

故障时双馈风力发电系统的控制策略研究

杨之俊, 吴红斌, 丁明, 刘静

(合肥工业大学电气与自动化工程学院, 安徽 合肥 230009)

摘要: 基于变速恒频双馈风力发电系统的有功、无功的解耦控制, 提出了电网故障时双馈电机的紧急控制策略, 在 Matlab/Simulink 里建立了模型, 并验证了故障控制策略的正确性。在常规情况下, 双馈电机转子侧的有功采用最大功率点跟踪控制, 无功采用额定功率因数控制, 可以获得最大的风能利用效率和较好的功率因数; 但若电网故障时仍采用此常规控制策略, 电网不但获取不到最大的风能利用效率和较好的功率因数, 而且电网的频率和电压波动影响较大。所以在故障期间把最大功率点跟踪控制和额定功率因数控制切换到频率控制和电压控制策略, 通过控制有功电流分量和无功电流分量来减小或者增加有功和无功的输出, 减小电网频率和电压的波动。建立了故障控制的模型, 针对系统单相接地故障和两相短路故障这两种短路故障类型进行了仿真, 仿真结果验证了故障控制策略的正确性, 提高了风力发电系统在故障时的稳定性。

关键词: 风力发电; 双馈; 电网故障; 控制策略

Control strategy of doubly-fed wind generation system for power grid fault

YANG Zhi-jun, WU Hong-bin, DING Ming, LIU Jing

(School of Electrical Engineering and Automation, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China)

Abstract: A fault control strategy of DFIG is proposed based on the active, reactive control of the decoupling for VSCF doubly-fed wind power generation system. The model is set up in MATLAB/SIMULINK. The simulation results verify the correctness of control strategy. In conventional case, the active of DFIG rotor side uses the MPPT control and the reactive uses the rated power factor control. It can get the largest wind energy utilization efficiency and better power factor, but it can't when power grid fault occurred. And the power grid voltage and frequency will fluctuate. So the MPPT control and the rated power factor control switch to frequency control and voltage control strategy when power grid fault occurred, by controlling the active current and reactive current component to reduce or increase active and reactive power output, to maintain the system frequency and voltage stability. The model of controlling under fault conditions is set up. The simulation is running in two conditions such as single-phase grounding and two-phase short-circuit. The results of simulation show the correctness of fault control strategy. The stability of wind power system is enhanced under fault conditions.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No.50607002 and No.50837001).

Key words: wind generation; doubly-fed; power grid fault; control strategy

中图分类号: TM614 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2010)01-0014-05

0 引言

在世界能源日益紧张的情况下, 可再生能源的利用就显得极为重要, 风力发电就是可再生能源的一种, 而且发电技术日渐成熟。变速恒频双馈风力发电可以大大提高能量转换效率, 降低原动机承受的机械应力, 而且还能实现有功、无功功率的解耦控制, 提高电力系统的调节能力及稳定性^[1], 因此双馈风力发电是风力发电最主要的发电方式之一,

其规模庞大, 控制复杂。

在常规控制下, 双馈电机一般采用最大功率点跟踪控制(MPPT)和额定功率因数控制, 稳态情况下, 使双馈电机能获取最大的风能利用效率, 电网获取最大的有功, 同时额定功率因数控制也可以使电网得到较好的功率因数。然而, 在故障运行情况下, 若仍保持常规控制策略, 双馈电机继续追踪最大功率点, 但由于网络传输已经发生故障, 电网不能完全吸收双馈电机所发出的有功, 同时电网可能还需要吸收一部分无功来维持电压的稳定。因此, 有必要研究故障情况下的紧急控制策略。

风力发电并网后在故障期间的稳定性问题, 文

基金项目: 国家自然科学基金项目(50607002, 50837001); 国家863计划(2007AA05Z240); 教育部科学技术研究重大项目(306004)

献[2-5]已经有相关研究。文献[2]分析比较了在同一接入点接入双馈风电机组和同步发电机组在系统发生三相短路故障时对电力系统稳定性的影响, 仿真结果证明双馈风电机组好于同步发电机组。文献[3]利用Simulink建立了变速恒频风力发电系统模型, 同时把并网前和并网后的控制策略分开建模, 讨论了风电并网的暂态控制过程。文献[4]利用附加频率控制对有功参考值进行修正, 证明了通过增加附加频率控制可以在一定程度上调整故障时的系统频率。文献[5]通过限制电网故障时定子电流工频分量, 抑制转子出现过电流来保护转子励磁变频器, 实现故障期间的风力发电机的不脱网安全运行。

