

双馈型风电场参与电压无功调节的分层控制方案

刘皓明¹, 唐俏俏¹, 朱凌志², 赵大伟², 李晨晨¹, 石磊³

(1. 河海大学能源与电气学院, 江苏 南京 211100; 2. 中国电力科学研究院, 江苏 南京 210003;
3. 国电南瑞科技股份有限公司, 江苏 南京 210061)

摘要: 针对弱联接风电场并网点电压波动问题, 通过对双馈风电机组功率关系分析, 以及电机定子、网侧换流器功率极限的推导, 在传统的无功控制方案的基础上, 提出了一种在电压跌落时机组发出无功以稳定电压的无功控制模式。可以根据电网电压波动情况, 选择参与无功控制机组数量, 充分发挥双馈风电场的无功能力, 减少使用率不高的无功补偿装置的投资。基于PSCAD/EMTDC平台搭建风电场接入电网仿真系统, 仿真结果验证了所提控制方案的有效性。

关键词: 双馈电机; 功率极限; 无功控制; 电压调节; 分层控制

Hierarchical control strategy of voltage and reactive power for DFIG wind farm

LIU Hao-ming¹, TANG Qiao-qiao¹, ZHU Ling-zhi², ZHAO Da-wei², LI Chen-chen¹, SHI Lei³

(1. College of Energy and Electrical Engineering, Hohai University, Nanjing 211100, China; 2. China Electric Power Research Institute, Nanjing 210003, China; 3. NARI Technology Development Limited Company, Nanjing 210061, China)

Abstract: Considering the problems of voltage fluctuations of weak connection wind farm, through the analysis of DFIG's power flow and derivation of the stator and grid-side converter's power limitation, the paper proposes a reactive power hierarchical control strategy that compensates reactive in priority when voltage drop, based on traditional reactive power control modes. The reactive power hierarchical control strategy chooses appropriate DFIG units according to the level of voltage fluctuations. That takes advantage of capability of DFIG reactive power, and saves the investment of the low-frequency reactive compensation device. Finally, the simulation model of small scale wind farm connecting to grid is built based on PSCAD/EMTDC simulation platform, the results prove that the proposed control strategy is effective.

This work is supported by National High-tech R & D Program of China (863 Program) (No. 2013AA050601).

Key words: DFIG; power limitation; reactive power control; voltage regulation; hierarchical control strategy

中图分类号: TM76 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2014)24-0079-07

0 引言

目前接入电网的风电场所占比例不断增大, 且多位于偏远的地区或者海上, 需要通过长距离输电线与电网相连。风电场的输出功率随风速变化而变化, 具有随机性、波动性和不可控性, 对电网的稳定运行带来了威胁, 风电机组的运行和控制方式对风电场以及接入电网的电压稳定有很大的影响^[1-3]。针对一些边远地区的风电场接入电网普遍存在电压不稳的情况, 考虑风电机组自身的无功支持能力, 可以给风电场的无功动态补偿带来更多的选择^[4-5]。目前应用较多的双馈型风电机组, 可对有功和无功

进行解耦控制, 机组的定子侧和网侧换流器均能够向电网注入无功, 对负荷的无功消耗动态补偿, 为电网提供电压支撑^[6-8]。

双馈风电机组发出有功多少主要取决于风速的大小, 而风力发电系统无功功率的输出主要取决于电网的需求以及无功控制方式^[9]。目前, 风电机组无功控制方式主要有功率因数控制和电压控制两种。一些学者对双馈风电机组的无功控制特性展开了研究, 文献[10]从功率关系出发, 分析了双馈风电机组的功率极限; 文献[11]对风电场参与电网电压调节进行了研究, 分析了风电机组参与无功电压控制的策略; 文献[12]阐述了利用机组的无功能力降低风电场功率损耗的观点; 文献[13]提出了双馈风电机组优先考虑网侧换流器的无功补偿能力来降

基金项目: 国家 863 高技术基金项目 (2013AA050601)

