

电网故障下直驱式风电机组建模与控制仿真研究

蔺红, 晁勤

(新疆大学电气工程学院, 新疆 乌鲁木齐 830047)

摘要: 为分析直驱式永磁同步风电机组在电网故障时的联网运行特性, 建立了风轮机、永磁同步发电机及全功率变流器的数学模型, 构建了风轮机转速控制模型、PWM 背靠背变流器控制模型及桨距角控制模型。在电网电压降落、风电场邻近母线单相短路接地、三相短路接地故障时联网风电场的暂态过程进行仿真分析, 仿真结果表明所建模型是合理的、控制方法是有效的, 为进一步研究新疆电网含大规模风电场的电力系统稳定性分析奠定基础。

关键词: 直驱式风电机组; 背靠背变流器; 联网; 电网故障; 暂态特性

Simulation study of modeling and control of direct drive wind turbine under grid fault

LIN Hong, CHAO Qin

(School of Electric Engineering, Xinjiang University, Urumuqi 830047, China)

Abstract: In order to analyze the performances of directly permanent magnet synchronous generator wind turbine connecting to the grid under grid fault, the mathematic models of wind turbine, permanent magnet synchronous generator (PMSG), and all-power inverter are built; the control methods of rotor speed of wind turbine, PWM back-to-back converter and pitch angle are presented. The transient characteristics of on-grid wind farm is simulated when grid voltage sag, single-phase short-circuit ground fault and three-phase ground fault happen on bus nearby wind farm. The simulation results show that the models and control methods are correct and valid. It lays a foundation for studying voltage stability on Xinjiang grid including large scale of wind farm in future.

Key words: direct drive wind turbine; back-to-back converter; connect to grid; grid fault; transient characteristics

中图分类号: TM743 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2010)21-0189-07

0 引言

我国能源结构的现状是以煤炭、石油等化石能源为主要能源产业, 在化石能源逐渐枯竭和节能减排的双重压力下, 新能源产业特别是风电产业的发展将是国家长期能源发展方向, 以实现经济低碳化。风电发展面临电网限制瓶颈, 继新能源、节能减排政策后, 国家又出台一新政策, 明确智能电网建设将是中国电网未来十年发展的主要方向。

中国的智能电网定义为坚强智能电网, 涵盖发电、调度、输变电、配电和用户各个环节, 是建设以特高压电网为骨干网架、各级电网协调发展的坚强电网, 并实现电网的信息化、数字化、自动化、互动化, 在供电安全、可靠和优质的基础上, 进一步实现清洁、高效、互动的目标。智能电网是一个

高效、智能、能够充分保证将可再生能源集成入网, 并保证太阳能及风能发电稳定性的电网, 智能电网将成为新能源新的发送、调配平台。风电入网对系统的影响及系统故障对风电运行特性的影响, 风电调度等都需要研究风电运行特性及风电的控制技术。

风力发电系统中常用的有恒速恒频发电、变速恒频发电。变速恒频风电机组以其固有的优势已取代了恒速恒频风电机组。变速恒频风电机组有双馈式和直驱式, 已有大量文献对双馈式风力发电机组的并网控制及故障时控制策略进行了研究^[1-5]。随着风力发电机单机容量的日益增大, 直驱式风力发电机组优势突显, 直驱式风力发电机系统采用风轮机直接驱动多极低速永磁同步发电机发电, 然后通过功率变换电路将电能转换后并入电网, 系统效率大为提高, 有效地抵制了噪声, 直驱式风力发电机的控制策略及运行特性逐步成为研究的热点问题^[6-8]。以往的研究多集中于电网电压骤降双馈风电机组励

