

用于提高风电场可调度性的储能系统预测控制策略

杨德友¹, 温佳鑫², 陈家荣², 蔡国伟¹

(1. 东北电力大学电气工程学院, 吉林 132012; 2. 香港理工大学电机工程学系, 香港 999077)

摘要: 大规模储能的应用提高了风电场/群的可调度性, 降低了大规模风电并网给电网带来的运行风险。为了充分利用储能系统柔性可控能力来提高风电场的可调度性, 文中提出了基于模型预测控制(model prediction control, MPC)风/储集成发电系统滚动调控策略。该策略首先根据风功率预测结果制定风/储集成发电系统期望输出, 即调度指令, 进而通过滚动优化, 在满足储能系统荷电状态、充放电深度等约束的前提下, 计算得到下一调度周期内储能系统的控制指令, 以保证风/储集成发电系统中风功率与储能系统有功的合成功率输出在最大程度上跟踪调度指令。以东北某风电场实际有功输出数据为基础, 计算分析了在配置不同容量储能系统时该方法的控制效果, 结果表明利用该方法对储能系统进行控制能够有效的提高风电场的可调度性, 在跟踪调度指令的同时保证了集成发电系统合成输出功率的平滑性。

关键词: 储能系统; 风电; 模型预测控制; 合成输出; 调度指令

Smoothing and Dispatching the Output of Wind/Battery Energy Storage Hybrid System via Model Prediction Control

YANG Deyou¹, WEN Jiabin², Kevin Chan², CAI Guowei¹

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

2. Department of Electrical Engineering, Hong Kong Polytechnic University, Hong Kong 999077, China)

Abstract: The application of large-scale energy storage makes wind farms more dispatchable, which lowers operating risks of the grid from interconnected large scale wind farms. In order to make full use of flexibility and controllability of energy storage to improve the schedulability of wind farms, we put forward a rolling and dispatching control strategy with a BESS based on model predictive control (MPC). The proposed control scheme firstly plans expected output, *i.e.* dispatching order of wind/battery energy storage hybrid system based on the predicted output of the wind farm, then calculates the order in the predictive horizon with the receding horizon optimization and the limitations of energy storage such as state of charge and depth of charge/discharge to maintain the combination of active output of the wind farm and the BESS to track dispatching order at the extreme. Moreover, we analyze the effectiveness of the proposed strategy with different sizes of capacity of the BESS based on the actual output of a certain wind farm in the northeast of China. The results show that the proposed strategy that controls the BESS can improve the schedulability of the wind farm and maintain smooth output of wind/battery energy storage hybrid system meanwhile tracking the dispatching order.

Key words: battery energy storage; wind power; model prediction control; combination active output; dispatching order

0 引言

风速的随机波动使得风电场有功输出的可调度性较弱, 在很大程度上限制了风能的利用效率^[1-5]。随着风电渗透率的不断提高, 其较弱的可调度性增加了电网的运行风险, 弃风问题较为突出^[6-9]。

大规模储能技术的成熟及应用为提高新能源

利用效率, 增强风电场有功可调度性^[10-12], 为保证含高渗透率风电的电网安全稳定运行提供了新的平台^[13-15]。近年来, 国内外专家学者对利用储能系统能量的快速吞吐能力平抑风电场输出的控制策略开展了广泛且深入的研究^[16-20]。目前应用最为广泛的低通滤波控制算法, 将风功率经过一阶滤波环节, 得到平抑目标, 进而将实际风功率与平抑目标之间的差值作为储能系统的功率补偿指令^[21-23]。文献^[18-19]提出的滑动平均控制与低通滤波控制原理基本一致。在利用小波变换对风功率时间序列分解的

基金资助项目: 国家自然科学基金(51507028; 51377017)。
Project supported by National Natural Science Foundation of China (51507028, 51377017).