低机组的有功损耗,但未充分考虑定子侧的无功补偿能力;为减小机组内部的有功损耗,文献[14]提出了双层无功分配策略,在实现恒电压控制的同时,提高了风能利用率;文献[15]讨论了双馈型风电场根据各自的无功能力,将无功需求按等比例的原则分配给各台机组。这些分配原则计及所有风机的无功出力,可能会增大了集电系统和机组的有功损耗和整个风电场调度控制的难度。

本文提出了双馈型风电场无功分层控制方案,在当前运行状态下计算各机组的无功极限,根据电网电压波动值对无功的需求,对风电场风机进行动态分组,选择满足无功需要的机群进行无功控制,提供无功支持,并通过仿真算例验证所提出控制方案的有效性。

1 双馈风电机组的无功特性分析

1.1 双馈风电机组的功率关系

双馈风电机组的定子与电网直接相连,转子通过交-直-交换流器与电网相连。交-直-交换流器由两个背靠背连接的电压型 PWM 换流器构成:转子侧换流器和网侧换流器,如图 1 所示。网侧换流器运行在单位功率因数状态,为转子侧换流器提供恒定的直流电压;转子侧换流器通过控制转子电压电流实现双馈电机有功和无功的解耦控制。

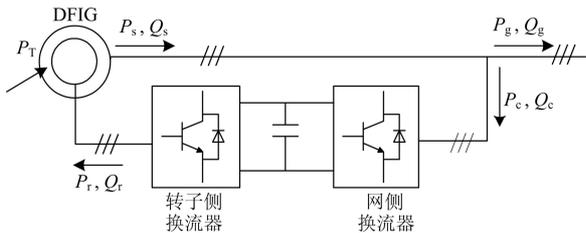


图 1 双馈风电机组的拓扑结构

Fig. 1 Topology of DFIG

图 1 中, P_T 为风力机输入机械功率; P_s 、 Q_s 为定子发出的有功和无功功率; P_c 、 Q_c 为网侧换流器从电网吸收的有功和无功功率; P_g 、 Q_g 为双馈风电机组流入电网的有功和无功功率。当机械功率全部转化为电磁功率时,有

$$P_T = P_s - P_r \quad (1)$$

忽略损耗时,定子转速与同步转速的转差率 s 形成了转子侧的转差功率,即转子功率 $P_r = sP_s$,代入式 (1) 解得

$$\begin{cases} P_s = P_T / (1 - s) \\ P_r = sP_T / (1 - s) \end{cases} \quad (2)$$

1.2 网侧换流器的功率极限

由图 1 所示的功率关系可知,忽略损耗时,换流器之间只交换有功功率,并满足 $P_c = P_r$,而无功功率 Q_c 和 Q_r 是互相解耦的。网侧换流器通常运行在单位功率因数状态,即 $Q_c = 0$,而 Q_r 除提供给转子绕组外,还以转差率的比例向定子绕组提供一部分无功。因此网侧换流器的额定容量小于转子侧换流器的额定容量,考虑网侧换流器的功率极限时只需考虑其本身的最大容量。

低风速时,风电机组的输出功率没有达到额定值,此时网侧变流器并没有充分利用其功率极限。当电网需要无功功率支持时,可利用网侧换流器的无功能力,使其工作在非单位功率因数状态。设网侧换流器设计的最大容量为 S_{cmax} ,其功率关系满足 $P_c^2 + Q_c^2 \leq S_{\text{cmax}}^2$,则其发生或吸收无功功率的能力为

$$-\sqrt{S_{\text{cmax}}^2 - P_c^2} \leq Q_c \leq \sqrt{S_{\text{cmax}}^2 - P_c^2} \quad (3)$$

联立式 (2)、式 (3) 得到网侧换流器发出和吸收无功最大值为

$$\begin{cases} Q_{\text{cmax}} = \sqrt{S_{\text{cmax}}^2 - (sP_s)^2} \\ Q_{\text{cmin}} = -\sqrt{S_{\text{cmax}}^2 - (sP_s)^2} \end{cases} \quad (4)$$

