

双馈风力发电系统的新型无功优化控制策略

贾俊川, 刘晋, 张一工

(华北电力大学电气与电子工程学院, 北京市昌平区 102206)

Novel Reactive Power Optimization Control Strategy for Doubly Fed Induction Wind Power Generation System

JIA Junchuan, LIU Jin, ZHANG Yigong

(School of Electrical and Electronic Engineering, North China Electric Power University, Changping District, Beijing 102206, China)

ABSTRACT: Based on the derivation of the power transfer limits of the doubly fed induction generator (DFIG) stator as well as the comprehensive analysis on the relationship between the output reactive power of the stator and generator losses, a novel DFIG reactive power control strategy was proposed. By fully considering the operational efficiency and performance of the DFIG, this approach allocates the exciting current equally to the stator current and the rotor current. Consequently, the capacity of grid side converter (GSC) was the same as that of rotor side converter (RSC), which made one could be a backup for another. Furthermore, based on the proposed control strategy and regard of the capacity of grid side converter, the DFIG capability to regulate the reactive power and the voltage was studied. Different methods to determine reactive power reference with distinct power system operational states were put forward. A model contained integrated wind power system was constructed. Simulation researches verify the efficiency of the proposed strategy.

KEY WORDS: doubly fed induction generator (DFIG); voltage control; reactive power regulations; power transfer limits; optimization of losses

摘要: 通过对双馈风力发电机定子功率极限的推导, 以及定子输出无功功率与双馈电机损耗关系的分析, 提出双馈风力发电机的一种新型控制策略。该方法对励磁电流的不同组合优化选择, 将励磁电流平均分配到定子和转子电流, 使网侧与转子侧变流器容量相等, 互为备用, 并综合考虑了双馈风力发电机的运行效率和工况性能。基于所提控制策略, 结合网侧变流器的容量设置, 对双馈风力发电机的无功调节能力和对接入系统的电压控制作用进行了探讨, 提出在不同系统运行状况下的无功选择办法。构建了包含双馈风力发电机组的测试系统, 仿真算例结果验证了所提控制策略的正确性和有效性。

关键词: 双馈发电机; 电压控制; 无功调节; 功率极限; 损

耗最优化

0 引言

风力发电作为当今最具规模化开发和商业化发展前景的可再生能源, 已经越来越受到各国的关注^[1-2]。基于双馈电机的变速风力发电机组由于其变速恒频的运行特性成为风电领域的主流和研究热点。

双馈风力发电系统具有定、转子两套绕组, 定子绕组与电网直接相连, 转子绕组则通过背靠背的脉宽调制(pulse width modulation, PWM)变流器与电网连接, 因此能量可以从定、转子两侧进行馈送。其中, 与电网相连的网侧变流器(grid side converter, GSC)控制直流环节电压, 并可根据电网需求调节网侧的功率因数; 与电机连接的转子侧变流器(rotor side converter, RSC)实现发电机输出有功、无功的解耦控制。控制有功功率可调节风力发电机的转速, 实现最大风能捕获而提高风能转换效率, 控制无功功率可调节电网的功率因数, 提高发电机组及系统运行的动、静态稳定性。

国内外许多学者已针对双馈机组无功功率的相关控制策略进行了大量的研究。文献[3-9]从双馈发电机(doubly fed induction generator, DFIG)的功率关系出发, 分析了变速恒频风电机组的功率极限; 文献[10-11]对风电场参与地区电网电压调节问题进行了研究, 提出利用变速恒频风电机组的快速无功调节能力参与电网无功、电压的控制; 文献[12-13]基于变速恒频电机的等效电路, 分析了双馈风电机组的无功功率极限, 并对DFIG损耗进行了无功优化控制。以上研究更多地是针对风电场的无功控制策略, 均未对

双馈发电系统中变流器的容量进行优化配置。

目前风电场中的变速恒频风电机组通常情况下以恒功率因数(单位功率因数)方式运行^[14], 定子侧和网侧变流器均以单位功率因数运行, 发电机的励磁电流完全由转子电流提供。为了保持直流环节电压稳定, 网侧变流器与转子侧变流器传递的有功应相等, 因此, 转子侧变流器的设计容量要比网侧变流器大, 其增大的容量与转子侧的无功电流即双馈电机励磁电流有关。