本文对交流励磁变速恒频风力发电系统的原理进行了分析, 通过控制双馈电机发出有功和无功的变化来维持电网的稳定, 针对电网传输线路发生短路故障时的暂态情况, 提出了电压控制策略和频率控制策略, 并在 Simulink7.1 里建立了故障控制的模型, 仿真结果证明了所提出的控制策略的正确性, 提高了风力发电系统在故障时的稳定性。

1 变速恒频双馈风力发电系统

1.1 变速恒频运行的工作原理

变速恒频风力发电系统主要由风力机、齿轮箱、双馈电机、双 PWM 变频器等构成。其结构和功率流动见图 1。

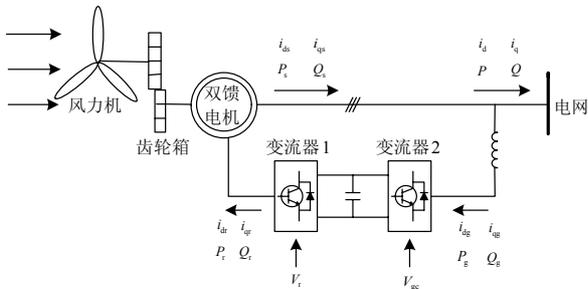


图1 风力发电系统的结构和功率流动图

Fig.1 Structure and power flow of wind generation

如图1所示, 双馈电机的转子通过双PWM变频器与电网相连, 这样转子侧既可以输入电能也可以输出电能, 从而能够保证双馈电机的变速恒频运行。图1中, d、q 表示传统dq轴分量, P、Q、I 分别表示有功功率、无功功率、电流, 下标s、r、g分别表示定子侧、转子侧和电网侧分量。

由交流异步发电机的基本原理可得下列关系:

$$f_s = p \frac{n}{60} \pm f_r \quad (1)$$

式中: f_s 为定子电流频率, Hz; n 为转子转速, r/min;

p 为电机的极对数; f_r 为转子电流频率, Hz。

由式(1)可知, 当转速 n 变化时, 若调节 f_r 相应变化, 即可保持 f_s 恒定不变, 与电网频率保持一致, 实现变速恒频控制。当风力发电机处于亚同步运行时, f_r 取正号, 变频器向转子提供交流励磁; 当风力发电机处于超同步运行时, f_r 取负号, 转子通过变频器向电网提供电能; 当风力发电机处于同步运行时, $f_r=0$, 变频器向转子提供直流励磁。

1.2 双馈电机的数学模型

DFIG 的建模是一个热门的话题^[6-8], 按照发电机传统惯例的 dq 坐标, 把 d 轴定义在定子磁场上, 如图 2 所示。

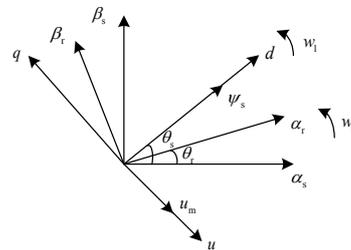


图2 定子磁场定向示意图

Fig.2 Sketch of vectors of stator magnetic-field

图2中, α_s 、 β_s 为定子上静止两相坐标轴, α_s 与定子a相轴线重合, α_r 、 β_r 为转子两相坐标轴, 以转子电角速度 w_r 相对定子旋转, α_r 与转子 a 相轴线重合, θ_s 、 θ_r 为定子、转子两相坐标轴的电角位移, ψ_s 为定子磁链幅值, u 为定子三相电压综合矢量。dq坐标下的发电机的数学模型为:

$$\begin{aligned} u_{ds} &= -r_s i_{ds} + w_1 \psi_{qs} - \dot{\psi}_{ds} \\ u_{qs} &= -r_s i_{qs} - w_1 \psi_{ds} - \dot{\psi}_{qs} \\ u_{dr} &= r_r i_{dr} - w_s \psi_{qr} + \dot{\psi}_{dr} \\ u_{qr} &= r_r i_{qr} + w_s \psi_{dr} + \dot{\psi}_{qr} \end{aligned} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} \psi_{ds} &= l_s i_{ds} - l_m i_{dr} \\ \psi_{qs} &= l_s i_{qs} - l_m i_{qr} \\ \psi_{dr} &= -l_m i_{ds} + l_r i_{dr} \\ \psi_{qr} &= -l_m i_{qs} + l_r i_{qr} \end{aligned}$$

$$T_e = \frac{3}{2} p l_m (i_{ds} i_{qr} - i_{qs} i_{dr})$$

式中: d、q 分别表示d、q轴分量, 下标s、r 分别表示定子和转子分量, 下标m 表示定转子间相互作用量, p 为电机的极对数, r 、 l 分别为电阻、电感; w_1 为定子同步电角速度; w_s 为转差电角速度, $w_s = w_1 - w_r = s w_1$; w_r 为转子电角速度, s 为转差率。

工频下，定子电阻 r_s 可忽略不计，根据式 (2) 可推导出定子磁场定向方式下的双馈电机输出有功功率与无功功率的表达式可得：

$$\begin{cases} P_s = -\frac{3}{2} u_m I_m i_{qr} / I_s \\ Q_s = -\frac{3}{2} u_m \left(\frac{u_m}{\omega_s} + I_m i_{dr} \right) / I_s \end{cases} \quad (3)$$

由式 (3) 可以看出，在定子磁场定向方式下，转子电流分量 i_{qr} 、 i_{dr} 可以分别控制定子绕组的有功和无功， i_{qr} 和 i_{dr} 之间不存在耦合关系，因此调节 i_{qr} 不会影响无功，调节 i_{dr} 不会影响有功，这样就实现了对定子绕组的有功、无功解耦控制。

1.3 DFIG的常规控制策略

1.3.1 转子侧变流器控制系统设计

双馈异步发电机一般都采用电压源型变流器，所以控制系统的控制作用需要通过作用在变流器上的电压向量来控制，这就需要建立转子电流向量和转子电压向量的之间的关系，如图 3 所示。

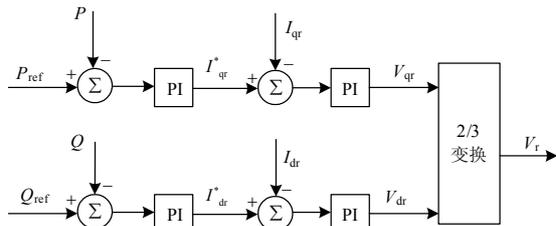


图3 转子侧变流器控制系统

Fig.3 Control system of rotor-side converter

图3是转子侧变流器控制图，即一般情况下采用的直接功率控制^[9] (DPC)， P_{ref} 可以根据最大功率点追踪来求出， Q_{ref} 可以根据额定功率因数来求出： $Q_{ref} = P_{ref} \tan \varphi$ ，理想状态下取功角为0，即令 $Q_{ref} = 0$ 。

1.3.2 电网侧变流器控制系统设计

采用直流电压参考控制，同时把 I_{qg}^* 设为0值，即可满足控制要求，控制框图见图4。

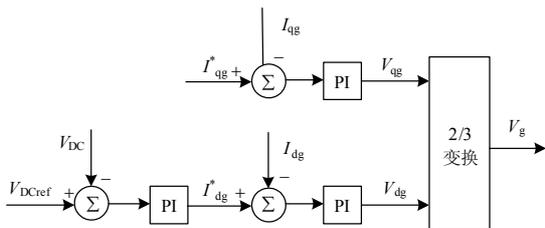


图4 电网侧变流器控制系统

Fig.4 Control system of grid-side converter

2 故障控制策略

电网故障时，双馈电机发出的功率不能全部有效地传输给电网，电网部分电压和频率将发生波动，如果仍采取常规控制策略，电压和频率波动将会很大。故障控制策略主要是通过对转子侧变流器的控制调整有功、无功的输出，来维持系统频率和电压的稳定。由于故障是一个瞬间的过程，如果考虑风力发电机的不脱网运行，可以在故障期间把最大功率点追踪和额定功率因数控制切换到频率和电压控制策略，通过控制有功电流分量 i_{qr}^* 和无功电流分量 i_{dr}^* 来减小或者增加风力发电系统的有功和无功输出，从而减弱电网的频率和电压振荡，维持系统频率和电压的稳定，控制切换见图 5。