不同风速下,双馈电机的转差率随着转速的变化而变化。在额定风速以下的区域,为了保持最大风能捕获,发电机的转速始终跟随风速的变化而变化,直至达到最大允许转速,此区域的转差率可直接求得。但当风电机组运行于功率恒定区域时,为了维持机组的功率为恒定值,通过调整桨距角限制功率的波动,同时辅以发电机转速控制,此时转差率难以确定,可按发电机最高运行转速为同步转速的 1.3 倍计算^[16],即取转差率 s 为 -0.3。

1.3 双馈电机定子的功率极限

双馈电机的等效电路如图 2 所示。

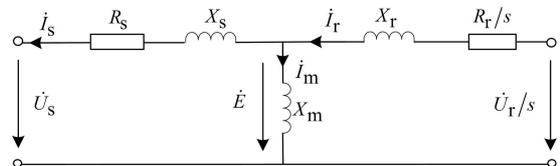


图 2 DFIG 等效电路

Fig. 2 Equivalent circuit of DFIG

根据等效电路可以得到方程

$$\begin{cases} \dot{E} = \dot{I}_m \cdot jX_m \\ \dot{U}_s = \dot{E} - \dot{I}_s(R_s + jX_s) \\ \frac{\dot{U}_r}{s} = \dot{E} + \dot{I}_r\left(\frac{R_r}{s} + jX_r\right) \\ \dot{I}_r = \dot{I}_s + \dot{I}_m \end{cases} \quad (5)$$

式中: \dot{U}_s 、 \dot{U}_r 、 \dot{E} 分别为 DFIG 定、转子电压和气隙磁场感应电动势; \dot{I}_s 、 \dot{I}_r 、 \dot{I}_m 分别为定、转子电流和励磁电流; X_s 、 X_r 、 X_m 分别为定、转子漏抗和励磁电抗, 令 $X_1 = X_s + X_m$, $X_2 = X_r + X_m$, 其中各量均已折算到定子侧。

设矢量 $\dot{U}_s = U_s \angle 0^\circ$, $\dot{I}_s = I_{sx} + jI_{sy}$, 代入式 (5) 解得

$$\dot{I}_r = \frac{I_{sx}X_1 + I_{sy}R_s}{X_m} - j \frac{U_s + I_{sx}R_s - I_{sy}X_1}{X_m} \quad (6)$$

根据定子功率关系 $I_{sx} = P_s/3U_s$ 、 $I_{sy} = -Q_s/3U_s$, 代入式 (6), 得

$$\dot{I}_r = \frac{P_sX_1 - Q_sR_s}{3U_sX_m} - j \frac{3U_s^2 + P_sR_s + Q_sX_1}{3U_sX_m} \quad (7)$$

根据式 (7) 转子电流的有效值可以表示为

$$I_r = \frac{\left[(P_sX_1 - Q_sR_s)^2 + (3U_s^2 + P_sR_s + Q_sX_1)^2 \right]^{1/2}}{3U_sX_m} \quad (8)$$

整理式 (8) 可得

$$(P_sX_1 - Q_sR_s)^2 + (3U_s^2 + P_sR_s + Q_sX_1)^2 = (3U_sX_mI_r)^2 \quad (9)$$

将式 (9) 展开并可进一步整理为

$$P_s^2(R_s^2 + X_1^2) + 6U_s^2R_sP_s + Q_s^2(R_s^2 + X_1^2) + 6U_s^2X_1Q_s = 9U_s^2X_m^2I_r^2 - 9U_s^4 \quad (10)$$

式 (10) 两边同除以 $R_s^2 + X_1^2$ 可得

$$P_s^2 + \frac{6U_s^2R_s}{R_s^2 + X_1^2}P_s + Q_s^2 + \frac{6U_s^2X_1}{R_s^2 + X_1^2}Q_s = \frac{9U_s^2X_m^2I_r^2 - 9U_s^4}{R_s^2 + X_1^2} \quad (11)$$

通过整理可得定子功率与转子电流的关系为

$$\begin{aligned} & \left(P_s + \frac{3U_s^2R_s}{R_s^2 + X_1^2} \right)^2 + \left(Q_s + \frac{3U_s^2X_1}{R_s^2 + X_1^2} \right)^2 = \\ & \frac{9U_s^2X_m^2I_r^2 - 9U_s^4}{R_s^2 + X_1^2} + \frac{9U_s^4R_s^2 + 9U_s^4X_1^2}{(R_s^2 + X_1^2)^2} = \\ & \frac{9X_m^2U_s^2I_r^2}{R_s^2 + X_1^2} \end{aligned} \quad (12)$$