在工程实际中, 由于网侧变流器与转子侧变流器容量不相等, 所以需要增加设备(变流器)备件的种类, 从而增加成本和复杂度, 不利于工程实施与维护。此外, 恒功率因数的运行方式也使双馈风力发电机组的无功调节能力未得到充分利用。

本文综合考虑双馈风力发电机的运行效率和性能, 从励磁电流的不同组合优化选择、变流器容量的合理配置及充分发挥变流器无功调节能力的角度出发, 设计利于工程实施的风力发电机组新型无功优化控制策略。仿真结果验证了本文所提控制策略的合理性和有效性。

1 双馈风力发电机的运行特性

1.1 双馈电机的定子有功、无功功率极限

定子侧采用发电机惯例, 转子侧采用电动机惯例的DFIG等效电路如图1所示^[12-13]。其中, P_1 、 Q_1 、 P_2 、 Q_2 分别为定、转子的有功和无功功率。

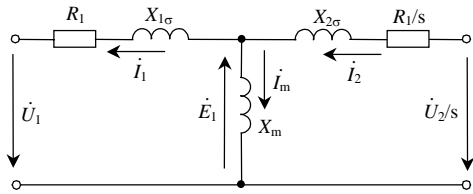


图1 DFIG等效电路

Fig. 1 Equivalent circuit of DFIG

根据等效电路可得到方程:

$$\begin{cases} \dot{E}_1 = \dot{I}_m \cdot jX_m \\ \dot{U}_1 = \dot{E}_1 - \dot{I}_1(R_1 + jX_{1\sigma}) \\ \frac{\dot{U}_2}{s} = \dot{E}_1 + \dot{I}_2(\frac{R_2}{s} + jX_{2\sigma}) \\ \dot{I}_2 = \dot{I}_1 + \dot{I}_m \end{cases} \quad (1)$$

式中: \dot{U}_1 、 \dot{U}_2 、 \dot{E}_1 分别为DFIG定、转子电压和气隙磁场感应电动势; \dot{I}_1 、 \dot{I}_2 、 \dot{I}_m 分别为定、转子和励磁电流; $X_{1\sigma}$ 、 $X_{2\sigma}$ 、 X_m 分别为定、转子漏抗和励磁感抗, $X_1 = X_{1\sigma} + X_m$, $X_2 = X_{2\sigma} + X_m$ 。

式中转子侧各量均已折算到定子侧。

设 $\dot{U}_1 = U_1 \angle 0^\circ$, $\dot{I}_1 = I_{1r} + jI_{1i}$, 且 U_1 、 I_1 分别为定子电压、电流的有效值, 则有

$$\begin{cases} I_{1r} = P_1 / (3U_1) \\ I_{1i} = -Q_1 / (3U_1) \end{cases} \quad (2)$$

将 $\dot{I}_1 = I_{1r} + jI_{1i}$ 代入式(1), 解得

$$\dot{I}_2 = \frac{1}{X_m}(I_{1r}X_1 + I_{1i}R_1) - j\frac{1}{X_m}(U_1 + I_{1r}R_1 - I_{1i}X_1) \quad (3)$$

将式(2)代入式(3), 得

$$\dot{I}_2 = \frac{1}{3X_m U_1}(P_1 X_1 - Q_1 R_1) - j\frac{1}{3X_m U_1}(3U_1^2 + P_1 R_1 + Q_1 X_1) \quad (4)$$

则转子电流的有效值为

$$I_2 = \frac{1}{3X_m U_1}[(R_1^2 + X_1^2)(P_1^2 + Q_1^2) + 6U_1^2(P_1 R_1 + Q_1 X_1) + 9U_1^4]^{1/2} \quad (5)$$

进一步整理可得

$$(P_1 + \frac{3U_1^2 R_1}{R_1^2 + X_1^2})^2 + (Q_1 + \frac{3U_1^2 X_1}{R_1^2 + X_1^2})^2 = \frac{9U_1^2 X_m^2 I_2^2}{R_1^2 + X_1^2} \quad (6)$$