基金项目: 新疆教育厅重点项目 (XJEDU2008I62); 新疆大学优秀博士生创新项目

磁控制^[1-2], 电网运行状况的变化对直驱式风电机组影响的研究较少。

本文为分析直驱式永磁同步风电机组在电网故障时的联网运行特性, 建立了风轮机、永磁同步发电机及全功率变流器的数学模型, 研究了变流器控制方法、桨距角控制方法, 直驱式风电机组采用恒电压控制策略, 在电网电压降落、风电场邻近母线发生单相短路接地故障、三相短路接地故障时的暂态过程进行仿真分析, 验证了所建模型的正确性及控制方法的有效性。

1 直驱式风电机组结构

直驱式风力发电机组包括以下几个模块: 风轮机, 永磁同步发电机, 背靠背变流器及变流器控制系统, 桨距角控制系统, 其结构图如图 1 所示。

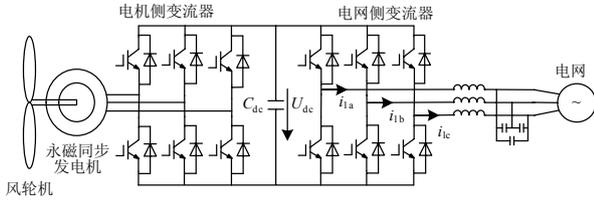


图 1 直驱式风电机组结构示意图

Fig.1 Structure schematic of direct drive wind turbine

2 数学模型

2.1 风轮机模型

风轮机从风能中获得的机械功率:

$$P_w = \frac{\rho}{2} c_p(\lambda, \beta) A_t v_w^3 \quad (1)$$

其中: P_w 为机械功率; ρ 为空气密度, kg/m^3 ; $c_p(\lambda, \beta)$ 为风能转换系数; β 为桨距角, ($^\circ$); A_t 为风轮扫掠面积, m^2 ; λ 为叶尖速比, 即风轮叶尖线速度与风速 v_w 之比。风能转换系数 c_p 与叶尖速比 $\lambda = \frac{\Omega R}{v_w}$ 及桨距角 β 的关系^[9]近似为:

$$c_p(\lambda, \beta) = 0.073 \left(\frac{151}{\lambda_1} - 0.05\beta - 0.002\beta^{2.14} - 13.2 \right) e^{\frac{18.4}{\lambda_1}} \quad (2)$$

$$\lambda_1 = \frac{1}{\frac{1}{\lambda - 0.02\beta} + \frac{0.003}{\beta^3 + 1}}$$

2.2 永磁同步发电机数学模型

以发电机转子磁通为参考坐标系, 定子遵循发电机惯例, 经过坐标变换后得到 dq 坐标系下的永磁同步发电机定子电压方程^[10-12]:

$$u_{sd} = -R_s i_{sd} + \omega_r L_s i_{sq} - L_s \frac{di_{sd}}{dt} \quad (3)$$

$$u_{sq} = -R_s i_{sq} - \omega_r L_s i_{sd} - L_s \frac{di_{sq}}{dt} + \omega_r \psi$$

转子运动方程:

$$\frac{d\omega_r}{dt} = \frac{1}{2H_m} (P_w - P_e) \quad (4)$$

电磁转矩计算公式:

$$P_e = \frac{3}{2} p \psi i_{qs} \quad (5)$$

矢量控制角:

$$\theta_r = \int \omega_r dt \quad (6)$$

u_{sd} 、 u_{sq} 分别为定子电压 d 轴和 q 轴基波分量;

i_{sd} 、 i_{sq} 分别为定子 d 轴和 q 轴电流基波分量; R_s 为定子电阻; L_s 为定子电感; ω_r 为电角速度; ψ 为永磁体磁链; H_m 为转子的转动惯量; p 为永磁同步发电机的极对数; P_e 为发电机的电磁转矩; P_w 为风力机输入到永磁同步发电机转子的机械转矩。