设转子侧换流器通过的双馈电机转子最大电流为 I_{rmax} , 忽略定子电阻 R_s , 式 (12) 可化简为

$$P_s^2 + \left(Q_s + \frac{3U_s^2}{X_1} \right)^2 \leq (3U_sI_{rmax})^2 \quad (13)$$

此外, 若只考虑转子侧电流约束可能会导致双馈电机的视在功率大于其额定值^[17], 因此双馈电机定子功率除了转子侧的最大电流限制外, 同时受到本身的额定容量限制, 即

$$P_s^2 + Q_s^2 \leq (3U_sI_{smax})^2 \quad (14)$$

因此, 同时考虑定子侧和转子侧的电流约束, 则双馈电机定子发出无功和吸收无功功率边界值为

$$\begin{cases} Q_{smax} = \sqrt{(3U_sI_{rmax})^2 - P_s^2} - \frac{3U_s^2}{X_1} \\ Q_{smin} = -\sqrt{(3U_sI_{rmax})^2 - P_s^2} \end{cases} \quad (15)$$

根据式 (13)、式 (14) 可以画出定子功率轨迹, 如图 3 所示, 其中粗实线为 DFIG 定子功率边界。此外, 机组无功还受到运行稳定性的限制^[18], 即: $Q_s \geq -3U_s^2/X_s$, 由于 $X_s \ll X_1$, $Q_s = -3U_s^2/X_s$ 在图 3 上表示为远离圆心的一条直线, 因此对功率圆不会产生影响, 即定子侧的功率极限不会受其影响。

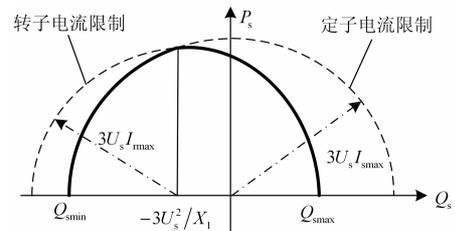


图 3 DFIG 定子的功率极限

Fig. 3 Power limit of DFIG stator

从图 3 可以看出, 双馈电机定子建立磁场时需要吸收无功功率导致机组发出无功和吸收无功的能力不对称, 因此双馈风电机组容性无功调节能力小于感性无功能力。若在双馈风机机端装设有电容补偿, 并将双馈风机与电容器看作一个整体, 从图 3 上可解释为风电机组功率圆向右平移^[19]。令电容

$C = 3/X_1$ ，再加上网侧换流器的无功能力，可以得到对称的风电机组的功率轨迹，从而整个风电机组无功边界值为

$$\begin{cases} Q_{gmax} = \sqrt{(3U_s I_{rmax})^2 - P_s^2} + \sqrt{S_{cmax}^2 - (sP_s)^2} \\ Q_{gmin} = -\sqrt{(3U_s I_{rmax})^2 - P_s^2} - \sqrt{S_{cmax}^2 - (sP_s)^2} \end{cases} \quad (16)$$

2 双馈型风电场的无功协调控制

2.1 双馈电机风电场无功控制方案

双馈电机风电场不但可以作为有功源向电网提供电能，而且还具有一定的无功功率调节能力，可作为无功源对电网电压提供支持。双馈风电场的无功控制模式主要有两种：一种是功率因数控制方案；一种是电压控制方案。这两种方式均以并网点为参考点，通过控制系统对风电场无功容量进行估算，采用统一的风电场的无功控制系统对并网点的电压或功率因数进行控制，控制系统产生的无功值，经过无功分配策略，传输给风电机组执行。

正常情况下网侧换流器与电网没有无功交换，无功的控制是基于风电机组定子功率控制之上的，并网点的功率因数控制和电压控制方案控制框图如图 4 所示。其中， $\cos\varphi^*$ 表示并网点功率因数的参考值（正常情况下为 1）； U_{pcc} 、 U_N 分别表示并网点电压的测量值和额定值； P_s 、 Q_s 分别表示定子有功功率和无功功率的实际测量值。

