

基于静止同步补偿器的风电场无功电压控制策略

王成福, 梁军, 张利, 韩学山

(山东大学电气工程学院, 山东省 济南市 250061)

Reactive Power and Voltage Control Strategy for Wind Farm Based on STATCOM

WANG Chengfu, LIANG Jun, ZHANG Li, HAN Xueshan

(School of Electrical Engineering, Shandong University, Jinan 250061, Shandong Province, China)

ABSTRACT: The doubly fed induction generator (DFIG)'s reactive power output changes and fluctuates with active power output variation. Further, when its active power output in a certain extent, it begins absorbing reactive power. At this point, based on the variety relation analysis between active power and reactive power for DFIG, by introducing static synchronous compensator (STATCOM) in the wind farm, a reactive power control strategy which can restrain fluctuation of reactive power and guarantee effectively active power output of wind farm was proposed. Then a real time control system (RTCS) was built up. This RTCS not only has advantages as flexible operation mode and rapid reactive power response, but also can help to enlarge operation range of wind farm reactive power, to improve the regulation quality of reactive power and voltage level of point of common coupling (PCC) as well as power grid. Thus the problems, such as fluctuation of DFIG reactive power output, and drawing reactive power under a certain condition, can be solved. The simulation of a practical example shows that the control strategy is effective and feasible.

KEY WORDS: power system; doubly fed induction generator (DFIG); static synchronous compensator (STATCOM); wind farm; point of common coupling; reactive power control

摘要: 双馈感应风力发电机(doubly fed induction generator, DFIG)的无功输出随着有功功率的变动而存在波动性, 并且在有功输出处于一定范围时需要吸收无功功率。对此, 在分析其 $P-Q$ 关系的基础上, 引入静止同步补偿器, 提出抑制无功功率波动、保证风电有功输出的无功控制策略, 并据此建立了无功实时控制系统。该控制系统具有运行方式灵活、无功响应快速等特点, 可扩大风电场的无功运行范围, 提升调节品质, 提高并网点与电网的电压水平, 有效地解决 DFIG 无功输出存在波动性及一定条件下吸收无功的不足。实际算例仿真表明, 所提控制策略是可行、有效的。

关键词: 电力系统; 双馈感应发电机; 静止同步补偿器; 风电场; 并网点; 无功功率控制

0 引言

当今, 风力发电技术越来越受到重视, 呈现出快速发展的趋势。然而, 大规模风电并入电网运行, 必然对电网的调度和控制带来影响, 主要体现在有功功率调节和无功电压控制上, 如备用的配置与调度问题, 应对低电压穿越的问题以及风电场并网点 (point of common coupling, PCC) 的无功、电压支撑问题^[1-9]等。

在此背景下, 目前风电场多采用变速恒频运行的双馈感应发电机(doubly fed induction generator, DFIG) 技术, 因为该技术可通过转子励磁电流的调节实现有功、无功解耦控制^[10-12], 从而扩大无功调节范围, 具有较强的支撑 PCC 电压的作用。

诸多学者就该领域展开了深入、广泛的研究。文献[11]分析双馈风电机组无功功率极限的计算方法, 探讨了风电场对电网无功调节的作用, 即如何有效发挥风电场自身的无功调节能力, 但缺乏机组有功随机波动对其无功输出影响的考虑。文献[13]详细阐述了风电接入对地区电网无功电压特性的影响, 具体给出风电场内部的无功控制方式以及参与地区电网无功电压调整的方式。文献[14]依据风电场无功变化引起相关节点电压变化的信息, 动态调节风电场的无功输出, 维持并网点电压水平与接入地区电网的电压稳定性。文献[15]利用风电场并网点升压变两侧的电压关系, 通过风电场的无功功率调节控制低压侧电压, 达到调节高压侧母线电压的目的。文献[13-15]的研究重点是风电场无功调节对电压的支撑, 但均忽略了其调节范围存在不确定性的问题。文献[16]按接入电网节点的电压偏差量整定风电场无功需求, 并以等功率因数方式分配至各个机组, 但分配过程中没有充分考虑机组无功功