2.3 变流器数学模型

电机侧变流器与发电机定子直接相连, 电压方程为式 (3) 所示的定子电压方程。

功率方程:

$$P_e = u_{sd} i_{sd} + u_{sq} i_{sq} \quad (7)$$

$$Q_e = u_{sq} i_{sd} - u_{sd} i_{sq}$$

电网侧变流器通过直流电容与电机侧变流器相连, 网侧变换器在 d-q 坐标系下的电压、功率方程为:

$$u_d = -R_g i_{gd} - L_g \frac{di_{gd}}{dt} + \omega_g L_g i_{gq} + u_{gd} \quad (8)$$

$$u_q = -R_g i_{gq} - L_g \frac{di_{gq}}{dt} - \omega_g L_g i_{gd}$$

$$P_g = u_{gd} i_{gd} + u_{gq} i_{gq} \quad (9)$$

$$Q_g = u_{gd} i_{gq} - u_{gq} i_{gd}$$

式中: R_g 和 L_g 分别为网侧变换器与电网之间的等值电阻和连接电感; u_d 、 u_q 分别为网侧变换器输出电压的 d、q 轴基波分量; u_{gd} 、 u_{gq} 、 i_{gd} 、 i_{gq} 分别为电网电压和电流的 d、q 轴分量; ω_g 为电网同步角速度。

2.4 保护系统

保护系统包括限流器和两个切换控制部分, 切换控制分别用于当端电压和电网频率在一定时偏离正常值超过允许范围时将风轮机切出, 限流器用于

限制转换器的电流以保护电力电子转换器^[10]。

3 直驱式风电机组的控制系統

直驱式风电机组的出力与风速有关, 其运行有两种状态: 一是在切入风速与额定风速之间, 风电机组运行在最大功率追踪的状态; 二是在额定风速与切出风速之间, 风电机组运行在恒功率运行状态, 使风力发电机组出力保持在额定功率附近。

直驱式风电机组的两个运行状态是由控制系统实现的。直驱式风电机组的控制系统包括发电机侧变流器控制系统、电网侧变流器控制系统、桨距角控制系统。

3.1 最大风能追踪控制

3.1.1 最大风能追踪原理

要实现最大风能追踪, 应在风速变化时及时调整风轮机转速, 使其始终保持最佳叶尖速比运行, 从而可保证系统运行于最佳功率曲线上。对风轮机转速的控制可通过风轮机变桨调节, 也可通过控制发电机输出功率进行调节^[11]。发电机的转速是由风轮机的机械转矩和发电机的电磁转矩控制的, 改变发电机的电流即可改变电磁转矩从而控制发电机输出的功率。通过控制发电机输出有功功率来调节发电机的电磁转矩, 进而控制发电机转速。永磁同步发电机的功率关系:

$$\begin{cases} P_e = P_w - P_0 \\ P_s = P_e - P_{cu} - P_{fe} = P_w - \Delta P \end{cases} \quad (10)$$

式中: $\Delta P = P_0 + P_{cu} + P_{fe}$; P_e 、 P_m 、 P_0 分别为发电机电磁功率、风轮机输出机械功率、机械损耗; P_s 、 P_{cu} 、 P_{fe} 分别为发电机定子输出有功功率、铜耗、铁耗。为实现最大风能跟踪控制, 应根据风轮机转速实时计算风轮机输出的最佳功率值 P_{opt} , 当 $P_w = P_{opt}$, 可实现永磁同步发电机发出的有功功率追踪最大风能。

P_{opt} 与发电机转速 ω_r 的关系^[13]:

$$P_{opt} = K\omega_r^3 \quad (11)$$

式中: $K = \frac{\rho}{2} c_{pmax} A_r (R/\lambda_{opt})^3$ 。

3.1.2 发电机侧变流器控制

发电机侧变流器控制目标是: 将永磁同步发电机发出的频率、电压幅值均变化的交流电整流成直流电; 控制风轮机转速, 实现最大风能追踪; 控制与永磁同步发电机间的无功交换。

发电机侧变流器采用转子磁链定向控制技术,

转子磁链定向在 d 轴上, $u_{sd} = 0$, 式 (7) 功率方程可写为: $P_e = u_{sq} i_{sq}$, $Q_e = u_{sd} i_{sd}$ 可实现有功无功解耦控制, 由 i_{sq} 控制有功 P , 由 i_{sd} 控制无功 Q 。

