

大型双馈式变速恒频发电机组对电网影响仿真分析

樊艳芳¹, 晁勤¹, 高瑜²

(1. 新疆大学电气工程学院, 新疆 乌鲁木齐 830008; 2. 中国水电工程顾问集团公司, 北京 100011)

摘要: 建立了基于电机矢量控制原理的双馈式变速恒频风力发电机组的动态数学模型, 在 Matlab/Simulink 环境搭建了系统仿真模型, 对大型双馈式变速恒频风力发电机组并网后对电力网络的影响进行了仿真分析。仿真结果表明并网运行的双馈式变速恒频发电机组动态性能良好, 变速平稳, 能够有效控制机端电压, 对电网故障恢复起到一定的作用。

关键词: 风力发电; 双馈式变速恒频风力发电机组; 仿真

Simulation of influence of large double-fed variable speed wind turbine into grid

FAN Yan-fang¹, CHAO Qin¹, GAO Yu²

(1. College of Electrical Engineering, Xinjiang University, Urumchi 830008, China;

2. China Hydropower Engineering Consulting Corporation, Beijing 100011, China)

Abstract: Applying vector control principle of induction motor, a dynamic model for double-fed variable speed wind turbine (VSWT) is presented. Based on the models, by using of Matlab/Simulink tools to simulate the whole system, this paper reveals VSWT's influence to the power system. The results show VSWT has good running characteristics. The speed of VSWT is adjusted smoothly. The VSWT can also maintain the voltage and act on the fault restore of the power system to a certain extent.

This project is supported by National Natural Science Foundation of China(No.50667002).

Key words: wind power; double-fed VSWT; simulation

中图分类号: TM71 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2008)16-0030-03

0 引言

近几年风电已经成为一个极具潜力并迅速成长的产业, 风力发电技术也将进入快速发展的黄金时期。目前国际风电市场的一个显著特点就是风力发电机组的单机容量在不断扩大, 技术发展趋势表明: 原来市场上占主导地位的失速型、变桨距机型已经被双馈式变速恒频和直驱式机型所替代。基于双馈感应发电机的变速恒频风电机组具有调节发电机转速和无功功率等优点, 但对电力系统而言, 采用大型风电机组的风电场仍然是不稳定的间歇性电源。随着风电场规模的日益扩大, 且多数风电场位于电网结构较薄弱环节, 风电对电力系统动态稳定的影响已日益显著, 研究分析大型双馈式变速恒频发电机组并网后对电力网络的影响, 为进一步寻求抑制其对电网产生的消极影响的措施具有实际意义。

本文建立基于电机矢量控制原理的双馈式变速恒频风力发电机组的动态数学模型, 在 Matlab/

Simulink 环境搭建了系统仿真模型。分别对风速变化和电网故障情况下, MW 级双馈式变速恒频发电机组并网对电力网络的影响进行了仿真分析。

1 双馈式变速恒频发电机组动态数学模型

1.1 风力机及传动部分数学模型

风力机功率特性方程:

$$P_T = C_P A \frac{\rho v^3 \times 10^3}{2P_N} \quad (1)$$

式中: P_T 为风力机机械功率; C_P 为风能转换效率系数, 它是桨距角 β 和叶尖速率比 λ ($\lambda = R\omega/v$) 的函数; R 为叶片半径; ω 为风力机叶片转速; v 为风速; A 为叶片扫掠面积; ρ 为空气密度; P_N 为功率基值。

从轮毂到发电机转子之间的机械传动部分, 近似用一阶惯性环节来描述:

$$\frac{dT_m}{dt} = \frac{1}{T_d} (T_M - T_m) \quad (2)$$

式中: T_d 为机械传动部分的时间常数; T_m 为发电机

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50667002); 新疆大学学院联合基金项目(070201)