率波动的问题。

上述研究的重点多集中在风电场及接入电网的无功、电压调整方面,而对DFIG风电场无功功率的波动性考虑不足。首先,风电场在保证最大有功功率输出的前提下,其无功功率是随之波动的,当有功出力短时内快速地由较低水平升至额定状态时,机组的无功调节范围将急骤缩小;其次,电网与风电场均要求PCC维持一定电压水平,当电网无法保证该电压水平时,风电场必须具备支撑该点电压水平的能力,维持其无功功率平衡。因此,必须解决因有功的随机变化引起的无功功率波动。

本文针对该问题,在详细分析机组有功、无功功率特性与P-Q容量变化极限规律的基础上,结合机组有功功率随机波动的特点,引入静止同步补偿器(static synchronous compensator, STATCOM),提出风电场、补偿单元与PCC间的综合无功控制策略,建立了无功实时控制系统(real time control system, RTCS)。利用补偿单元运行方式灵活、无功响应快速的特点与机组的无功调节相配合,扩大风电场无功运行范围,提升无功调节品质,有效地解决DFIG无功功率的波动性问题。

1 DFIG的P-Q关系分析

DFIG的定子侧直接接入电网,而转子侧经交直交变频器接入电网,这种结构使机组实现了变速恒频运行以及转子侧功率双向流动。同时,通过对交直交变频器的控制调整实现转子电流励磁分量与转矩分量的解耦控制,从而达到DFIG功率解耦控制的目的。

双馈发电机机端输出的有功、无功功率^[13]为

$$\begin{cases} P_s = -\frac{x_m}{X_{ss}} |\dot{U}_s| I_{qr} \\ Q_s = -\frac{|\dot{U}_s|^2}{X_{ss}} + \frac{x_m}{X_{ss}} |\dot{U}_s| I_{dr} \end{cases} \quad (1)$$

式中: $|\dot{U}|$ 为机端电压; x_m 为励磁电抗; I_{qr} 、 I_{dr} 为转子电流的转矩分量与励磁分量; x_s 为定子侧电抗; $X_{ss}=x_m+x_s$ 为定子回路等效电抗。

由式(1)可以看出当机端电压一定时,定子侧无功功率的调节主要受转子电流励磁分量 I_{dr} 的影响,而转子电流则受转子绕组热极限电流及变流器最大电流的限制。因此影响DFIG无功输出的主要因素就是转子侧最大电流值。

根据式(1)可得到DFIG的功率极限圆方程:

$$P_s^2 + (Q_s + \frac{|\dot{U}_s|^2}{X_{ss}})^2 = \frac{|\dot{U}_s|^2 x_m^2}{X_{ss}^2} (I_{qr}^2 + I_{dr}^2) \leq \frac{|\dot{U}_s|^2 x_m^2}{X_{ss}^2} I_{rmax}^2 \quad (2)$$

式中 I_{rmax} 为转子最大电流值。

由式(1)、(2)可得DFIG定子侧无功输出的上下极限:

$$\begin{cases} Q_{smin} = -\frac{|\dot{U}_s|^2}{X_{ss}} - \sqrt{(\frac{x_m}{X_{ss}} |\dot{U}_s| I_{rmax})^2 - P_s^2} \\ Q_{smax} = -\frac{|\dot{U}_s|^2}{X_{ss}} + \sqrt{(\frac{x_m}{X_{ss}} |\dot{U}_s| I_{rmax})^2 - P_s^2} \end{cases} \quad (3)$$

忽略绕组损耗,DFIG的有功功率在定、转子间接转差率进行分配,可得网侧变频器的无功功率极限值为

$$\begin{cases} Q_{rmin} = -\sqrt{S_w^2 - P_w^2} \\ Q_{rmax} = \sqrt{S_w^2 - P_w^2} \end{cases} \quad (4)$$

式中: S_w 为网侧变频器的容量; P_w 为网侧变频器有功功率输出值。

由式(3)、(4)可得到DFIG的无功输出极限:

$$\begin{cases} Q_{gmin} = Q_{rmin} + Q_{smin} \\ Q_{gmax} = Q_{rmax} + Q_{smax} \end{cases} \quad (5)$$