设双馈电机转子最大电流为 I_{2max} , 并忽略定子电阻, 则式(6)可化简为

$$P_1^2 + (Q_1 + \frac{3U_1^2}{X_1})^2 = \frac{9U_1^2 X_m^2 I_{2max}^2}{X_1^2} \quad (7)$$

式(7)即为双馈电机定子侧输出功率必须满足的约束条件。实际系统中, 无论超同步或次同步运行, 双馈风力发电机组定子侧均为发电状态, 因此双馈发电机定子输出的有功及无功功率轨迹为一个以 $(0, -3U_1^2/X_1)$ 为圆心, 以 $3U_1 X_m I_{2max}/X_1$ 为半径, 以 ABCD 为边界的近似半圆^[15-16], 如图2所示。图中, P_{1max} 为双馈电机的最大有功功率。

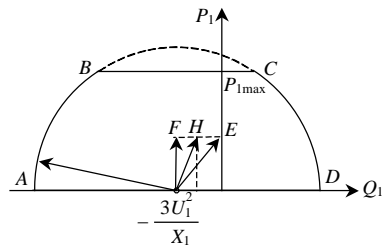


图2 双馈风力发电机的定子功率边界

Fig. 2 Stator power limits of DFIG

由图2可以看出, 圆心向 Q_1 轴负向偏移, 其数值表示双馈电机励磁电感的无功消耗, 是双馈风力发电系统正常运行时磁场建立所需要的无功功率。图2也反映了双馈电机的无功调节能力。

1.2 无功功率优化

双馈风力发电系统在正常情况下运行在单位功率因数，以捕获最大风能、输出最大有功功率为主要目标，因此，需尽量减小系统的损耗，提高运行效率，以优化 DFIG 的运行状况。

忽略铁损，双馈发电系统的自身损耗^[12-13]为

$$P_{\text{loss}} = P_{\text{Cu1}} + P_{\text{Cu2}} = 3I_1^2 R_1 + 3I_2^2 R_2 \quad (8)$$

式中 P_{Cu1} 、 P_{Cu2} 分别为 DFIG 的定、转子铜耗。

将式(2)、(5)代入式(8)，整理得

$$P_{\text{loss}} = aQ_1^2 + bQ_1 + c \quad (9)$$

式中系数 a 、 b 、 c 分别为

$$\begin{cases} a = \frac{R_1 X_m^2 + R_1^2 R_2 + X_1^2 R_2}{3X_m^2 U_1^2} \\ b = \frac{6X_1 R_2 U_1^2}{3X_m^2 U_1^2} \\ c = \frac{1}{3X_m^2 U_1^2} [(R_1 X_m^2 + R_1^2 R_2 + X_1^2 R_2) P_1^2 + 6R_1 R_2 U_1^2 P_1 + 9R_2 U_1^4] \end{cases} \quad (10)$$

由于 $a > 0$ ，所以式(9)DFIG 损耗表达式为一个开口向上的抛物线，如图 3 所示。从图中可以看出，当 $Q_1^* = -b/2a$ 时，损耗有最小值。因此，为保证双馈风力发电系统自身损耗最小，定子侧无功功率的设定值应为

$$Q_1^* = -\frac{b}{2a} = -\frac{3X_1 R_2 U_1^2}{R_1 X_m^2 + R_1^2 R_2 + X_1^2 R_2} \quad (11)$$

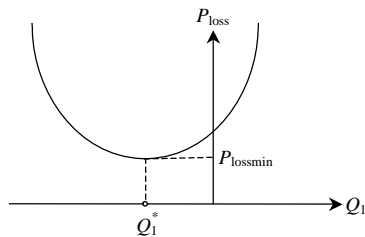


图 3 DFIG 损耗曲线

Fig. 3 Loss curve of DFIG

由于 $X_{1\sigma} \ll X_m$ ，则 $X_1 \approx X_m$ ，一般有 $R_1 \approx R_2$ ，因此式(11)可简化为

$$Q_1^* = -\frac{3U_1^2}{2X_1} \quad (12)$$

可见，此最优损耗时的无功功率，为图 2 定子功率边界图的圆心所在处无功功率的一半。也就是说，双馈风电系统建立磁场所需的无功功率平均分配给定子侧与转子侧时，双馈电机的自身损耗最小。