转子轴上的机械转矩; T_M 为风力机末端轴上的机械转矩, $T_M = P_T / \omega$ 。

1.2 变桨距控制系统数学模型

$$\frac{d\beta}{dt} = \frac{1}{T_\beta}(\beta_0 - \beta) \quad (3)$$

式中: β 为桨距角; T_β 为桨距控制系统的时间常数。

1.3 双馈异步发电机数学模型

按照发电机惯例, 建立以同步转速旋转的 d、q、o 坐标系中双馈式异步发电机的数学模型:

$$\begin{cases} u_{ds} = R_s i_{ds} + \frac{d\psi_{ds}}{dt} - \omega_s \psi_{qs} \\ u_{qs} = R_s i_{qs} + \frac{d\psi_{qs}}{dt} + \omega_s \psi_{ds} \\ u_{dr} = R_r i_{dr} + \frac{d\psi_{dr}}{dt} - (\omega_s - \omega_r) \psi_{qr} \\ u_{qr} = R_r i_{qr} + \frac{d\psi_{qr}}{dt} + (\omega_s - \omega_r) \psi_{dr} \end{cases} \quad (4)$$

$$\begin{cases} \psi_{ds} = (L_{sk} + L_m) i_{ds} + L_m i_{dr} \\ \psi_{qs} = (L_{sk} + L_m) i_{qs} + L_m i_{qr} \\ \psi_{dr} = (L_{rk} + L_m) i_{dr} + L_m i_{ds} \\ \psi_{qr} = (L_{rk} + L_m) i_{qr} + L_m i_{qs} \end{cases} \quad (5)$$

式中: u 、 i 、 ψ 分别为发电机电压、电流和磁链; 下标 d、q 分别表示发电机直轴、交轴分量; 下标 s、r 分别表示定子和转子; R 为电阻; L_k 、 L_m 为定转子漏感和互感。

双馈电机转子运动方程:

$$\frac{ds}{dt} = \frac{1}{T_J} [T_e - T_m + D(1-s)] \quad (6)$$

式中: s 为转差率; T_J 为惯性时间常数; D 为阻尼系数; T_e 为发电机电磁转矩, $T_e = \frac{3}{2} n_p L_m (i_{qs} i_{dr} - i_{ds} i_{qr})$; n_p 为极对数。

1.4 控制系统模型

转子侧变流器控制系统是通过转子电压向量在 d、q 轴上的分量解耦控制双馈电机定子绕组的有功功率和无功功率, 其控制方程为:

$$\begin{cases} P_s = -\frac{3}{2} U_s \frac{L_m}{L_s} i_{qr} \\ Q_s = \frac{3}{2} \left(\frac{U_s^2}{\omega_s L_s} - \frac{U_s L_m i_{dr}}{L_s} \right) \end{cases} \quad (7)$$

$$\begin{cases} u_{dr} = R_r i_{dr} + \sigma L_r \frac{di_{dr}}{dt} - (\omega_s - \omega_r) \sigma L_r i_{qr} \\ u_{qr} = R_r i_{qr} + \sigma L_r \frac{di_{qr}}{dt} + (\omega_s - \omega_r) \left(\frac{L_m \psi_{ds}}{L_s} + \sigma L_r i_{dr} \right) \end{cases} \quad (8)$$

式中: $\sigma = 1 - L_m^2 / L_s L_r$ 。

电网侧变流器控制系统通过电网侧变流器电

压向量在 d、q 轴上的的分量控制直流电压:

$$C \frac{du_{dc}}{dt} = \frac{3}{4\sqrt{2}} m i_{gd} - i_{dcr} \quad (9)$$

$$\begin{cases} u_{gd} = u_{gcd} + R_g i_{gd} + L_g \frac{di_{gd}}{dt} - \omega_s L_g i_{gq} \\ u_{gq} = u_{gcq} + R_g i_{gq} + L_g \frac{di_{gq}}{dt} - \omega_s L_g i_{gd} \end{cases} \quad (10)$$