在不考虑网侧变频器无功输出的情况下,根据式(1)~(3)可知,DFIG定子侧的PQ特性曲线是一个以 $(-|\dot{U}_s|^2/X_{ss}, 0)$ 为圆心, I_r 为半径的半圆,如图1中的虚线所示。由于DFIG的网侧变频器一般按风电机组的最大转差功率设计^[11],当机组有功出力较小时,网侧变频器的可调无功输出范围较大;当机组接近或处于额定状态时,网侧变频器的无功输出则可忽略不计。因此,考虑网侧变频器无功输出的P-Q特性曲线如图1的中实线所示。

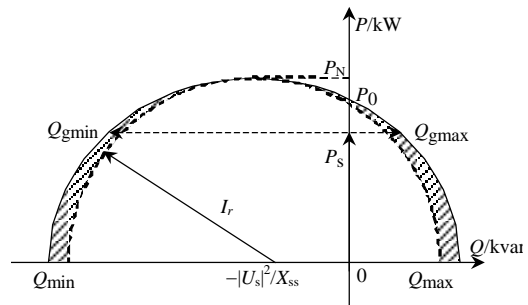


图1 DFIG的P-Q特性曲线

Fig. 1 P-Q performance curve of DFIG

对具有 n 台DFIG的风电场,当机组均处于额定运行状态时,根据式(2)~(5)及图1可判定其吸收的无功功率为一定值:

$$Q_{inN} = -n|\dot{U}_s|^2 / X_{ss} + n\sqrt{S_w^2 - P_w^2} \quad (6)$$

忽略额定状态下网侧变频器的无功输出时，风电场吸收的无功功率最大，其值为 $-n|U_s|^2/X_{ss}$ 。

由图 1 的 $P-Q$ 曲线可知，机组在有功输出一定的条件下，其无功具有不同的运行方式；在有功输出不同的条件下，其无功的调节范围各不相同。因此，随着风速的改变，机组的有功输出在 $[0, P_N]$ 内随机变化，相应的无功功率输出范围也在不断变化。当有功功率输出在 $[P_0, P_N]$ 范围内时，DFIG 机组吸收无功功率，且有功愈接近 P_N ，无功吸收愈显著。

上述问题产生的原因是，在 $[P_0, P_N]$ 运行区域内，DFIG 处于额定运行状态及其附近，其有功功率输出接近额定值，需转子电流为其提供较大转矩分量 I_{qr} ，受转子电流最大值限制，励磁分量 I_{dr} 必然随之减小，根据式(1)，其无功调节范围亦随之减少。同时，DFIG 的正常运行又要求转子侧必须提供足够励磁分量，以保障旋转磁场建立，因此必须吸收一定量无功功率以维持其正常运行。

2 风电场无功控制策略

2.1 RTCS 的系统结构与控制模式

通过第 1 节的分析可知，虽然 DFIG 风电场具有一定的无功调节能力，但由于其有功出力的随机波动使得无功功率输出亦存在较强的波动性，再加之故障情况下机组低电压穿越保护动作等因素影响，DFIG 风电场无功功率调节范围的波动问题更为严重。对此，本文采用 STATCOM 补偿单元平抑风电场的无功波动。该装置具有连续、快速无功调节能力，为风电场提供稳态无功补偿的同时还可协助实现机组的起动，在低电压穿越过程中，亦可起到支撑 PCC 电压水平的作用。

考虑系统侧对风电场的无功调控要求，将风电场、接入系统与补偿单元三者间无功需求与供给的实时状况进行综合处理，并根据风电场及补偿单元无功调节特点提出风电系统的无功控制策略。通过 RTCS 中的数据采集与指令传送单元协助，实现该策略的仿真模拟，完成三者间无功功率的实时调整，从而弥补风电场无功功率输出存在波动性及吸收无功功率的不足。

RTCS 的控制结构及数据指令处理流程如图 2 所示。其中，信号采集单元负责采集并接收系统侧无功调度指令 Q_{ref} 、补偿单元出口电压 U_s 、并网母线电压 U_t 及风电场实时运行数据；经数据处理中心