基础上, 文献[20]利用混合储能平抑不同频率的波动分量, 使得风电场总体并网功率的波动得到缓解。文献[21]在考虑电池电量状态的基础上提出了基于动态规划算法的储能控制策略来平抑风功率波动。文献[22]首先根据电池动作量最小获得平抑目标, 进而应用模型预测控制算法(model predictive control, MPC)实现了风功率平抑。

上述控制策略主要目的为平抑风电场有功输出, 使风电场与储能的合成输出与风电场风功率预测值间的偏差最小, 但并未引入调度指令, 对于提高风电场可调度性的贡献有限。为此, 本文从电网调度需求角度出发, 提出了用于提高风电场可调度性的储能系统预测控制策略。首先根据风功率预测值下达未来调度周期(本文取4h)内风电有功输出的调度指令, 将该调度指令作为风/储集成发电系统合成输出的目标, 利用模型预测控制器(MPC)计算得到未来调度周期内储能系统的控制指令, 进而保证风/储集成发电系统合成输出在满足电网调度指令的要求下安全平稳并网, 保证电网的安全、高效运行。

1 风/储集成发电系统及调度模型

1.1 风/储集成发电系统结构原理

风/储集成发电系统的整体结构如图1所示, 该系统由风电场、储能电池组、变流器、变压器及功率调节单元组成, 通过输电线路连接至主电网。储能电池组(battery energy storage system, BESS)连接至风电场并网节点处, 通过变流器的控制进行充、放电以平滑风/储集成发电系统注入电网的净功率。

本文主要目标提高风电场可调度性, 使风/储集成发电系统并网功率尽可能的接近期望的调度指令 P_D 。为了到达上述目标, 在每个采样时间点, 利用风功率预测模型预测未来 H 步的风功率, 并将预测值作为调度指令, 通过功率调节单元内的控制策略计算出合理的储能电池组的充放电功率 P_B , 来补偿调度指令 P_D 和风场实际输出 P_W 的差值。在这种方式下, 注入电网的净功率(风/储集成发电系统并网的合成功率) P_G 将跟踪电网调度中心下达的调度指令, 跟踪效果主要取决于储能电池组的容量及功率调节单元内嵌控制策略。

1.2 系统模型

根据图1及2.1节分析可以得到风储集成发电系统的功率和能量平衡方程^[24]:

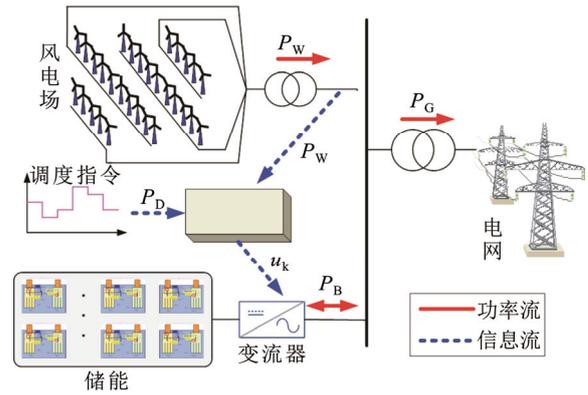


图1 风/储集成发电系统结构图

Fig.1 Structure chart of wind/battery energy storage hybrid system

$$\begin{cases} P_G(k+1) = P_B(k) + P_W(k) \\ E_B(k+1) = E_B(k) - \eta \Delta T_B P_B(k) \end{cases} \quad (1)$$

式中: $P_G(k)$ 为注入电网的净功率, 即系统联合输出; $P_B(k)$ 为功率控制信号。当 $P_B(k)>0$ 时表示 BESS 放出的功率; 当 $P_B(k)<0$ 时, 表示 BESS 吸收的功率。 $P_W(k)$ 表示风功率, $E_B(k)$ 表示 BESS 的剩下的能量, 即荷电状态乘以电池容量。电池的荷电状态是电池的当前可用能量和额定容量的比, 以百分数的形式表示。 ΔT_B 是从 MW 到 MWh 的转换系数, 例如, 当采样时间为 5 min 时, $T_B=5 \text{ min}/60 \text{ min}=1/12$, η 为电池的转换效率, 本文选取为 90%。