2 双馈式风力发电机组并网运行仿真分析

图1为一台 1.5 MW 双馈式变速恒频风力发电机组通过变压器和线路连接到无穷大电力系统的接线图。1.5 MW 双馈发电机组的参数: 风力机桨叶半径 25 m; 发电机转子电阻 0.0073 pu; 定子电阻 0.0076 pu; 定子漏抗 0.124 pu; 转子漏抗 0.088 pu; 激磁电抗 1.836 pu; 发电机转动部分惯性时间常数 7 s; 机械传动部分时间常数 0.5 s; 极对数 3。在 Matlab/Simulink 平台搭建仿真模型如图 2 所示。

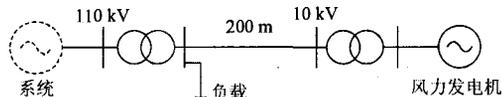


图1 简化系统结构图

Fig.1 Simple circuit diagram

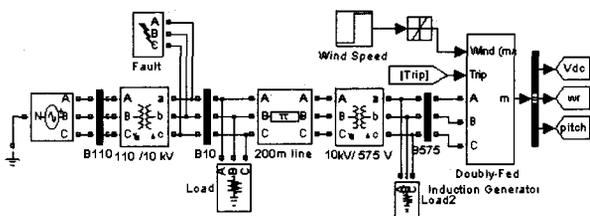


图2 双馈风力发电机组并网运行仿真模型

Fig.2 Simulation diagram of double-fed wind turbine

linked on the net

2.1 风速变化时的仿真分析

在图2所示的仿真模块中, 将初始风速设置为 11 m/s, 在 5 s 时刻风速经 3 s 渐变为 14 m/s, 在这种情况下监测双馈风力发电机组机端电压、有功功率、无功功率、直流电压、转速、桨距角的变化, 仿真结果如图3所示。

由图3可见, 双馈式变速发电机组的转速随风速变化由 1.1 pu 增大为 1.2 pu, 发出的有功功率随风速变化保持平稳增长, 用了差不多 7 s 的时间达到了额定功率 1.5 MW, 机组发出的无功功率由 0.035 Mvar 减小为 0.025 Mvar, 机端电压维持电压在 1.0 pu 附近。由此可见, 双馈风力发电机组在风速出现较大变化时, 其输出的有功功率和无功功率都自动跟

随风速的变化进行调节,有功的调节使得变速风机可以实现最大风能捕获,无功的调节则保证了并网时机端电压能够保持在允许的波动范围之内。

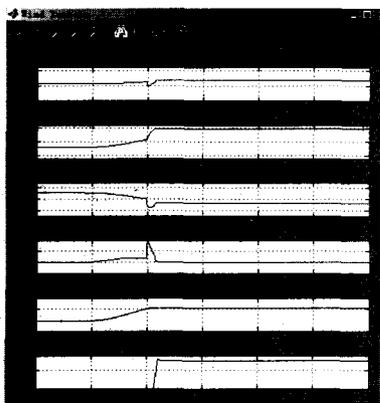


图3 风速变化时的风电机组响应

Fig.3 Turbine response to a change in wind speed

在风速变化过程中,电网电压和负荷消耗的功率几乎没有明显的变化(见图4所示)。可见单台MW级双馈式变速恒频风力发电机组并网运行对电网其它负荷的运行没有影响。

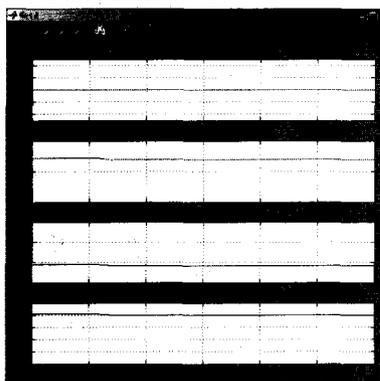


图4 风速变化时的电网响应

Fig.4 Network response to a change in wind speed

2.2 电网发生故障时的仿真分析

风速保持为12 m/s不变,设定故障为10 kV线路在5 s时发生的单相接地短路,故障持续时间为0.2 s,此时的仿真结果见图5、图6。

由图5、图6可见,在故障期间10 kV线路故障相电压降为0,风力发电机机端电压下降到0.92 pu,双馈风力发电机组发出的无功功率增加到0.35 Mvar,以保证机端电压不会下降到过低水平。故障切除后,双馈风力发电机组能很快的稳定下来,持续并网运行。可见双馈式变速恒频风力发电机组能够承受短时的电压降低而不退出运行,能够增大向系统输出无功功率,对系统电压的恢复提供一定的帮助。