1.3 电压支撑时的无功功率选择

风速或系统的运行方式改变时，会引起风电场

母线侧和接入点的电压波动，因此，应充分发挥并利用双馈风力发电机组的快速无功调节能力^[17]，提高风电场接入地区电压稳定性以及电网运行的可靠性^[18-19]。以风电场接入点作为电压控制点，当系统电压波动时，电压控制的目标是尽量将接入点电压恢复到扰动前的水平^[20]。

在撬棒(crowbar)未动作时，定子及网侧变流器均可调节无功。文献[21]指出网侧变流器的控制带宽明显高于发电机组，可对电网故障迅速做出反应，因此，在故障期间选择通过网侧变流器向电网注入无功功率比选择转子侧变流器通过发电机注入无功功率要容易实现，也更加可靠。在电压降落至撬棒动作时，转子侧变流器被旁路退出，此时只有网侧变流器可提供无功和电压支撑，因而本文主要研究网侧变流器对系统电压和无功的调节能力。在风速或系统运行方式改变的情况下，网侧变流器在功率容量范围内，对接入点的电压波动进行无功功率调节。

2 双馈风力发电机组的新型控制策略

2.1 转子侧变流器控制

对 DFIG 的电压、磁链方程进行坐标变换，通过矢量控制可实现发电机有功、无功解耦。采用定子磁链定向控制，可求得定、转子电流的关系为

$$\begin{cases} i_{m2} = \frac{L_1}{L_m} i_{m1} + \frac{1}{L_m} \psi_1 \\ i_{t2} = \frac{L_1}{L_m} i_{t1} \end{cases} \quad (13)$$

式中： L_1 、 L_m 分别为定子自感和互感； i_{m1} 、 i_{t1} 、 i_{m2} 、 i_{t2} 分别为定、转子电流的无功(或励磁)、有功(或转矩)分量； ψ_1 为定子磁链幅值。

由 1.2 节可知，当按照双馈电机损耗最小的原则来选取 DFIG 定子侧无功功率时，双馈发电系统的励磁电流由定、转子电流共同提供，且各自贡献一半，如式(13)所示。由于一定风速下的有功电流恒定，而励磁组合不同时对应的转子电流却不同，图 2 中的 F 点对应双馈电机定子电流单独励磁的情况，E 点对应转子电流单独励磁的情况，而 H 点对应定子和转子各贡献一半励磁电流的情况。比较可知，定、转子电流各励磁一半时，DFIG 转子侧变流器的容量较小，对应的电机损耗最小。因此，可从这个角度出发，设计双馈风力发电系统的转子侧变流器控制策略。

图4为转子侧变流器的控制系统。其中，有功功率给定根据最大风能捕获选择，而无功功率给定分为2种模式：在正常情况下采用优化模式，参考值依据DFIG最小损耗的原则选取；在电网电压波动或降落时，采用单位功率因数控制模式，实现定子侧单位功率因数运行，而无功电压支撑的功能由网侧变流器承担。图中， P_{opt} 、 Q_{opt} 分别为定子侧的有功、无功给定； P_{mea} 、 Q_{mea} 为检测的有功和无功功率。

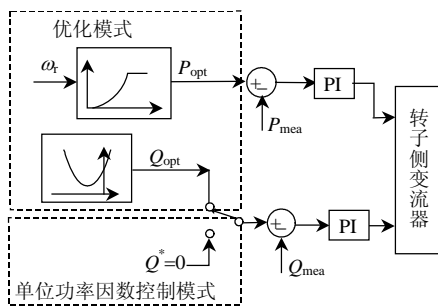


图4 转子侧变流器控制系统
Fig. 4 Control system of RSC

2.2 网侧变流器控制

在本文提出的控制思路下，励磁电流由定、转子电流共同建立，转子侧变流器只承担一半的无功电流，因此变流器容量减小；而定子侧吸收无功功率，使定子侧功率因数下降。为保持电网在单位功率因数运行状态，网侧变流器需对定子侧无功进行补偿，使网侧变流器输出与定子侧大小相等、性质相反的无功功率，控制框图见图5中的优化模式。