处理得到风电场与网侧无功供求状态等信息；程序控制模块根据无功供需状态协调处理三者间关系，并经指令发送单元送出结果。其中，无功的状态判定与协调分配是该系统核心所在。

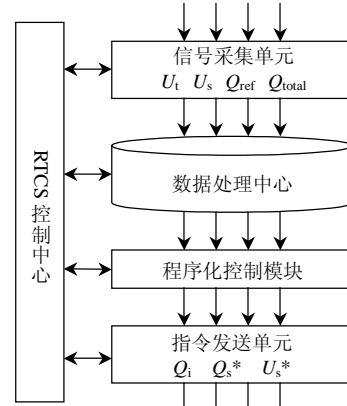


图 2 RTCS 的系统结构图

Fig. 2 System structure of RTCS

根据风电系统运行的情况，可将 RTCS 的运行状态分为正常、通信异常、紧急及故障 4 种。限于篇幅，本文只对前两种状态下的控制策略进行分析，紧急及故障状态下的研究将在后续工作中陆续展开。

在正常运行状态下，RTCS 将工作在功率控制模式下，该模式的控制结构如图 3 所示。此时，控制系统跟踪网侧无功需求指令 Q_{ref} ，根据该指令及补偿单元的实时状态进行功率分配设定与参考值校正计算，给定无功输出值的实时调整量。

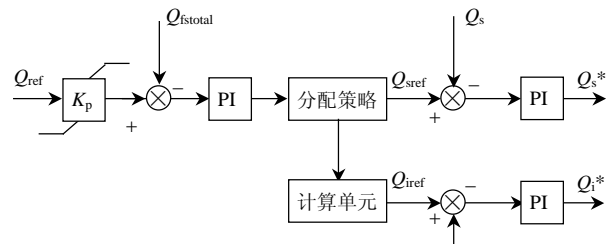


图 3 功率控制模式下控制策略图

Fig. 3 Scheme of power control mode

异常状态指控制系统或其通信信道出现故障，接入系统与风电场处于正常情况下的运行状态。此时 RTCS 进入电压控制模式，该模式下的控制策略如图 4 所示。

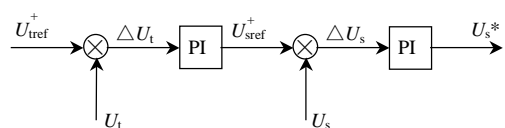


图 4 电压控制模式下控制策略图

Fig. 4 Scheme of voltage control mode

在电压控制模式下,本地 PCC 电压水平为唯一可靠的数据源,控制系统将直接对其进行校正控制,并最终给定补偿单元的出口电压调整量。同时,RTCS 不再处理网侧及风电场侧的无功需求指令,风电场恢复定功率因数运行模式,控制系统发出异常报告指令。

2.2 无功功率的分配方式

在功率控制模式下,控制系统需对风电场内部、风电场与补偿单元间进行两级分配:一级是将网侧指定无功需求容量,根据风电场的无功调整范围及补偿单元无功容量状况在两者间进行协调分配;二级是将分配到风电场的无功容量,根据各机组无功功率的实时调节范围进行逐一分配。

1) 首先分析风电场与补偿单元间的无功分配问题。影响该级无功分配的主要因素包括:风电场无功调整范围、网侧无功指令、并网点电压水平及补偿单元的实时无功调节范围。其相互间影响关系及分配策略如图 5 所示。