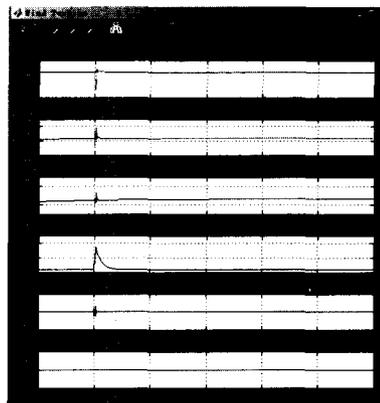


图5 电网发生故障时风力发电机组响应

Fig.5 Turbine response to a fault at bus B10

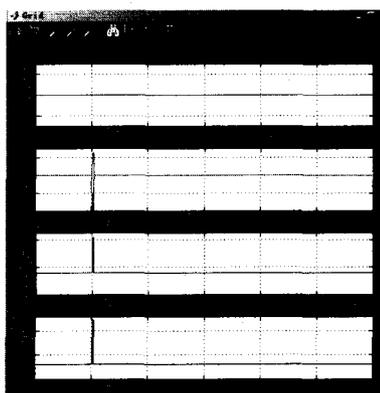


图6 电网发生故障时的电网响应

Fig.6 Network response to a fault at bus B10

3 结束语

从所得到的仿真结果来看,双馈式变速恒频发电机组具有良好的动态性能。与恒速风电机组相比,并网运行的双馈式变速恒频发电机组在最大限度地利用风能、提高机组运行效率的同时变速平稳,能够保持输出有功功率的平稳变化,对电网其它负荷的运行没有影响。在电网发生故障时,双馈式变速恒频发电机组能够有效控制机端电压,增大向电网输出的无功功率,对系统故障恢复起到一定的作用。

参考文献

- [1] 尹明,李庚银,周明,等.双馈感应风力发电机组动态模型的分析与比较[J].电力系统自动化,2006,30(13):22-27. YIN Ming, LI Geng-yin, ZHOU Ming, et al. Analysis and Comparison of Dynamic Models for the Doubly Fed Induction Generator Wind Turbine[J]. Automation of Electric Power Systems, 2006, 30(13): 22-27.

(下转第37页 continued on page 37)

方法。该方法可以从实际电网的非平稳信号中获取电能质量评估中瞬时电压闪变的严重程度的定量信息,对电压闪变的治理策略及装置研制起到一定的指导作用,具有一定的工程参考价值。