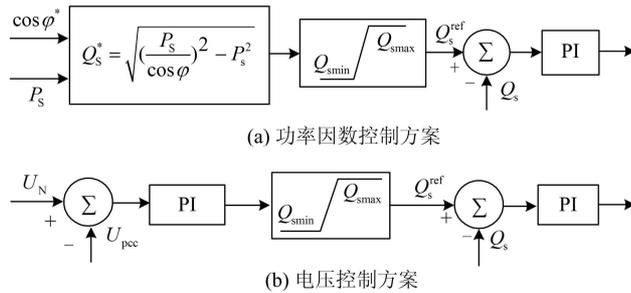


图 4 DFIG 控制方案模型

Fig. 4 Control model of DFIG control solutions

2.2 分层无功协调控制基本思想

风速或者系统运行方式的变化会引起电网电压的波动，选择合适的控制策略，使得电网电压跌落时风电场对电网提供无功支持。因此本文提出一种无功分层协调控制方案，根据电网电压偏移程度，合理选择参与电压调节的风机数量，从而不影响其他机组的正常运行，达到风电场机群协调控制的目的。此外，对单台风电机组的无功功率进行分层控制，在定子和网侧换流器之间进行二次分配，并优先考虑定子侧无功能力。实际运行中，风电机组的

无功能力随有功功率增大而降低，因此在不同的风速区间应有不同的控制方案。在特殊情况下，可采取牺牲部分有功以增大发出无功的控制策略。

基本思想是当风电场并网点电压在合理范围内，机组运行在单位功率因数模式下；当风电场并网点的电压波动较大，根据电压偏移度选择可以满足无功需要的机群切换到无功控制模式，对双馈风电机组转子侧换流器及网侧换流器进行无功控制，发电机定子和网侧换流器同时向并网点注入无功功率，为稳定电压提供支持。方案如图 5 所示，其中 $\Delta U\%$ 表示电压偏移。

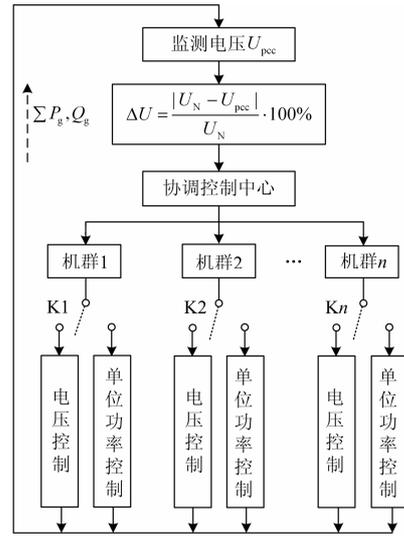


图 5 无功分层控制方案

Fig. 5 Reactive hierarchical control solution

具体的控制流程如下：

1) 实时监测各个机组的有功功率，根据式 (16) 计算各风电机组的无功极限 Q_{igmax} 以及整个风电场的无功极限 $Q_{wfmmax} = \sum_{i=1}^n Q_{igmax}$ 。

2) 根据电网电压的波动情况经过控制器得到无功需求 Q_d ，选择参与无功控制的机组数量，并分配到各机组 Q_g^{ref} ，考虑到各机组应远离无功极限，应留有一定的无功冗余。若所有机组均参与无功控制时仍有 $Q_{wfmmax} < Q_d$ ，可调节桨距角降低机组输出的有功功率，使得调整后的 $Q'_{wfmmax} \geq Q_d$ 。