将方程(1)转换成状态空间模型为:

$$\begin{cases} \mathbf{x}(k+1) = \mathbf{A}\mathbf{x}(k) + \mathbf{B}_1 u(k) + \mathbf{B}_2 d(k) \\ \mathbf{y}(k) = \mathbf{C}\mathbf{x}(k) \end{cases} \quad (2)$$

式中, 状态量为

$$\mathbf{x}(k) = \begin{bmatrix} x_1(k) \\ x_2(k) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} P_G(k) \\ E_B(k) \end{bmatrix} \quad (3)$$

控制输入 $u(k)=P_B(k)$;

系统输出 $y(k)=P_G(k)$;

功率扰动 $d(k)=P_W(k)$;

与系统相结合可得:

$$\begin{aligned} \mathbf{A} &= \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad \mathbf{B}_1 = \begin{bmatrix} 1 \\ -\eta \Delta T_B \end{bmatrix} \\ \mathbf{B}_2 &= \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix}, \quad \mathbf{C} = [1 \quad 0] \end{aligned} \quad (4)$$

进一步检验上述系统的可控性, 由于控制矩阵 $\mathbf{Q}=[\mathbf{B}_1, \mathbf{A}\mathbf{B}_1]$ 是满秩, 表明该系统可控。

出于技术及经济性的考虑, 实际运行过程中, 储能系统的控制主要受荷电状态和充放电功率的约束:

1) 荷电状态约束

由于 BESS 系统的寿命受 BESS 本身的充放电深度影响, 为了提高电池的寿命, 降低储能系统的成本, 对储能系统任一时刻的荷电状态进行了严格的要求

$$S_{\min} \leq x_2(k) / C_B \leq S_{\max}, \quad k=1,2,\dots,P \quad (5)$$

式中: $x_2(k)$ 为 k 时储能装置的剩余能量; C_B 为 BESS 的容量; S_{\min} 为 BESS 的荷电状态下限; S_{\max} 为 BESS 的荷电状态上限。

2) 充放电功率约束

为了保证 BESS 系统的安全运行, 在实际的 BESS 系统中, BESS 的最大充放电功率具有严格的约束。在考虑 BESS 当前时刻的荷电状态情况的同时, 其最大充放电功率约束分别为:

$$P_c = \min\left(\left(S_{\max} - S(k-1)\right)C_B / \eta\Delta t, P_{\max_ch}\right) \quad (6)$$

$$P_d = \min\left(\left(S(k-1) - S_{\min}\right)C_B / \eta\Delta t, P_{\max_f}\right) \quad (7)$$

式中: $P_c(k)$ 和 $P_d(k)$ 分别为当前时刻 BESS 的最大可充电功率和最大可放电功率; P_{\max_ch} 和 P_{\max_f} 分别为电池最大充电和放电功率。

2 基于 MPC 风/储集成发电系统调控策略

2.1 风功率预测与调度指令

本文主要目的为利用储能系统提高风电场的可调度性, 即风/储集成发电系统合成有功输出 P_G 能够跟踪调度指令, 因此, 合理的调度指令对于提高集成系统合成输出与调度指令的符合度具有重要作用。

风电场短期风功率预测结果是制定调度指令的数据基础, 预测精度在一定程度上会影响控制效果。本文的研究重点为储能控制指令的计算, 因此, 本文首先采用文献[25]中的基于 ARIM 的风功率预测方法对风电场风功率进行预测, 并将调度周期内风功率预测值的平均值作为该周期的调度指令。假设调度周期为 4 h, 调度指令时间间隔为 30 min, 储能系统控制指令下达时间间隔为 5 min, 风功率采集间隔和风功率预测间隔均为 5 min, 具体以一个调度周期内的调度指令选取为例, 如图 2 所示。

在该调度周期开始前, 首先预测即将到来的调度区间内(4 h)的风功率, 将调度指令时间间隔内(30 min)的 6 个预测值的平均值作为该周期的调度指令。在本文提出的滚动调度策略中, 将其作为 MPC 控制器的参考输出, 使整个集成发电系统合成