有功功率外环控制中, q 轴电流参考值分两种运行状况获取 (见图 2): 一是风速在切入风速与额定风速之间, 最大风能追踪运行状况, 根据最大风能追踪原理, 发电机输出的有功功率由发电机的转速确定; 减去各损耗后, 跟发电机实际输出有功功率进行差值比较, 经过 PI 控制器可以得到 q 轴电流的参考值; 二是风速大于额定风速时, 恒功率输出运行状况, 风力发电机输出额定功率, 跟发电机实际输出有功功率进行差值比较, 经过 PI 控制器可以得到 q 轴电流的参考值。d 轴电流参考值的获取: d 轴控制发电机的运行状态, 电网电压 u_g 与参考电压 u_{gref} 比较的差值, 减去由于无功电流流过变流器时产生的电压降落 $(i_{sq} + i_{gq})X_s$, 经过 PI 控制器可以得到 d 轴电流的参考值。 X_s 是风电机组的电压与电流的关系曲线的斜率电抗标么值, 本文取 $X_s=0.02$ 。

电流内环控制中, dq 轴电流参考与实际反馈值比较后, 经过 PI 控制器, 加入发电机感应反电动势和 dq 电压分量的耦合项得到变流器端口处的参考电压值 U_{sd} 、 U_{sq} , 然后通过 SPWM 得变流器所需的 PWM 驱动信号, 实现交直流变换。