3) 各机组的 Q_g^{ref} 在定子和网侧换流器进行二次分配，优先考虑定子侧无功能力。当无功参考值大于定子无功极限时，定子和网侧换流器同时提供无功支持。

4) 参与无功控制的各风电机组发出无功，提供电压支持，返回步骤 1)。

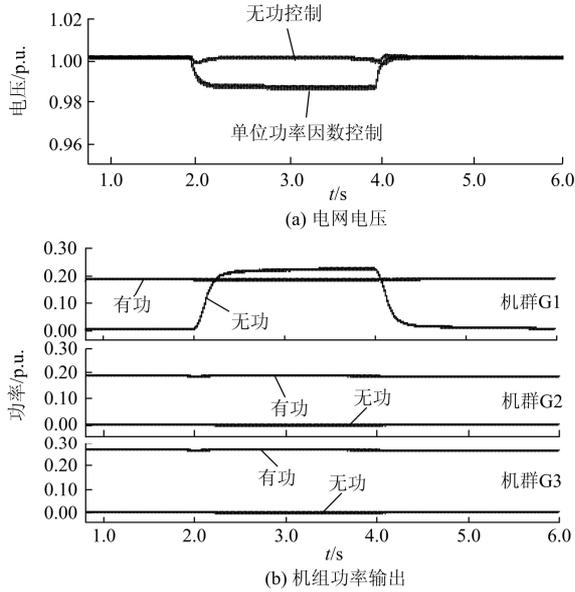


图 9 小负荷波动无功控制

Fig. 9 Reactive power control during small load fluctuation

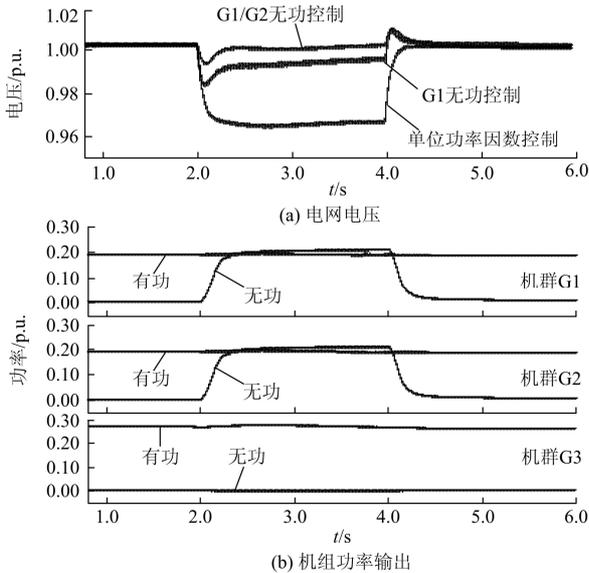


图 10 大负荷波动无功控制仿真结果

Fig. 10 Reactive power control during large load fluctuation

Case3: 风电场风速为 13 m/s, 风电机组满功率运行, 受容量限制风电机组几乎不能发出无功。当电网 6 kV 母线上在 2~4 s 内有无功负荷 50 Mvar 接入时, 电压会有较严重的跌落, 跌至 0.955 p.u., 整个风电场切换到无功控制模式, 此时控制风电机组的桨距角, 牺牲机组部分有功功率, 以发出无功注入电网, 仿真结果如图 11。在电压跌落时, 桨距角由 0° 提高到 3.5°, 整个风电场有功降到 0.914 p.u., 并可向电网 0.40 p.u. 的无功补偿, 电压恢复到正常

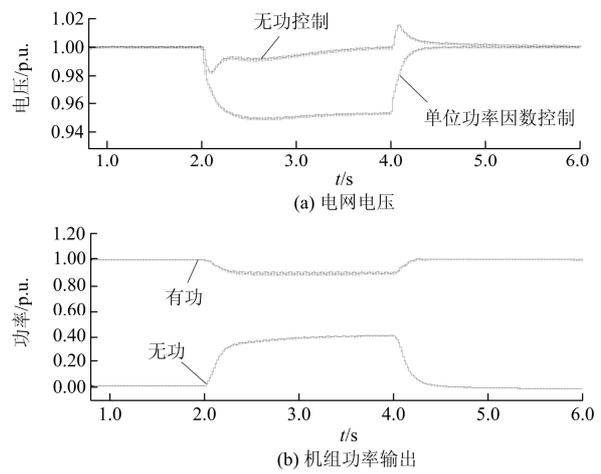


图 11 无功负荷波动的无功控制

Fig. 11 Reactive power control during large reactive power load fluctuation

范围。

此种情况下, 风电场满发, 负荷发生较大无功波动, 需要安装诸如 SVG 等动态无功补偿装置实时提供无功支持。若仅为偶尔发生事件, 所安装的动态无功补偿装置使用率很低, 此时风电场牺牲部分有功功率提供无功注入, 从经济性角度考虑更优。