输出跟踪该调度指令。

2.2 MPC 控制策略设计

模型预测控制(Model Predictive Control, MPC)是一种基于在线求解优化控制问题的解决方法。它能根据系统 k 时刻的状态 $x(k)$, 以及现在和未来一段时间的约束进行优化问题求解, 求得现在及未来一段时间内的控制量。

在本文提出的基于 MPC 的平抑调度策略中, 首先利用风电场风功率预测模型获取下一调度周期内的风功率预测值 P_w^f , 进而通过 2.1 节所示方法得到下一周期调度指令 P_D , 以风/储集成发电系统合成输出 P_G 能跟踪调度指令和电池动作量最小为控制目标, 通过滚动优化获得下一调度周期内储能系统功率控制指令 u , 原理如图 3 所示。将控制目标表示成二次型应为:

$$\min J(u) = \sum_{j=1}^p t_w (y(k+j) - r(k+j))^2 + \quad (8)$$

$$\sum_{j=1}^m t_u (u(k+j-1))^2$$

$$\text{s.t.} \begin{cases} S_{\min} C_B \leq x_2(k) \leq S_{\max} C_B \\ P_{\min_ch} \leq u(k) \leq P_{\max_f} \end{cases} \quad (9)$$

式中: $y(k+j)$ 表示预测输出; $r(k+j)$ 表示未来 $k+j$ 时

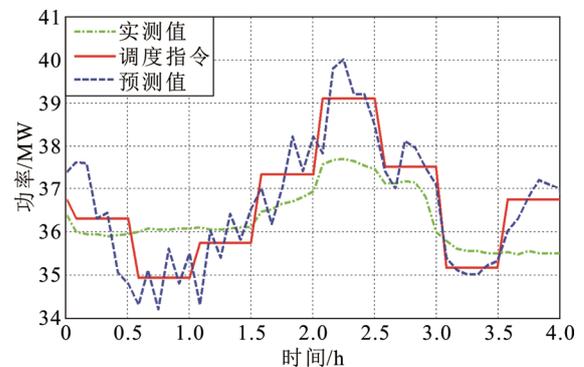


图 2 调度指令选取原理图

Fig.2 Schematic diagram of selecting dispatching order

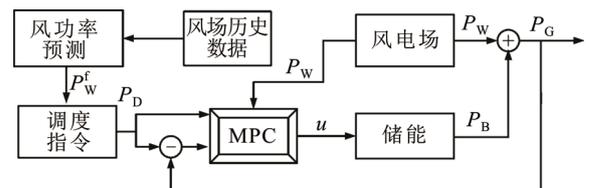


图 3 基于 MPC 的平抑调控策略原理图

Fig.3 Schematic diagram of smoothing and dispatching wind power via MPC

刻系统的调度指令, $j=1, \dots, p$; t_w 和 t_u 分别表示误差输出权重系数和控制增量权重系数。

式(8)及式(9)构成了二次规划的问题, 采用滚动优化控制策略, 取得最优控制序列。

根据模型预测控制算法原理, 结合本文的系统模型(2), 对预测时域内的系统响应 $y(k+p|k)$ 进行预测, 如式(10)所示。

式(10)中, m 为控制时域, $m \leq p$; $y(k+j|k)$ 表示 k 时刻预测的 $k+j$ 时刻的系统输出响应, $j=1, \dots, p$; $u(k+j|k)$ 表示 k 时刻控制变量的增值, $j=0, 1, \dots, m-1$; 当 $m \leq j \leq p$ 时, $u(k+j|k)=u(k+m-1|k)$; 当 $1 \leq j \leq p$ 时, $d(k+j|k)=d(k)$ 。