参考文献

- [1] 肖湘宁. 电能质量分析与控制[M]. 北京: 中国电力出版社, 2004.
XIAO Xiang-ning. Analysis and Control for Power Quality[M]. Beijing: China Electric Power Press, 2004.
- [2] 孙树勤. 电能质量技术丛书第四分册电压波动与闪变[M]. 北京: 中国电力出版社, 1999.
SUN Shu-qin. Voltage Fluctuation and Flicker, Volume 4, Power Quality Technical Series[M]. Beijing: China Electric Power Press, 1999.
- [3] Tayjasanant T, Wang W, Li C, et al. Interharmonics-flicker Curves[J]. IEEE Trans on Power Systems, 2003,20(2): 1017-1024.
- [4] Leonowicz Z, Lobos T, Rezmer J. Advanced Spectrum Estimation Method for Signal Analysis in Power Electronics[J]. IEEE Trans Ind Electron, 2003,50(3):1-6.
- [5] Feilat E A. Detection of Voltage Envelope Using Prony Analysis-Hilbert Transform Method[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 2006, 21(4): 2091-2093.
- [6] AL-Hasawi W M, ELNaggar K M. A Genetic Based Algorithm for Voltage Flicker Measurement[A]. In: IEEE/Melecon[C]. Cairo(Egypt): 2002. 600-604.
- [7] ZHAO Gang, SHI Wei, LIN Hai-xue. A Study on Calculation of Short Term Flicker Severity[J]. Power System Technology, 2001, 25(11): 15-18.
- [8] Abdel Galil T K, El Saadang E F, Salama M M A. Online Tracking of Voltage Flicker Utilizing Energy Operator and Hilbert Transform[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 2004, 19(2): 861-867.
- [9] 马玉龙, 刘连光, 张建华. IEC闪变测量原理的数字化实现[J]. 中国电机工程学报, 2001, 21(11): 92-95.
MA Yu-long, LIU Lian-guang, ZHANG Jian-hua. Research of Digital Flicker Meter Based on IEC Standard [J]. Proceedings of the CSEE, 2001, 21(11): 92-95.
- [10] 周兆经, 周文晖, 李青. 采用小波分解和同步检波的电压闪变信号检测新方法[J]. 电力系统及其自动化学报, 2001,13(6): 23-27.
ZHOU Zhao-jing, ZHOU Wen-hui, LI Qing. A New Method for the Detection of Voltage Flicker Using Wavelet Transform and Synchronous Detection[J]. Proceedings of the CSU-EPSSA, 2001,13(6): 23-27.
- [11] 王志群, 朱守真, 周双喜. Hilbert变换求取电压闪变有关参数[J]. 电力系统自动化, 2004, 28(5): 34-37, 66.
WANG Zhi-qun, ZHU Shou-zhen, ZHOU Shuang-xi. Parameter Estimation of Voltage Flicker Through Hilbert Transform[J]. Automation of Electric Power Systems, 2004, 28(5): 34-37, 66.
- [12] 胡广书. 数字信号处理——理论算法与实现[M]. 北京: 清华大学出版社, 1997
HU Guang-shu. Digital Signal Process—Theory, Algorithm and Realization[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 1997.

收稿日期: 2007-05-12; 修回日期: 2008-06-29

作者简介:

韩松(1978-), 男, 在读博士研究生, 讲师, 主要兴趣在于电力系统广域监测与稳定控制, 电能质量监测等; E-mail: ee.shan@gzu.edu.cn

邱国跃(1958-), 男, 副教授, 主要从事电力系统运行与控制方面的教学与研究管理工作;

彭小俊(1974-), 男, 硕士, 工程师, 主要从事电能质量监测与控制装置的调试和研究工作。

(上接第 32 页 continued from page 32)

- [2] 李东东, 陈陈. 风力发电机组动态模型研究[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(3): 115-119.
LI Dong-dong, CHEN Chen. A Study on Dynamic Models of Wind Turbine Generator Sets[J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(3): 115-119.
- [3] Vladislav, Akhmatov. Variable-Speed Wind Turbines with Doubly-Fed Induction Generators, Part I: Modelling in Dynamic Simulation Tools[J]. Wind Engineering, 2002, 26(2): 52-58.
- [4] 冯双磊, 赵海翔, 任普春. 基于 PSCAD / EMTDC 的双馈式变速恒频风电机组动态模型仿真[J]. 电网技术, 2007, 31(17): 30-35.

FENG Shuang-lei, ZHAO Hai-xiang, REN Pu-chun, et al. PSCAD/EMTDC Based Simulation Study on Dynamic Model of Doubly-Fed Variable Speed Wind Turbine [J]. Power System Technology, 2007, 31(17): 30-35.

收稿日期: 2008-03-29; 修回日期: 2008-05-06

作者简介:

樊艳芳(1971-), 女, 讲师, 主要从事风力发电及电力系统稳定性分析研究; E-mail: fyy_xj@sohu.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和并网风力发电系统稳定性等方面的研究。