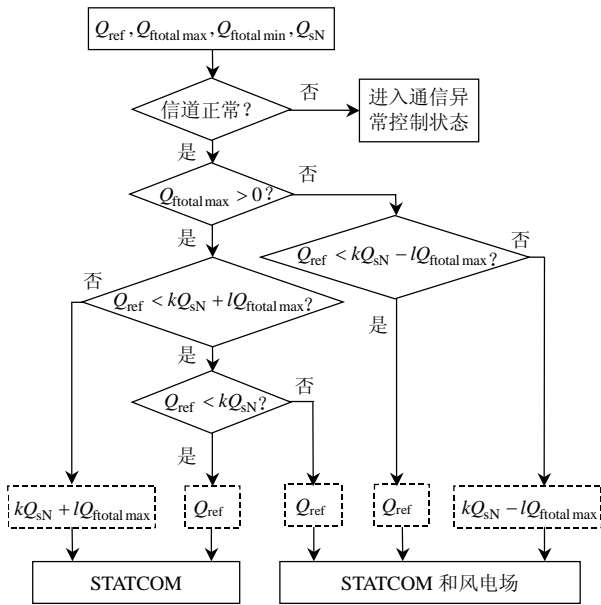


图 5 稳态下无功分配示意图

Fig. 5 Reactive power distribution flow chart of steady

图 5 中, Q_{sN} 为补偿单元的额定无功输出容量; $Q_{ftotal\max}, Q_{ftotal\min}$ 为风电场无功输出的极限; k, l 为补偿单元与风电场的无功裕度系数; 虚框内所示数据为当前情况下所需分配的无功功率参考值, STATCOM 即仅需补偿单元提供无功输出, 而 STATCOM 和风电场则需要风电场协助补偿单元共同提供无功输出。

由此可以给出 STATCOM 补偿单元投入运行的条件:

$$Q_{ftotal\max} < 0 \text{ 或 } Q_{ref} > 0 \quad (7)$$

2) 风电场内部的无功功率主要依据各机组无功功率的实时调节范围进行分配。利用各风机实时状态信息计算其当前无功调节范围, 并根据所得范围对指定无功容量进行等比例分配^[17], 其具体计算及分配原则为

$$\begin{cases} Q_{ftotal\max} = \sum_{i=1}^n Q_{imax} \\ Q_{ftotal\min} = \sum_{i=1}^n Q_{imin} \end{cases} \quad (8)$$

$$Q_{iref} = \min(Q_{s\max}, Q_{imax}, Q_{ref} / Q_{ftotal\max}) \quad (9)$$

式中: Q_{imax}, Q_{imin} 为第 i 台机组的实时无功极限值, 该值可根据机组 PQ 特性求取; Q_{iref} 为分配给第 i 台机组的无功输出量。

3 仿真分析

3.1 仿真模型

以山东某风电系统为例, 建立 33×1.5 MW 风电场及其地区接入系统的仿真模型。风电场侧经箱变 T_i 与集中升压变 T_w 升压至 110 kV, 由 l_1 接入地区电网; 地区电网经 l_2 接入 220 kV 输电网; 补偿单元接入风电场升压变低压侧, 结合实际需求及成本考虑, 其额定容量 20 Mvar。风电场与接入系统结构如图 6 所示。

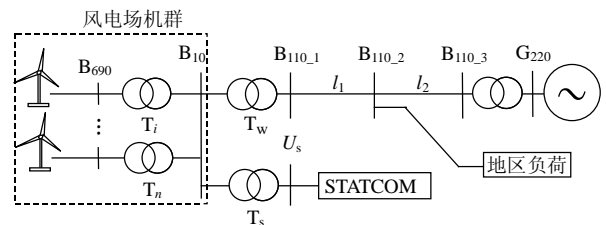


图 6 仿真系统示意图

Fig. 6 Structure of simulation system

为与实际风况更加接近, 本文采用带有噪声干扰的阵风、渐变风合成风速模型, 如图 7 所示。

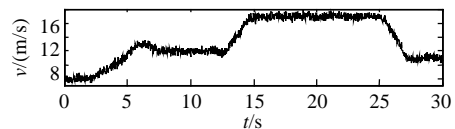


图 7 30 s 风速曲线

Fig. 7 30 s wind power curve

3.2 RTCS 控制下的无功波动补偿仿真

当没有 RTCS 控制补偿单元作用时, 风电场的无功功率输出受其有功出力变化的影响较为显著, 图 8 为风电场输出无功功率的实时曲线。

由 8 可以看出, 当风速达到 15 m/s 及以上时,

机组处于额定运行状态，风电场必须吸收一定量的感性无功才可能保证其输出最大有功功率。此时，在没有其它调控策略情况下，风电场若要达到其最优运行状态，必然会增加接入系统的无功、电压调整压力，当接入系统薄弱时，情况将更为严峻。