$$\begin{aligned}
 y(k+1|k) &= \mathbf{C}\mathbf{x}(k+1|k) + y(k) \\
 &= \mathbf{C}\mathbf{A}\mathbf{x} + \mathbf{C}\mathbf{B}_1 u(k|k) + \mathbf{C}\mathbf{B}_2 d(k) + y(k) \\
 y(k+2|k) &= \mathbf{C}\mathbf{x}(k+2|k) + y(k+1|k) \\
 &= (\mathbf{C}\mathbf{A}^2 + \mathbf{C}\mathbf{A})\mathbf{x} + (\mathbf{C}\mathbf{A}\mathbf{B}_1 + \mathbf{C}\mathbf{B}_1)u(k|k) + \mathbf{C}\mathbf{B}_1 u(k+1|k) + (\mathbf{C}\mathbf{A}\mathbf{B}_2 + \mathbf{C}\mathbf{B}_2)d(k) + y(k) \\
 &\vdots \\
 y(k+p|k) &= \mathbf{C}\mathbf{x}(k+p|k) + y(k+p-1|k) \\
 &= \sum_{i=1}^p \mathbf{C}\mathbf{A}^i \mathbf{x} + \sum_{i=1}^p \mathbf{C}\mathbf{A}^{i-1} \mathbf{B}_1 u(k|k) + \sum_{i=1}^{p-1} \mathbf{C}\mathbf{A}^{i-1} \mathbf{B}_1 u(k+1|k) + \dots + \sum_{i=1}^{p-m+1} \mathbf{C}\mathbf{A}^{i-1} \mathbf{B}_1 u(k+m-1|k) + \sum_{i=1}^p \mathbf{C}\mathbf{A}^{i-1} \mathbf{B}_2 d(k)
 \end{aligned} \tag{10}$$

3 算例分析

本文采用东北地区某额定容量为 45 MW 的风场实测数据进行仿真, 数据采样间隔为 5 min。

储能系统选用 NaS 电池, 其最显著的优点是响应速度, 从 0 到额定功率的响应时间仅仅为 10 s^[26], 可以在 5 min 内按额定功率进行发电。电池参数, 最大充放电功率 P_{\max_ch} 和 P_{\max_f} 均为 3 MW, 初始荷电状态为 50%, 荷电状态(state of charge, SOC)上下限约束为 20%~80%。

MPC 控制参数: 预测时域为和控制时域均为 30 min, 即 $p=m=30$ min, 误差输出权重系数 t_w 为 0.8, 控制增量权重系数 t_u 为 0.2。

文献[5]提出在电池 SOC 约束为 30~70%时, 用于风电场调度的储能系统容量应为风电场额定容量的 20%~30%。本文选用的 NaS 电池约束为 20%~80%, 因此本文在储能配置时在文献[5]比例基础上适当降低了配置比例, 对储能容量为风电场额定容量的 10%、15%和 20%, 即 4.5 MWh、6.75 MWh 和 9 MWh, 三种情况进行仿真计算与分析。

根据风功率滚动预测值及 2.1 节所述方法计算得到一天内的调度指令曲线, 如图 4 所示。

以图 4 所示调度指令为参考, 利用本文提出的基于 MPC 的平抑调度策略制定储能系统控制指令并执行, 得到的 24 h 内的平抑调度结果如图 5 所示。

由图 5 不难看出, 本文提出的平抑调度策略能够很好的跟踪调度指令, 随着储能配置容量的增加, 平抑效果也有显著提高, 其中以 (放大处区间最为明显), 但整体来看 6.75 MWh 和 9 MWh 容量配置的平抑效果较为接近。