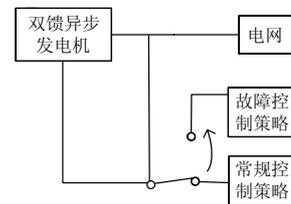


图5 控制切换图

Fig.5 Control switch diagram

2.1 频率控制

DFIG工作在超同步运行状态时，DFIG转子中储存了大量的旋转动能，由于转子转速是受转子侧变流器控制的，仅靠定转子之间的弱电磁耦合无法使这部分动能在系统频率降低时释放出来；相反，DFIG工作在亚同步运行状态时，如果仅靠定转子之间的耦合关系，转子吸收的电磁功率较少，对系统频率升高的抑制作用不明显。

双馈变速风电机组对有功和无功的解耦控制使得转速不能有效跟随系统频率^[10]，因此，当系统检测到非正常频率时，把最大功率点追踪控制切换到频率控制，使得风电机组短时增加或者减小输出功率：频率降低时，双馈变速风电机组通过转子侧变流器降低转子转速释放出部分旋转动能输入系统；频率升高时，双馈变速风电机组通过转子侧变流器提高转子转速吸收部分电磁功率用于增加转速，储存部分动能。故障切除后，频率检测到正常频率时又切换到最大功率点追踪控制，具体控制和切换见图 6。

电网线路发生故障时，DFIG突然掉负荷，有功不平衡，频率升高，当检测到系统频率升高时，转子侧的最大功率点追踪控制切换到频率控制，转子侧变流器控制转子提高转速吸收部分电磁功率，储

存部分动能, 减小有功输出, 抑制频率升高。在频率控制环中, 额定频率指令 f_{grid}^* 与电网频率反馈值 f_{grid} 进行比较, 差值经PI型频率调节器运算, 输出转子电流有功分量 i_{qr}^* , i_{qr}^* 和转子电流反馈量进行比较后的差值再送入PI型电流调节器, 输出转子电压指令 V_{qr} 。

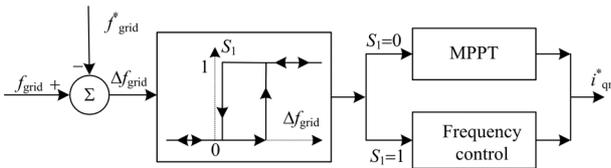


图6 故障期间DFIG的频率控制

Fig.6 DFIG frequency control during fault

2.2 电压控制

电压波动主要与无功变化以及电网的短路容量有关。在电网短路容量一定的情况下, 电压变动主要是由于无功负荷的剧烈变动所致, 因此在短路故障时, 如果DFIG能够迅速对无功进行补偿, 那将会维持系统电压的稳定。所以在系统发生故障时把额定功率因数控制切换到电压控制策略来控制PWM变流器, 利用实时电压与参考电压的差值通过比例积分器求出 i_{dr}^* , 触发DFIG发出无功, 维持电压的稳定, 具体控制和切换见图7。

电网线路发生故障时, 电压突然下跌, 当检测到电压下跌时, 转子侧额定功率因数控制切换到电压控制, 通过触发无功电流的增加, 使 DFIG 发出无功, 维持系统电压。故障切除后, 检测到电压恢复正常时重新切换到额定功率因数控制。电压控制环原理基本与频率控制环相同, 额定电压指令 V_{grid}^* 与电网电压反馈值 V_{grid} 进行比较, 差值经 PI 型电压调节器运算, 输出转子电流无功分量 i_{dr}^* , i_{dr}^* 和转子电流反馈量进行比较后的差值再送入 PI 型电流调节器, 输出转子电压指令 V_{dr} 。