4 结语

本文对双馈风电机组的功率极限和控制模式进行了综合分析。针对电网中接入有风电场时, 在电压波动情况下, 考虑到风电场的无功能力, 提出无功分层协调控制方案, 根据电网的无功需求协调控制风电机组的控制模式。

结果表明: 风电场无功控制策略对负荷功率波动等引起的控制点电压波动有良好的抑制能力, 而且根据电压的波动选择参与机群数量, 协调控制易实现。在特殊情况下, 因机组满发、电网需要较大无功注入时, 机组可牺牲部分有功以发出无功, 控制方案为风电场参与电压调节和电网实时调度提供了一种更经济的选择。

参考文献

[1] 迟永宁, 刘燕华, 王伟胜, 等. 风电接入对电力系统的影响[J]. 电网技术, 2007, 31(3): 77-81.
 CHI Yong-ning, LIU Yan-hua, WANG Wei-sheng, et al. Study on impact of wind power integration on power system[J]. Power System Technology, 2007, 31(3): 77-81.
 [2] 田春笋, 李琼林, 宋晓凯. 风电场建模及其对接入电网稳定性的影响分析[J]. 电力系统保护与控制, 2009, 37(19): 46-51.
 TIAN Chun-zheng, LI Qiong-lin, SONG Xiao-kai. Modeling and analysis of the stability for the power