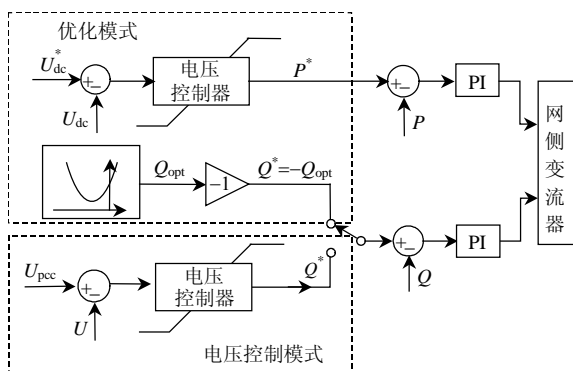


图5 网侧变流器控制系统
Fig. 5 Control system of GSC

此时网侧变流器不仅流过有功电流，也要承受为补偿定子无功而增加的无功分量，因此，设计容量增加。由于定子及网侧变流器均与电网连接，电压相等，则网侧变流器的无功电流分量与定子侧励磁电流大小相等，又因为定子励磁电流等于转子励

磁电流，因此网侧变流器需增加的无功容量与转子侧变流器的无功容量相等；而为保持直流侧电压恒定，网侧变流器和转子侧变流器的有功容量必须相等，因此在这样的控制策略下，两个变流器理论上所需的容量相同。

这种控制方式带来一系列优点：1) 选用相同容量的变流器，工程实际中可采用相同的换流器备件，从而减少备品备件的种类，且使用本文提出的控制策略，变流器的容量均得以充分利用；2) 由于网侧电压和频率基本上是恒定不变的，只需要控制电流的大小和相位，即可实现有功和无功调节，因此比在转子侧进行控制要简单；3) 网侧变流器的容量增大，使双馈发电系统的无功调节能力进一步增强，在系统电压故障的情况下，网侧变流器可以输出更多的无功功率，使DFIG的低电压渡过(穿越)能力增强，对故障时的电压支撑及故障后系统电压的恢复更加有利，在合适的容量配置下，甚至可以替代为补偿风力系统无功而设置的动态无功补偿设备(SVC或STATCOM)^[20]。

为了充分发挥其无功调节能力，当风速或系统运行方式改变引起接入点电压 U_{pcc} 波动时，变流器应尽量补偿系统需求的无功，对电压进行支撑，其电压控制模式如图5所示。

为保证双馈发电系统的可靠运行，在两种模式切换时需设定必要的门槛电压(或死区)，即当接入点电压低于下限门槛电压时，转为电压控制模式；当接入点电压大于上限门槛时，转为优化控制模式。门槛电压(或死区)的跨度可根据实际现场接入点电压波动的频度选择。

3 算例分析

3.1 算例参数

仿真系统的简化连接电路^[2-3]如图6所示。其中双馈发电机的参数如表1所示。风力机出口电压由 T_2 升到10 kV，经100 km的线路，由 T_1 升到110 kV。母线2接有负载(500 kW，100 kVar)。

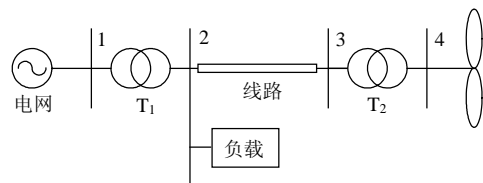


图6 风力发电系统接线图
Fig. 6 Diagram of a wind power generation system

表 1 双馈电机参数
Tab. 1 Parameters of DFIG

定子电阻/ Ω	转子电阻/ Ω	定子漏感/ mH	转子漏感/ mH	励磁电感/ mH
1.40	1.40	5.839	5.839	172.2

3.2 算例结果

3.2.1 优化模式

在系统正常运行时，定子无功功率参考值由 DFIG 损耗最小化原则确定，而为保证电网单位功率因数，网侧变流器无功功率参考值则设定为与定子无功大小相等。图 7 分别为定子、网侧变流器及电网的无功功率。可以看出，定子侧吸收感性无功建立磁场，网侧变流器则发出感性无功功率，从而实现电网的单位功率因数。