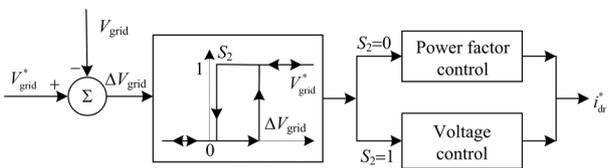


图7 故障期间DFIG的电压控制

Fig.7 DFIG voltage control during fault

3 算例及其分析

3.1 仿真系统

为验证所提控制策略的有效性, 本文利用

Simulink7.1 为仿真平台, 在稳态时采用直接功率控制, 有功参考值采取最大功率点追踪, 功率因数取 1 稳定运行。短路故障时, 最大功率点追踪控制切换到频率控制, 额定功率因数控制切换到电压控制, 双馈电机通过减小或者增加有功、无功的输出, 减小系统电压和频率在故障时的波动, 避免系统振荡, 使系统电压和频率趋于稳定。

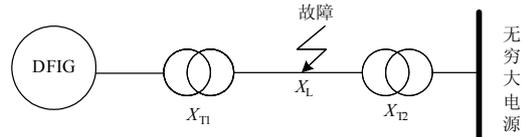


图8 系统仿真示意图

Fig.8 Diagram of system simulation

图8为系统示意图, 双馈风力发电机额定功率为 9 MW (6×1.5 MW), T1、T2为两个升压变压器, 变比分别为575 V/25 kV、25 kV/120 kV, 都为 Δ/Y 接线。模型未设初始状态值, 0.4 s时系统趋于稳定, t=1.5 s时线路上发生短路故障, 故障持续时间为 0.15 s, 风速一直保持理想状态为恒速 10 m/s, 双馈电机发出有功4.95 MW, 双馈电机的参数见表1。

表1 双馈电机的仿真参数

Fig.1 Parameters of the simulated DFIG

参数	数值
定子电阻/pu	0.007 06
转子电阻/pu	0.005
定子漏感/pu	0.171
转子漏感/pu	0.156
互感/pu	2.9
转动惯量时间常数/s	5.04
极对数	3

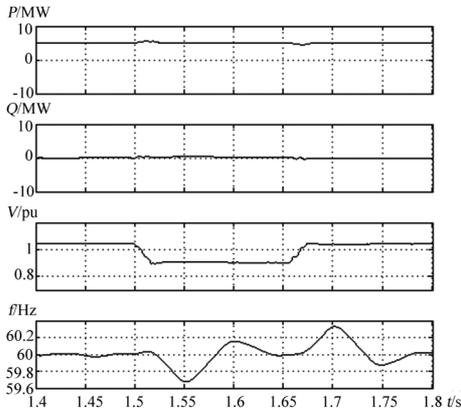
本文只仿真单相接地短路和两相短路故障。

3.2 单相接地短路故障分析

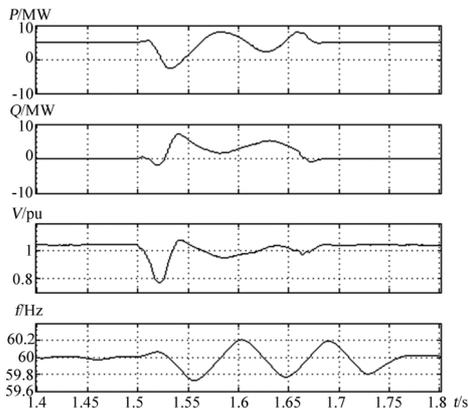
图9为系统发生单相接地故障时的仿真结果图, P、Q为DFIG发出的有功功率和无功功率, V、f为系统的电压和频率。图9(a)为未考虑故障控制措施的仿真结果, 图9(b)为考虑故障控制措施的仿真结果。

从图中可以看出, 加了故障控制措施以后, 风力发电机的输出有功和无功将相对于不加故障控制时波动较大, 控制系统通过改变有功无功的值来维持系统频率和电压的稳定。而在未加故障控制措施情况下, 由于要维持双馈电机输出的有功和无功不变, 此时系统电压跌落到0.9, 且一直持续到故障切除, 电压才能恢复正常, 频率在59.65~60.3 Hz之间振荡; 加故障控制后, 电压跌落后瞬间又恢复到1.0左右, 频率在59.75~60.2 Hz之间振荡。如果系统加