- system considering the integration of the wind farms[J]. *Power System Protection and Control*, 2009, 37(19): 46-51.
- [3] 黄学良, 刘志仁, 祝瑞金, 等. 大容量变速恒频风电机组接入对电网运行的影响分析[J]. *电工技术学报*, 2010, 25(4): 142-149.
HUANG Xue-liang, LIU Zhi-ren, ZHU Rui-jin, et al. Impact of power system integrated with large capacity of variable speed constant frequency wind turbines[J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2010, 25(4): 142-149.
- [4] 赵利刚, 房大中, 孔祥玉, 等. 综合利用 SVC 和风力发电机的风电场无功控制策略[J]. *电力系统保护与控制*, 2012, 40(2): 45-50.
ZHAO Li-gang, FANG Da-zhong, KONG Xiang-yu, et al. A strategy of reactive power control for wind farm operation using SVC and DFIG[J]. *Power System Protection and Control*, 2012, 40(2): 45-50.
- [5] 李东东, 王凯凯, 叶辰升. 采用双馈机组的风电场无功功率控制研究[J]. *电力系统保护与控制*, 2013, 41(13): 37-42.
LI Dong-dong, WANG Kai-kai, YE Chen-sheng. Reactive power control research of wind farm adopting doubly-fed induction generators[J]. *Power System Protection and Control*, 2013, 41(13): 37-42.
- [6] TAPIA G, TAPIA A, OSTOLAZA J X. Proportional-integral regulator-based approach to wind farm reactive power management for secondary voltage control[J]. *IEEE Trans on Energy Conversion*, 2007, 22(2): 488-498.
- [7] EI MOURSI M, JOOS G. Optimal tracking secondary voltage control for the DFIG wind turbines and compensator devices[J]. *Electric Power Systems Research*, 2009, 7(9): 1705-1716.
- [8] 刘其辉, 贺益康, 张建华. 交流励磁变速恒频双馈型异步发电机的稳态功率关系[J]. *电工技术学报*, 2006, 21(2): 39-44.
LIU Qi-hui, HE Yi-kang, ZHANG Jian-hua. Steady-state power relation of AC-excited variable-speed constant-frequency doubly-fed induction generator[J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2006, 21(2): 39-44.
- [9] 申洪, 王伟胜, 戴慧珠. 变速恒频风力发电机组的无功功率极限[J]. *电网技术*, 2003, 27(11): 60-63.
SHEN Hong, WANG Wei-sheng, DAI Hui-zhu. Reactive power limit of variable-speed constant-frequency wind turbine[J]. *Power System Technology*, 2003, 27(11): 60-63.
- [10] 郎永强, 张学广, 徐殿国, 等. 双馈电机风电场无功功率分析及控制策略[J]. *中国电机工程学报*, 2007, 27(9): 77-82.
LANG Yong-qiang, ZHANG Xue-guang, XU Dian-guo, et al. Reactive power analysis and control of doubly fed induction generator wind farm[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2007, 27(9): 77-82.
- [11] TANG G, DUAN J, LI F, et al. Dynamic characteristics and improvement measures of grid-connected DFIG in different control mode[C] // *Power and Energy Engineering Conference (APPEEC)*, 2012 Asia-Pacific: IEEE, 2012: 1-4.
- [12] 毛启静. 利用风力发电机组的无功功率补偿风电场无功损耗[J]. *电网技术*, 2009, 33(19): 175-180.
MAO Qi-jing. Compensating reactive power loss of wind farm with reactive power generated by wind turbine generators[J]. *Power System Technology*, 2009, 33(19): 175-180.
- [13] 贾俊川, 刘晋, 张一工. 双馈风力发电系统的新型无功优化控制策略[J]. *中国电机工程学报*, 2010, 30(30): 87-92.
JIA Jun-chuan, LIU Jin, ZHANG Yi-gong. Novel reactive power optimization control strategy for doubly fed induction wind power generation system[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2010, 30(30): 87-92.
- [14] 栗然, 唐凡, 刘英培, 等. 双馈式风电场改进的恒电压控制策略[J]. *电力系统保护与控制*, 2012, 40(6): 79-85.
LI Ran, TANG Fan, LIU Ying-pei, et al. Improved constant voltage strategy of DFIG based wind farm[J]. *Power System Protection and Control*, 2012, 40(6): 79-85.
- [15] 王松岩, 朱凌志, 陈宁, 等. 基于分层原则的风电场无功控制策略[J]. *电力系统自动化*, 2009, 33(13): 83-88.
WANG Song-yan, ZHU Ling-zhi, CHEN Ning, et al. A reactive power control strategy for wind farm based on hierarchical layered principle[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2009, 33(13): 83-88.
- [16] 李生虎, 杨振林, 刘正楷, 等. 双馈感应电机稳态无功出力范围的优化算法[J]. *电力系统保护与控制*, 2012, 40(4): 8-13.
LI Sheng-hu, YANG Zhen-lin, LIU Zheng-kai, et al. Optimization model for steady-state reactive output of doubly-fed induction generators[J]. *Power System Protection and Control*, 2012, 40(4): 8-13.
- [17] 严干贵, 王茂春, 穆钢, 等. 双馈异步风力发电机组联网运行建模及其无功静态调节能力研究[J]. *电工技术学报*, 2008, 23(7): 98-104.
YAN Gan-gui, WANG Mao-chun, MU Gang, et al. Modeling of grid-connected doubly-fed induction generator for reactive power static regulation capacity study[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2008, 23(7): 98-104.
- [18] SANTOS-MARTIN D, ARNALTES S, RODRIGUEZ AMENEDO J L. Reactive power capability of doubly fed asynchronous generators[J]. *Electric Power Systems Research*, 2008, 78(11): 1837-1840.
- [19] 栗然, 唐凡, 刘英培, 等. 双馈风电场新型无功补偿与电压控制方案[J]. *中国电机工程学报*, 2012, 32(19): 16-23.
LI Ran, TANG Fan, LIU Ying-pei, et al. A new scheme of reactive power compensation and voltage control for DFIG based wind farm[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2012, 32(19): 16-23.

收稿日期: 2014-03-15; 修回日期: 2014-04-25

作者简介:

刘皓明(1977-), 男, 副教授, 研究方向为智能电网、电力系统分析与控制、电力市场; E-mail: liuhaom@hhu.edu.cn

唐俏俏(1991-), 女, 硕士研究生, 研究方向为新能源发电及其对电力系统的影响;

朱凌志(1975-), 男, 博士, 高级工程师, 研究方向为电力系统安全稳定、电力系统规划、新能源发电及接入。