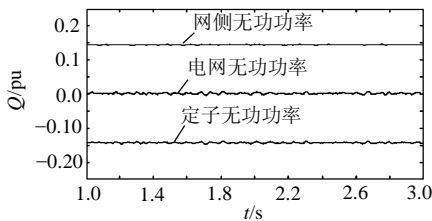


图 7 定子、网侧变流器及电网无功功率

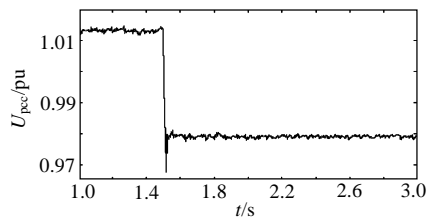
Fig. 7 Reactive power of stator, grid side converter and the grid

3.2.2 电压控制模式

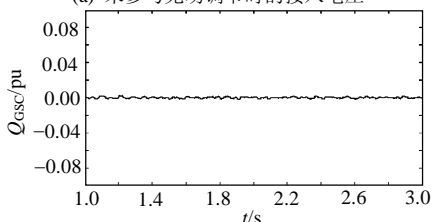
仿真过程中模拟负荷变化，在 1.5 s 时使负荷增加一倍。图 8 为电压控制模式下的仿真结果。

当网侧变流器未参与电网电压控制时，变流器的无功功率为 0，如图 8(b)所示。在 1.5 s 系统负荷增加时，风力系统接入点电压下降，如图 8(a)所示，电压由 1.014 pu 下降到 0.98 pu。

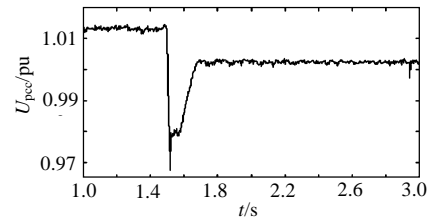
为充分发挥 DFIG 的无功调节能力，使 DFIG 网侧变流器参与电网电压控制，由图 8(c)可见，接入点电压在很短的时间内被支撑到 1.004 pu。如



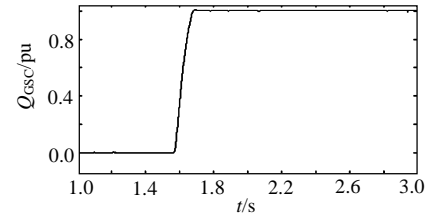
(a) 未参与无功调节时的接入电压



(b) 未参与无功调节时的网侧变流器无功功率



(c) 参与无功调节时的接入电压



(d) 参与无功调节时的网侧变流器无功功率

图 8 双馈电机的无功调节与电压控制

Fig. 8 Reactive regulation and voltage control of DFIG

图 8(d)所示，GSC 完全参与到无功调节中，当变流器容量进一步增大，其电压支撑作用则更强，可使电压完全恢复到负荷波动前的水平^[20]。

4 结论

1) 本文提出的新型无功优化控制策略，使部分励磁控制从转子侧变流器转移到控制相对简单的网侧变流器，减小了双馈电机的自身损耗，便于控制器的设计和实施。

2) 新型控制策略使网侧变流器与转子侧变流器容量相同，减小了工程备品备件的种类，并充分利用了变流器无功容量，提高了容量利用率和运行效率。

3) 新型控制策略下，网侧变流器容量增加，无功调节能力增强，有利于对系统电压和无功进行支撑，改善电网功率因数及电压稳定性。在电网低电压故障期间，可提高 DFIG 的低电压渡过(穿越)能力，同时有利于故障后系统的恢复。

4) 需要进一步研究的是网侧变流器容量增大的幅度与对电网电压和无功支撑的比例关系。另外，还需研究风力发电机组并网期间，以及在转子转速接近同步速时的过渡控制等。

参考文献

[1] 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).