进一步对平抑效果进行统计分析, 合成输出与调度指令间的偏差统计结果如表 1 所示, 频次分布结果如图 6 所示。

由统计结果可以看出, 三种储能容量情况下风储集成发电系统的输出与调度指令之间误差均小于 1.8 MW。当配置容量增加到 6.75 MWh 时, 最大功

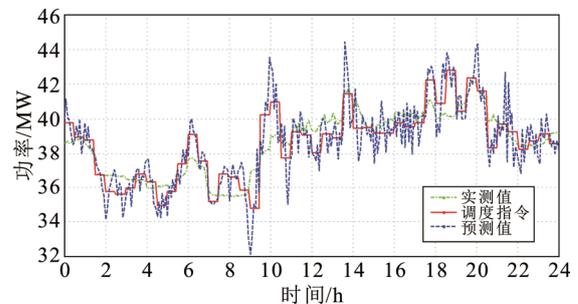


图 4 调度指令曲线

Fig.4 Curve of dispatching instruction

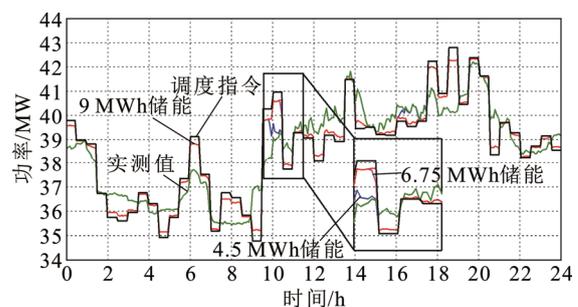


图 5 平抑调度效果图

Fig.5 Curve of smoothing and dispatching wind farm

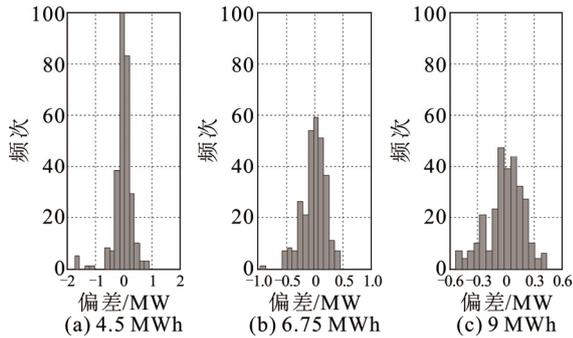


图6 功率偏差统计频次分布结果
Fig.6 Frequency distribution diagram

表1 功率偏差统计

Table 1 Statistics of power deviation

储能/MWh	偏差统计		
	均值	最小值	最大值
4.50	0.203 6	0	1.716 0
6.75	0.155 3	0	0.943 7
9.00	0.152 9	0	0.537 5

率误差从 1.716 MW 减小到 1 MW 以内, 而当配置容量进一步增加到 9 MWh 时, 最大功率误差功率减小到 0.6 MW 以内, 但 6.75 MWh 与 9 MWh 的合成输出与调度指令之间功率偏差的均值较为接近, 两种容量配置情况下总体平抑效果也较为接近。可见, 以本文所提出的平抑调度策略为基础, 合理的储能容量配置在提高风/储集成发电系统的可调度性的同时, 能够在一定程度上降低储能投资成本。

从图 7 所示的储能系统动作量变化曲线可以看出, 储能系统的动作量均在安全范围内, 但大多运行在最大可充放电功率的 50%(1.5 MW)以内。图 8 为储能系统 SOC 波动曲线, 随着容量的增大, 储能系统的 SOC 波动幅值逐渐降低, 有效的保证了储能系统的可动作空间, 进而保证风/储集成发电系统有功输出能够有效跟踪调度指令。

4 结论

本文首先根据风功率预测结果设计了未来调度周期内的调度指令, 进而利用 MPC 计算得到调度周期内储能系统控制指令, 仿真结果表明:

- 1) 本文提出的基于 MPC 的平抑调度策略能够保证风/储集成发电系统合成输出有效的跟踪调度指令, 增强风电场的可调度性;
- 2) 本文提出的平抑策略在降低合成输出与调度指令间偏差的同时, 兼顾了储能系统的荷电状态、