发电机侧变流器的控制框图如图 3 所示。

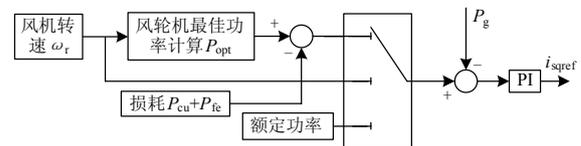


图 2 有功功率调节环节

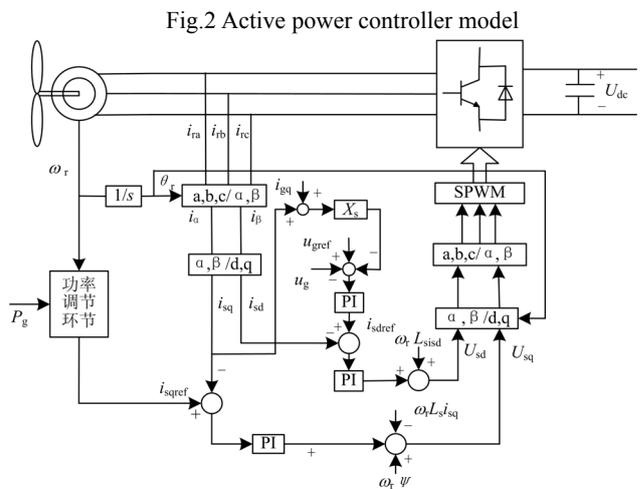


图 3 直驱式风电机组的电机侧控制示意图

Fig.3 Control schematic diagram at generator side of direct drive wind turbine

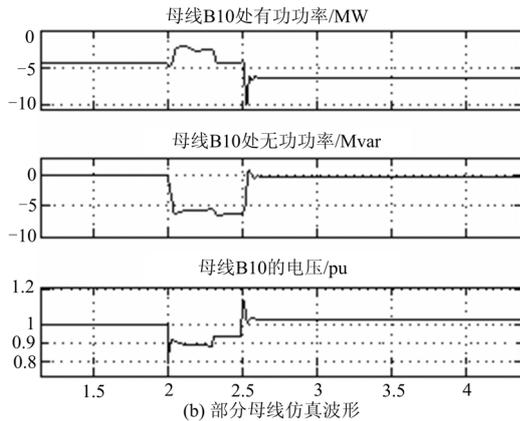


图7 电网电压降落时的仿真波形

Fig.7 Simulation waveforms when grid voltage sag

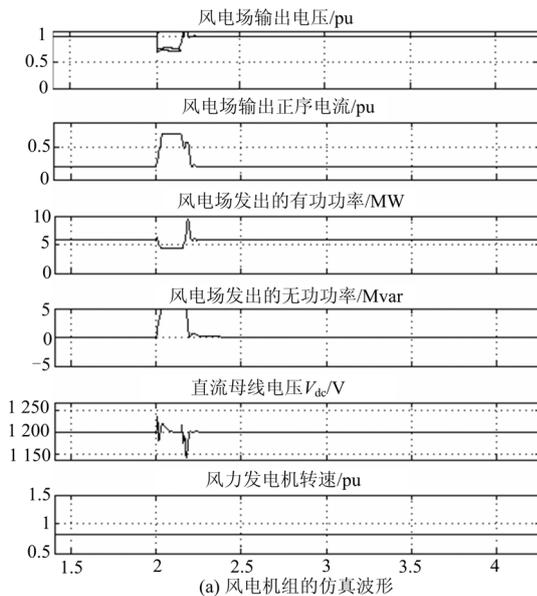
4.2 单相短路接地故障

风速保持 8 m/s, 邻近负荷母线 B10 在 2 s 发生单相短路接地故障, 0.15 s 故障消除, 仿真波形如图 8 所示。风电场出口非故障相电压降到 0.8 pu, 风力发电机的转速不变; 直流侧电压有较小的波动; 风电场的输出电流增大, 输出无功功率增大, 为系统提供一定的电压支持; 同时输出的有功功率减小。

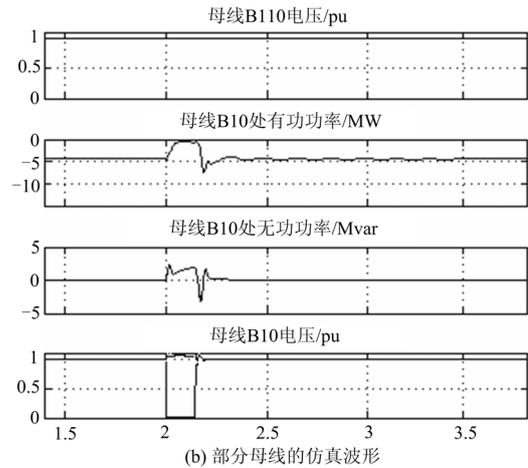
由图 8 (b) 可知: B10 母线发生单相接地短路故障, 对电网的电压 (母线 B110 的电压) 没有影响; 母线 B10 故障相电压降为零, 负荷未切除, 故障期间风电场向电网送的有功功率几乎为零, 电网尚需向负荷送无功功率。从流经母线 B10 无功功率可知, 母线 B10 无功潮流方向改变。