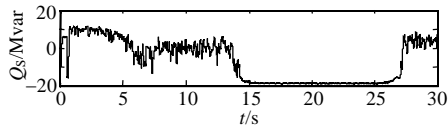


图 8 风电场无功输出能力曲线

Fig. 8 Wind farm reactive power capability curve

在上述模型条件下，利用RTCS对风电场、接入系统及补偿单元三者间按本文所提策略进行综合处理：补偿单元将优先保证风电场的正常运行，再将剩余容量按网侧指令要求进行补偿，从而实现三者间无功功率的快速、连续、平稳过渡。本例设定网侧的无功需求指令为零，RTCS控制的补偿单元无功实时输出曲线如图9所示，此时补偿单元可对风电场吸收的无功功率实现连续、快速补偿。

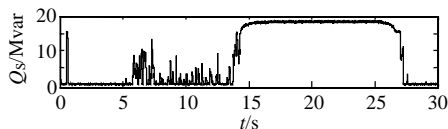


图 9 STATCOM 补偿单元无功输出曲线

Fig. 9 STATCOM compensation module reactive power output curve

由于风速的瞬时变化率较大，导致了机组无功调节范围随之具有很强的瞬时波动性，而使用RTCS则可以快速跟踪风电场的无功功率输出变化，实现对风电场无功调节范围的瞬时变化做出快速、连续响应，从而保证风电场正常运行，平抑无功功率波动，扩大无功调节范围，提高风电系统作为无功电源运行的稳定性。

4 结论

1) 通过对DFIG的 $P-Q$ 关系分析，阐述了其无功功率输出波动性及一定的有功功率输出范围对应吸收无功功率的原因，并给出了定量表达式。

2) 针对风电场与补偿单元无功调节特性的异同，提出了相对应的风电系统无功控制策略，弥补了风电场一定条件下吸收无功功率及无功调节范围随有功出力变动存在波动性的不足。

3) 建立了DFIG风电场及其弱联系接入系统的仿真平台，应用RTCS实现了所提控制策略，完成了仿真系统的无功功率实时控制，取得了较好的无功响应效果。

4) 结合当前研究的现状，本文的后续工作主要为：从经济效益角度考虑STATCOM的最佳容量设置问题，以及连续与非连续补偿装置相结合的混合补偿技术研究；研究分析暂态下的风电系统的无功控制策略，充分应用补偿装置的无功调节特性与电压支撑能力，协助DFIG风电场实现低电压穿越。

参考文献

- [1] Protsenko K, Xu Dewei. Modeling and control of brushless doubly fed induction generators in wind energy applications[J]. IEEE Trans. on Power Electronics, 2008, 23(3): 1191-1197.
- [2] Hammons T J. Integrating renewable energy sources into European Grids[C]. 41st International Universities Power Engineering Conference, New Castle, UK, 2006.
- [3] 范高峰, 王伟胜, 刘纯. 基于神经网络的风电功率短期预测系统[J]. 中国电机工程学报, 2008, 28(34): 118-123. Fan Gaofeng, Wang Weisheng, Liu Chun. Artificial neural network based wind power short term prediction system[J]. Proceedings of the CSEE, 2008, 28(34): 118-123(in Chinese).
- [4] 刘其辉, 贺益康, 张建华. 交流励磁变速恒频风力发电机励磁控制技术[J]. 中国电机工程学报, 2006, 26(23): 109-114. Liu Qihui, He Yikang, Zhang Jianhua. Investigation of control for AC-excited VSCF wind power generator[J]. Proceedings of the CSEE, 2006, 26(23): 109-114(in Chinese).
- [5] 廖勇, 何金波, 姚骏, 等. 基于变桨距和转矩动态控制的直驱永磁同步风力发电机功率平滑控制[J]. 中国电机工程学报, 2009, 29(18): 71-77. Liao Yong, He Jinbo, Yao Jun. Power smoothing control strategy of direct driven permanent magnet synchronous generator for wind turbine with pitch angle control and torque dynamic control[J]. Proceedings of the CSEE, 2009, 29(18): 71-77(in Chinese).
- [6] 李晶, 方勇, 宋家骅, 等. 变速恒频双馈风电机组分段分层控制策略的研究[J]. 电网技术, 2005, 19(9): 16-22. Li Jing, Fang Yong, Song Jiahua, et al. Research on subsection and layer control strategy of doubly fed variable speed wind turbine[J]. Power System Technology, 2005, 19(9): 16-22(in Chinese).
- [7] 李建林, 胡书举, 孔德国, 等. 全功率变流器永磁直驱风电系统低电压穿越特性研究[J]. 电力系统自动化, 2008, 32(19): 92-95. Li Jianlin, Hu Shuju, Kong Deguo, et al. Studies on the low voltage ride through capability of fully converted wind turbine with PMSG [J]. Automation of Electric Power Systems, 2008, 32(19): 92-95(in Chinese).
- [8] 迟永宁, 王伟胜, 戴慧珠. 改善基于双馈感应发电机的并网风电场暂态电压稳定性研究[J]. 中国电机工程学报, 2007, 27(25): 25-31. Chi Yongning, Wang Weisheng, Dai Huizhu. Study on transient voltage stability enhancement of grid-connected wind farm with doubly fed induction generator installations[J]. Proceedings of the CSEE, 2007, 27(25): 25-31(in Chinese).
- [9] 张锋, 晃勤. STATCOM 改善风电场暂态电压稳定性的研究[J]. 电网技术, 2008, 32(9): 70-73. Zhang Feng, Chao Qin. Research on improving transient voltage stability of wind farm by STATCOM[J]. Power System Technology, 2008, 32(9): 70-73(in Chinese).
- [10] Tapia A, Tapiac E, Qstolaza J X. Modeling and control of a wind

