, 硕士, 工程师, 主要研究方向新能源发电及电动汽车控制。