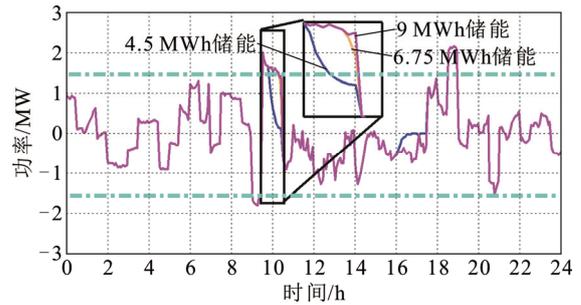


图7 储能系统动作量变化曲线

Fig.7 Curve of action for storage energy system

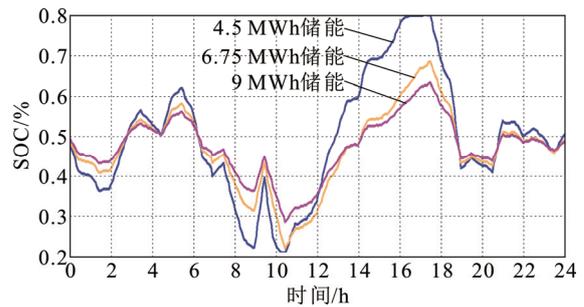


图8 储能系统 SOC 波动曲线

Fig.8 SOC curve of energy storage system

功率动作约束, 有效的保证了储能系统在调度周期内的能量可控空间。

本文仅是对应用基于 MPC 的储能控制策略提升风电可调度性的初步研究, 如何考虑风电预测误差及风功率的随机性是作者下一步需要深入研究的问题。

参考文献 References

- [1] 任永峰, 胡宏彬, 薛宇, 等. 全钒液流电池-超级电容混合储能平抑直驱式风电功率波动研究[J]. 高电压技术, 2015, 41(7): 2127-2134.
REN Yongfeng, HU Hongbin, XUE Yu, et al. Vanadium redox battery-super capacitor hybrid energy storage system for smooth direct-drive wind turbine power fluctuation[J]. High Voltage Engineering, 2015, 41(7): 2127-2134.
- [2] 刘吉臻. 大规模新能源电力安全高效利用基础问题[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(16): 1-9.
LIU Jizhen. Basic issues of utilization of large-scale renewable power with high security and efficiency[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(16): 1-9.
- [3] 赵兴勇, 杨涛, 王灵梅. 基于复合储能的微电网运行方式切换控制策略[J]. 高电压技术, 2015, 41(7): 2142-2147.
ZHAO Xingyong, YANG Tao, WANG Lingmei. Control strategy for operation modes transfer of micro-grid based on hybrid energy storage system[J]. High Voltage Engineering, 2015, 41(7): 2142-2147.
- [4] 苗福丰, 唐西胜, 齐智平. 风储联合调频下的电力系统频率特性分析[J]. 高电压技术, 2015, 41(7): 2209-2216.
MIAO Fufeng, TANG Xisheng, QI Zhiping. Analysis of frequency