上低电压保护,那么在未加故障控制的系统里,风力发电机由于在故障期间电压跌落较多且持续时间较长,将有可能被从系统中切除。



(a) 未考虑故障控制措施的仿真结果



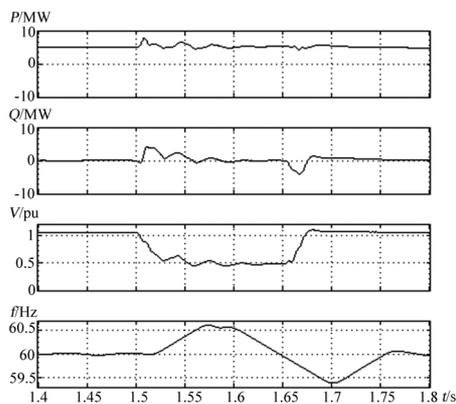
(b) 考虑故障控制措施的仿真结果

图9 单相接地故障时的仿真结果图

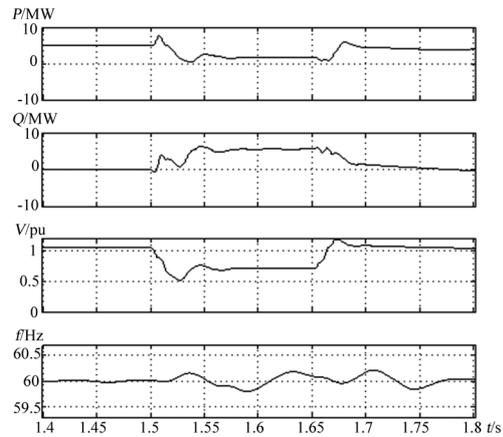
Fig.9 Simulation results when single-phase grounding

3.3 两相短路故障分析

图10为系统发生两相短路故障时的仿真结果图, P 、 Q 为DFIG发出的有功功率和无功功率, V 、 f 为系统的电压和频率。图a为未考虑故障控制措施的仿真结果, 图b为考虑故障控制措施的仿真结果。



(a) 未考虑故障控制措施的仿真结果



(b) 考虑故障控制措施的仿真结果

图10 两相短路故障时的仿真结果图

Fig.10 Simulation results when two-phase short-circuit

两相短路时,系统短路容量较大,加故障控制后效果会更加明显,从图10可以看出,双馈电机通过储存部分能量来减小有功输出,同时发出无功来维持系统电压和频率的稳定。未加故障控制,系统电压跌到0.5,且一直持续到故障切除,频率在59.4~60.6 Hz之间振荡;加上故障控制后,电压跌到0.7,瞬间恢复到0.7,频率在59.8~60.2 Hz之间振荡,明显好于未加故障控制。

4 结论

电力系统在发生故障期间,电压和频率会发生振荡,因此为了维持系统电压和频率的稳定,本文提出了故障控制策略:电压控制和频率控制。本文在 Simulink7.1 里建立了电压控制和频率控制模型,常规情况下,采用最大功率点追踪控制和额定功率因数控制,系统发生故障时切换到电压控制和频率控制。就本文的控制策略来说,由于两相短路容量较大,两相短路故障时,控制策略明显要比单相接地短路时好,仿真结果证明了所提出策略的正确性,提高了双馈风力发电系统在故障期间的稳定性。

参考文献

[1] 刘其辉, 贺益康, 张建华. 交流励磁变速恒频风力发电机的运行控制及建模仿真[J]. 中国电机工程学报, 2006, 26(5): 43-50.

LIU Qi-hui, HE Yi-kang, ZHANG Jian-hua. Operation Control and Modeling-Simulation of AC-excited Variable-speed Constant-frequency Wind Power Generator[J]. Proceedings of the CSEE, 2006, 3(5): 43-50.