4.3 三相短路接地故障

风速保持 8 m/s, 在 6 s 时风电场邻近母线 B10 发生三相短路接地故障, 0.15 s 后故障消除, 仿真



(a) 风电机组的仿真波形

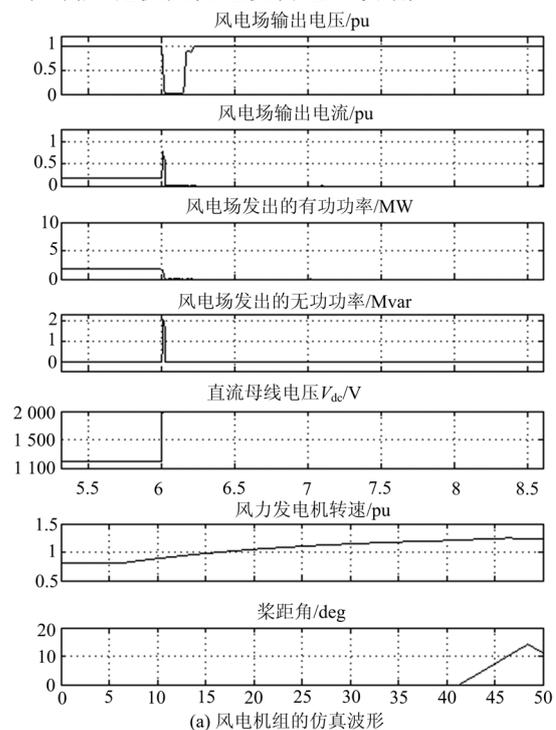


(b) 部分母线的仿真波形

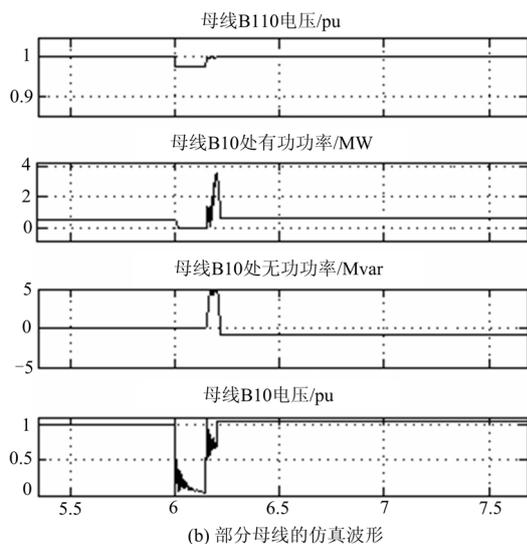
图8 单相短路接地故障时的仿真波形

Fig.8 Simulation waveforms during single-phase short circuit ground fault

波形如图 9 所示。从图 9 中可见, 三相短路接地故障时, 发电机转速逐渐增大, 风力发电机的直流母线电压 V_{dc} 迅速升高, 在 6.01 s 时因直流母线过电压, 保护动作, 将风力发电机组从电网中切除, 风电场出口电压降为 0, 风电场输出的电流、有功及无功功率为 0, 直驱式风电机组不向短路点提供短路电流 (此时可投入制动模块限制直流母线电压过压^[8], 保护直流电容, 防止电力电子器件损坏)。在 40 s 时风轮机的桨距角控制系统开始调解桨距角, 以减小风能利用率, 限制风轮机及发电机转速继续增大。



(a) 风电机组的仿真波形



(b) 部分母线的仿真波形

图9 三相短路接地故障的仿真波形

Fig.9 Simulation waveforms during three-phase short circuit ground fault

由图9(b)可知:风电场邻近母线B10发生三相短路接地故障,电网电压影响略有降落;故障消除后,电网向母线B10送无功功率,使B10母线电压迅速恢复。

5 结束语

本文建立了直驱式风电机组数学模型,背靠背变频器的控制模型、桨距角控制模型,应用Matlab软件进行仿真研究,从以上仿真结果中,可知(1)直驱式风电机组实现了有功无功解耦控制,当电网电压骤降时,直驱式风力发电机组输出无功功率,维持电网电压;(2)当风电场邻近母线发生单相短路接地时,风电机组为维持邻近母线节点电压提供无功支持;(3)当风电场邻近母线发生三相短路接地故障时,直驱式风力发电机的转速升高,变流器直流侧电压升高,桨距角调节系统调节桨距角增大,减小风能捕获,但风电机组不向短路点提供短路电流。(4)系统正常运行时,风电机组运行在单位功率因数,只向电网注入有功功率,当电网故障时,风电机组降低有功功率输出,增大无功功率输出,联接风电场与电网间的元件会承受双向潮流,在风电系统接入设计及含风电的电力系统继电保护设计时需考虑。

直驱式风力发电机可以进行有功功率、无功功率解耦控制,电网故障时直驱式风电机组调节无功功率输出,对电网电压的恢复有积极的作用,能改善电网的稳定性。

参考文献

[1] 姚骏, 廖勇. 电网短路时交流励磁风电机组网侧变换

器控制策略[J]. 电力系统自动化, 2008, 32(12): 83-87.