- characteristics of power system based on wind farm-energy storage combined frequency regulation[J]. *High Voltage Engineering*, 2015, 41(7): 2209-2216.
- [5] TELEKE S, BARAN M E, HUANG A et al. Control strategies for battery storage for wind farm dispatching[J]. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 2009, 24(3): 725-732.
- [6] WANG X Y, VILATHGAMUWA D M, CHOI S S. Determination of battery storage capacity in energy buffer for wind farm[J]. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 2008, 23(3): 868-878.
- [7] LUO C, OOI B T. Frequency deviation of thermal power plants due to wind farms[J]. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 2006, 21(3): 708-716.
- [8] ABRANTES A. Overview of power quality aspects in wind generation[C]//North American Power System Symposium. Champaign, USA: IEEE, 2012: 1-6.
- [9] LUNDSAGER P, BARRING-Gould E I. Isolated system with wind power[C]//Wind Power in Power System. T.Ackermann, Ed.New York: Wiley, 2005:299-329.
- [10] RU Y, KLEISSL J, MARTINEZ S. Storage size determination for grid-connected photovoltaic systems[J]. *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, 2013, 4(1): 68-81.
- [11] BINDNER H, LUNDSAGER P. Integration of wind power in the power system[C]//IEEE 2002 28th Annual Conference of the Industrial Electronics Societyz. [S.l.]: IEEE, 2002: 3309-3316.
- [12] TELEKE S, BARAN M E, BHATTACHARYA S. Optimal control of battery energy storage for wind farm dispatching[J]. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 2010, 25(3): 787-794.
- [13] 李 伟, 吴凤江, 段建东, 等. 储能型功率补偿系统的无功功率与动态有功功率解耦控制[J]. *高电压技术*, 2015, 41(7): 2165-2172.
LI Wei, WU Fengjiang, DUAN Jiandong, et al. Decouple control strategy of dynamic active power and reactive power for storage energy-type power compensation system[J]. *High Voltage Engineering*, 2015, 41(7): 2165-2172.
- [14] 刘 青, 樊世通, 付 超, 等. 考虑不同蓄电池 SOC 状态的风/储/海水淡化孤立微电网能量管理系统设计[J]. *高电压技术*, 2015, 41(7): 2173-2179.
LIU Qing, FAN Shitong, FU Chao, et al. Energy management of isolated micro-grid with wind turbines, energy storage and seawater desalination devices considering different battery SOC state[J]. *High Voltage Engineering*, 2015, 41(7): 2173-2179.
- [15] 李 蓓, 田立亭, 靳文涛, 等. 规模化全钒储能电池系统级建模[J]. *高电压技术*, 2015, 41(7): 2194-2201.
LI Bei, TIAN Liting, JIN Wentao, et al. Modeling of scaled vanadium redox flow battery system[J]. *High Voltage Engineering*, 2015, 41(7): 2194-2201.
- [16] JIANG Q, WANG H. Two-time-scale coordination control for a battery energy storage system to mitigate wind power fluctuations[J]. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 2013, 28(1): 52-61.
- [17] NGUYEN C L, LEE H H, CHUN T W. Cost-optimized battery capacity and short-term power dispatch control for wind farm[J]. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 2015, 51(1): 595-606.
- [18] ARULAMPALAM A, BARNES M, JENKINS N, et al. Power quality and stability improvement of a wind farm using STATCOM supported with hybrid battery energy storage[J]. *IEE Proceedings-Generation, Transmission and Distribution*, 2006, 153(6): 701-710.
- [19] ZENG J, ZHANG B, MAO C, et al. Use of battery energy storage system to improve the power quality and stability of wind farms[C]//Power system Technology. Chongqing, China: IEEE, 2006: 1-6.
- [20] 韩晓娟, 陈跃燕, 张 浩, 等. 基于小波包分解的混合储能技术在平抑风电场功率波动中的应用[J]. *中国电机工程学报*, 2013, 33(19): 8-13.
HAN Xiaojuan, CHEN Yueyan, ZHANG Hao, et al. Application of hybrid energy storage technology based on wavelet packet decomposition in smoothing the fluctuations of wind power[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2013, 33(19): 8-13.
- [21] YOSHIMOTO K, NANAHARA T, KOSHIMIZU G. New control method for regulating state-of-charge of a battery in hybrid wind power/battery energy storage system[C]//Power System Conference and Exposition. Atlanta, USA: IEEE, 2006: 1244-1251.
- [22] 洪海生, 江全元, 严玉婷. 实时平抑风电场功率波动的电池储能系统优化控制方法[J]. *电力系统自动化*, 2012, 37(1): 103-109.
HONG Haisheng, JIANG Quanyuan, YAN Yuting. An optimization control method of battery smoothed in real time[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2012, 37(1): 103-109.
- [23] WEI L, JOOS G, ABBEY C. Wind power impact on system frequency deviation and an ESS based power filtering algorithm solution[C]//Power System Conference and Exposition. Atlanta, USA: IEEE, 2006: 2077-2084.
- [24] KOU P, GAO F, GUAN X H. Stochastic predictive control of battery energy storage for wind farm dispatching: Using probabilistic wind power forecasts[J]. *Renewable Energy*, 2015, 80: 286-300.
- [25] BILLINTON R, KARKI B, KARKI R. Unit commitment risk analysis of wind integrated power systems[J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2009, 24(2): 930-939.
- [26] VOLLKOMMER H T, MANDEVILLE J D, NICHOLS D K, et al. Field trial of AEP sodium-sulfur (NAS) battery demonstration project: interim report-plant design and expected performance[R]. Palo Alto, CA, USA: EPRI, 2003.



YANG Deyou

Ph.D.

Associate professor

Corresponding author

杨德友(通信作者)

1983—, 男, 博士, 副教授, 硕导

主要从事电力系统分析和新能源发电方面的研究工作

E-mail: eedyang@hotmail.com

收稿日期 2016-09-11 修回日期 2016-12-01 编辑 曹昭君