(下转第 36 页 continued on page 36)

- Sequence Transient Reactive Power for a Single-phase-earth Feeder on non-solid Distribution[J]. Power System Protection and Control, 2007, 35(S1):59-62.
- [7] 陈炯聪, 齐郑, 杨奇逊, 基于模糊理论的小电流单相接地选线装置[J]. 电力系统自动化, 2004, 28(8):88-91. CHEN Jiong-cong, QI Zheng, YANG QI-xun. A Fault Line Detection Device for the Non-solidly Grounded System Based on Fuzzy Sets Theory[J]. Automation of Electric Power Systems, 2004,28(8):88-91.
- [8] Barnett J A. Computational Method for a Mathematical Theory of Evidence[A]. in: Proceedings of the 7th International Joint Conference on Artificial Intelligence[C]. 1981. 868-875.
- [9] 齐郑. 小电流接地系统单相接地故障选线与定位技术的研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2005. QI Zheng. Research on Technology of Line Detection and Fault Location for Single-phase-to-earth Fault in Neutral Point Non-effectively Grounded Systems[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2005
- [10] 齐郑, 陈炯聪, 杨奇逊. 基于小波变换和LMS自适应滤波器的单相接地选线方法[J]. 电力系统自动化, 2004, 28(9):58-61. QI Zheng, CHEN Jiong-cong, YANG Qi-xun. Selection of Single-phase to Ground Fault Line Based on Wavelet Transform And LMS Adaptive Filter [J]. Automation of Electric Power Systems, 2004,28(9):58-61
- [11] 连鸿波. 谐振接地电网单相接地故障消弧及选线技术一体化研究[D]. 保定: 华北电力大学, 2003. LIAN Hong-bo. Research on Integration Control System in Arc-suppressing and Fault-Line Selection of Single Phase-to-ground Fault in Resonant Grounded Systems[D]. Baoding: North China Electric Power University, 2003.

收稿日期: 2009-03-12; 修回日期: 2009-04-02

作者简介:

齐郑(1977-), 男, 博士, 讲师, 研究方向为电力系统分析与控制;

高玉华(1982-), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为电力系统分析与控制; E-mail: gyh_z@163.com

孙海新(1971-), 男, 研究方向为电力调度自动化。

(上接第 18 页 continued from page 18)

- [2] 迟永宁, 王伟胜, 刘燕华. 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. Impact of Large Scale Wind Farm Integration on Power System Transient Stability[J]. Automation of Electric Power Systems, 2006, 30(15): 10-14.
- [3] 卞松江, 吕晓美, 相会杰, 等. 交流励磁变速恒频风力发电系统控制策略的仿真研究[J]. 中国电机工程学报. 2005, 25(16):57-62. BIAN Song-jiang, LU Xiao-mei, XIANG Hui-jie, et al. Modeling and Simulation of AC-Excited VSCF in Wind Power Systems[J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(16):57-62.
- [4] 关宏亮, 迟永宁, 王伟胜. 双馈变速风电机频率控制的仿真研究[J]. 电力系统自动化, 2007, 31(7):61-65. GUANG Hong-liang, CHI Yong-ning, WANG Wei-sheng. Simulation on Frequency Control of Doubly Fed Induction Generator Based Wind Turbine[J]. Automation of Electric Power Systems, 2007, 31(7): 61-65.
- [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. 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] Pablo Ledesma, Julio Usaola. Doubly Fed Induction Generator Model for Transient Stability Analysis[J]. IEEE Trans on Energy Conversion, 2005, 2(20):388-397.
- [7] LEI Ya-zhou, Mullane Alan, Lightbody Gordon, et al. Modeling of the Wind Turbine With a Doubly Fed Induction Generator for Grid Integration Studies[J]. IEEE Trans on Energy Conversion, 2006, 21(1).
- [8] WU Feng, ZHANG Xiao-Ping, Keith Godfrey, et al. Modeling and Control of Wind Turbine with Doubly Fed Induction Generator[J]. 2006.
- [9] XU Lie, Cartwright Phillip. Direct Active and Reactive Power Control of DFIG for Wind Energy Generation[J]. IEEE Trans on Energy Conversion, 2006, 21(3):750-758.
- [10] Yakej E K, Jenkin S N. Comparison of the Response of Doubly Fed and Fixed-speed Induction Generator Wind Turbines to Changes in Network Frequency[J]. IEEE Trans on Energy Conversion, 2004, 19(4): 800-802.

收稿日期: 2009-01-04; 修回日期: 2009-03-16

作者简介:

杨之俊(1983-), 男, 硕士研究生, 研究方向为新能源与分布式发电技术; E-mail: hfyzj1981@163.com

吴红斌(1972-), 男, 博士, 副教授, 目前主要从事分布式发电、电力系统安全性分析的研究和教学工作。