[2] 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): 102-108.
- 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): 102-108(in Chinese).
- [3] 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).
- [4] 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 Weisheng, Dai Huizhu. Reactive power limit of variable-speed constant-frequency wind turbine[J]. Power System Technology, 2003, 27(11): 60-63(in Chinese).
- [5] Braun M. Reactive power supplied by wind energy converters—cost-benefit-analysis[C]//European Wind Energy Conference. Brussels, Belgium: European Wind Energy Association, 2008: 10.
- [6] Fernandez L M, Garcia C A, Jurado F. Comparative study on the performance of control systems for doubly fed induction generator (DFIG) wind turbines operating with power regulation[J]. Energy, 2008, 33(9): 1438-1452.
- [7] Tapia A, Tapia G, Ostolaza J X. Reactive power control of wind farms for voltage control application[J]. Renewable Energy, 2004, 29(3): 377-392.
- [8] Tapia A, Tapia G, Ostolaza J X, et al. Modeling and control of a wind turbine driven doubly fed induction generator[J]. IEEE Trans. on Energy Conversion, 2003, 18(2): 194-204.
- [9] Bogalecka E, Kosmecki M. Control of reactive power in doubly-fed machine based wind park[C]//13th International Power Electronics and Motion Control Conference. Poznan, Poland: IEEE, 2008: 1975-1980.
- [10] 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).
- [11] 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, 29(9): 15-21.
- 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, 29(9): 15-21(in Chinese).
- [12] 秦涛, 吕跃刚, 徐大平. 采用双馈机组的风电场无功功率控制技术[J]. 电网技术, 2009, 33(2): 105-110.
- Qin Tao, Lü Yuegang, Xu Daping. Reactive power control of wind farm adopting doubly-fed induction generators[J]. Power System Technology, 2009, 33(2): 105-110(in Chinese).
- [13] 刘其辉. 变速恒频风力发电系统运行与控制研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2005.
- Liu Qihui. The investigation of operation and control for a variable-speed constant-frequency wind power generation system [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2005(in Chinese).
- [14] Fernandez L M, Garcia C A, Saenz J R, et al. Reduced model of wind farms using aggregation of wind turbines and equivalent wind [C]//IEEE Mediterranean Electrotechnical Conference. Benalmadena, Spain: IEEE, 2006: 881-884.
- [15] Wilch M, Pappala V S, Singh S N, et al. Reactive power generator by DFIG based wind farms with AC grid connection[C]//IEEE Lausanne Powertech. Lausanne, Switzerland: IEEE, 2007: 626-632.
- [16] Kayıkçı M, Milanović J V. Reactive power control strategies for DFIG-based plants[J]. IEEE Trans. on Energy Conversion, 2007, 22(2): 389-396.
- [17] 李建林, 高志刚, 赵斌, 等. 双馈感应发电机风能无功快速响应系统的研究[J]. 高电压技术, 2007, 33(11): 164-168.
- Li Jianlin, Gao Zhigang, Zhao Bin, et al. Research of indvar VSCF-DFIG[J]. High Voltage Engineering, 2007, 33(11): 164-168(in Chinese).
- [18] 李晶, 李建林, 许洪华. 基于配电网无功优化的变速恒频双馈风电机组控制策略[J]. 电网技术, 2006, 30(15): 59-64.
- Li Jing, Li Jianlin, Xu Honghua. A Control strategy of doubly-fed variable speed wind turbines based on reactive power optimization of distribution systems[J]. Power System Technology, 2006, 30(15): 59-64(in Chinese).
- [19] 迟永宁, 关宏亮, 王伟胜, 等. SVC 与桨距角控制改善异步机风电场暂态电压稳定性[J]. 电力系统自动化, 2007, 31(3): 95-101.
- Chi Yongning, Guan Hongliang, Wang Weisheng, et al. Enhancement of transient voltage stability of induction generator based wind farm by SVC and pitch control[J]. Automation of Electric Power Systems, 2007, 31(3): 95-101(in Chinese).
- [20] 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).
- [21] 梁亮, 李建林, 许洪华. 电网故障下双馈感应式风力发电系统的无功功率控制策略[J]. 电网技术, 2008, 32(11): 70-73.
- Liang Liang, Li Jianlin, Xu Honghua. Reactive power control strategy for doubly-fed induction wind power generation system under fault in power network[J]. Power System Technology, 2008, 32(11): 70-73(in Chinese).



贾俊川

收稿日期: 2010-03-10。

作者简介:

贾俊川(1983), 男, 博士研究生, 研究方向为电力系统分析、运行与控制, 双馈风力发电技术, jiajunchuan@126.com;

刘晋(1974), 男, 讲师, 博士研究生, 研究方向为双馈风力发电技术, 电力电子技术在电力系统中的应用;

张一工(1955), 男, 教授, 研究方向为双馈风力发电技术, 无功补偿, 电力电子技术在电力系统中的应用。

(责任编辑 张玉荣)