YAO Jun, LIAO Yong. A control strategy of grid-side converter for AC excited wind turbine under grid short-circuit fault[J]. Automation of Electric Power Systems, 2008, 32(12): 83-87.

[2] 胡家兵, 孙丹, 贺益康, 等. 电网电压骤降故障下双馈风力发电机建模与控制[J]. 电力系统自动化, 2006, 30(8): 21-26.

HU Jia-bing, SUN Dan, HE Yi-kang, et al. Modeling and control of DFIG wind generation system under grid voltage dip[J]. Automation of Electric Power Systems, 2006, 30(8): 21-26.

[3] 李建林, 许鸿雁, 梁亮, 等. VSCF-DFIG 在电压瞬间跌落情况下的应对策略[J]. 电力系统自动化, 2006, 30(19): 65-68.

LI Jian-lin, XU Hong-yan, LIANG Liang, et al. Strategy to cope with the VSCF-DFIG during voltage dip[J]. Automation of Electric Power Systems, 2006, 30(19): 65-68.

[4] 王伟, 孙明冬, 朱晓东. 双馈式风力发电机低电压穿越技术分析[J]. 电力系统自动化, 2007, 31(23): 84-89.

WANG Wei, SUN Ming-dong, ZHU Xiao-dong. Analysis on the low voltage ride through technology of DFIG[J]. Automation of Electric Power Systems, 2007, 31(23): 84-89.

[5] 姚骏, 廖勇, 唐建平. 电网短路故障时交流励磁风力发电机不脱网运行的励磁控制策略[J]. 中国电机工程学报, 2007, 27(30): 64-71.

YAO Jun, LIAO Yong, TANG Jian-ping. Ride through control strategy of AC excited wind-power generator for grid short-circuit fault[J]. Proceedings of the CSEE, 2007, 27(30): 64-71.

[6] 尹明, 李庚银, 张建成, 等. 直驱式永磁同步风力发电机组建模及其控制策略[J]. 电网技术, 2007, 31(15): 61-65.

YIN Ming, LI Geng-yin, ZHANG Jian-cheng, et al. Modeling and control strategies of directly driven wind turbine with permanent magnet synchronous generator[J]. Power System Technology, 2007, 31(15): 61-65.

[7] 姚骏, 廖勇, 瞿兴鸿, 等. 直驱永磁同步风力发电机的最佳风能跟踪控制[J]. 电网技术, 2008, 32(10): 11-15.

YAO Jun, LIAO Yong, QU Xing-hong, et al. Optimal wind-energy tracking control of direct driven permanent magnet synchronous generators for wind turbines[J]. Power System Technology, 2008, 32(10): 11-15.

[8] 胡书举, 李建林, 许洪华. 永磁直驱风电系统低电压运行特性的分析[J]. 电力系统自动化, 2007, 31(17): 73-77.