- turbine driven doubly fed induction generator[J]. IEEE Trans. on Energy Conversion, 2003, 18(2): 194-204.
- [11] 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 Yongqiang, Zhang Xueguang, Xu Dianguo, et al. Reactive power analysis and control of doubly fed induction generator wind farm[J]. Proceedings of the CSEE, 2007, 27(9): 77-82(in Chinese).
- [12] 林成武, 王凤翔, 姚兴佳. 变速恒频风力发电机励磁控制技术研究[J]. 中国电机工程学报, 2003, 23(11): 122-125. Ling Chengwu, Wang Fengxiang, Yao Xingjia. Study on excitation control of VSCF doubly fed wind power generator[J]. Proceedings of the CSEE, 2003, 23(11): 122-125(in Chinese).
- [13] Tapia A, Tapia G. Reactive power control of wind farms for voltage control applications[J]. Renewable Energy, 2004, 29(3): 377-392.
- [14] 陈宁, 朱凌志, 王伟. 改善接入地区电压稳定性的风电场无功控制策略[J]. 中国电机工程学报, 2009, 29(10): 102-106. Chen Ning, Zhu Lingzhi, Wang Wei. Strategy for reactive power control of wind farm for improving voltage stability in wind power integrated region[J]. Proceedings of the CSEE, 2009, 29(10): 102-106(in Chinese).
- [15] 曹军, 张榕林, 林国庆, 等. 变速恒频双馈电机风电场电压控制策略[J]. 电力系统自动化, 2009, 33(4): 87-91. Cao Jun, Zhang Ronglin, Lin Guoqing, et al. A voltage control strategy for wind farms using doubly fed induction generator wind turbines[J]. Automation of Electric power Systems, 2009, 33(4): 87-91(in Chinese).
- [16] 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 Songyan, Zhu Lingzhi, 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(in Chinese).
- [17] Chompoo-inwai C, Yingvivatanapong C, Methapray K. Reactive compensation techniques to improve the ride through capability of wind turbine during disturbance[J]. IEEE Trans. on Industry Applications, 2005, 41(3): 666-672.



王成福

收稿日期: 2010-01-05。

作者简介:

王成福(1984), 男, 博士研究生, 主要研究方向为风力发电的控制及其对电力系统的影响, lnddlkfq@163.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;

张利(1967), 女, 副教授, 主要研究方向为电力系统运行与控制;

韩学山(1959), 男, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为电力系统分析与控制。

(责任编辑 张玉荣)