- HU Shu-ju, LI Jian-lin, XU Hong-hua. Analysis on the low-voltage-ride-through capability of direct-drive permanent magnetic generator wind turbines[J]. Automation of Electric Power Systems, 2007, 31 (17): 73-77.
- [9] Verkrijging, Fokkema J T. Wind power modeling and impact on power system dynamics[D]. 2003.
- [10] Verkrijging, Fokkema J T. Wind power modeling and impact on power system dynamics[D]. 2003.
- [11] 刘其辉, 贺益康, 赵仁德. 变速恒频风力发电系统最大风能追踪控制[J]. 电力系统自动化, 2003, 27 (20): 62-67.
LIU Qi-hui, HE Yi-kang, ZHAO Ren-de. The maximal wind energy tracing control of a variable-speed constant-frequency wind-power generation system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2003, 27 (20): 62-67.
- [12] 严干贵, 魏治成, 穆钢, 等. 直驱永磁同步风电机组的动态建模与运行控制[J]. 电力系统及其自动化学报, 2009, 21 (6): 34-39.
YAN Gan-gui, WEI Zhi-cheng, MU Gang, et al. Dynamic modeling and control of directly-driven permanent magnet synchronous generator wind turbine [J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2009, 21(6): 34-39.
- [13] 徐科, 胡敏强, 郑建勇, 等. 风力发电机无速度传感器网侧功率直接控制[J]. 电力系统自动化, 2006, 30 (23): 43-47.
XU Ke, HU Min-qiang, ZHENG Jian-yong, et al. Direct-control grid-connected power with none direct speed measurement of direct-drive wind generator[J]. Automation of Electric Power Systems, 2006, 30 (23): 43-47.
- [14] Slootweg J G, de haan S W H, Polinder H, et al. General model for representing variable speed wind turbines in power system dynamics simulations[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2003, 18 (1) .
- [15] Chinchilla M, Arnaltes S, Burgos J C. Control of permanent-magnet generators applied to variable-speed wind-energy systems connected to the grid[J]. IEEE Trans on Energy Conversion, 2006, 21 (1) : 130-135.
- [16] 迟永宁, 王伟胜, 刘燕华, 等. 大型风电场对电力系统暂态稳定性的影响[J]. 电力系统自动化, 2006, 30 (15): 10-14.
CHI Yong-ning, WANG Wei-sheng, LIU Yan-hua, et al. Impact of large scale wind far integration on power system transient stability[J]. Automation of Electric Power Systems, 2006, 30 (15): 10-14.
- [17] Hier S. Grid integration of wind energy conversion systems[M]. John Wiley and Sons, 1998.

收稿日期: 2010-04-06

作者简介:

蔺红 (1969-), 女, 副教授, 博士研究生, 研究方向为电力系统稳定与控制及风力发电技术; E-mail: Tseagle@163.com

晁勤 (1959-), 女, 教授, 博士生导师, 主要从事电力系统综合自动化及风力发电技术研究与教学工作。

(上接第 188 页 continued from page 188)

- [5] Wu R, Dewan S B, Slwmon G R. Analysis of a PWM AC to DC voltage source converter under the predicted current control with a fixed switching frequency[J]. IEEE Trans Ind Applicat, 1991, 27: 756-764.
- [6] Nambo H, Jinhwan J, Kwanghee N. A fast dynamic DC-link power-balancing scheme for a PWM converter-inverter system[J]. IEEE Trans Ind Electron, 2001, 48 (4) : 794-803.
- [7] Jung J, Lim S K, Nam K. A feedback linearizing control scheme for a PWM converter-inverter having a very small DC-link capacitor[J]. IEEE Trans Ind Applicat, 1999, 35 (5) : 1124-1131.
- [8] 许凌峰, 吕跃刚, 徐太平. 变速恒频风机双 PWM 变换器协调控制策略研究[J]. 华北电力技术, 2008 (1) : 1-5.
XU Ling-feng, Lü Yue-gang, XU Da-ping. Coordinated control of dual PWM converters for variable-speed constant-frequency wind generation[J]. North China Electric Power, 2008 (1) : 1-5.
- [9] Estanqueiro ANA I. A dynamic wind generation model for power system studies[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2007, 22 (3) : 920-928.
- [10] Zhang Xianyong, Shu Jie, Wu Changhong. A novel maximum wind power capture strategy for the doubly-fed induction generator[C]. //Asia-Pac Power Energy Eng Conf. 2009.
- [11] Vladimir Blasko, Vikram Kaura. A new mathematical model and control of a three-phase AC-DC voltage source converter[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 1997, 12 (1) : 116-123.

收稿日期: 2010-04-16

作者简介:

张先勇 (1977-), 男, 副研究员, 主要研究领域为风能控制技术, 微电网控制技术研究。E-mail: zhangxy@ms.giec.ac.cn