

交流励磁双馈风力发电机组的稳定性仿真分析

闫广新, 吐尔逊, 晁勤

(新疆大学电气工程学院, 新疆 乌鲁木齐 830008)

摘要: 介绍了交流励磁变速恒频双馈风力发电机组的工作原理, 在坐标变换的技术下, 建立了交流励磁发电机在 $d-q-0$ 坐标系下的数学模型。在 Matlab 中搭建了系统仿真模块, 对交流励磁风力发电机组的稳定性做了仿真分析。仿真结果表明了所建模型的正确性, 以及在风力发电系统中利用变速恒频技术后可以大大提高风能的利用率, 改善了电力系统稳定性, 并且转子转速也可以改变, 使其具有独立的无功调节能力。研究结果表明了变速恒频双馈风力发电机组具有良好的动态特性, 并为风力发电系统的进一步应用研究提供了可靠的理论依据。

关键词: 风力发电; 变速恒频技术; 数学模型; 双馈发电机组; 系统稳定性

Analysis of simulation of stability of AC excited double-fed wind generator

YAN Guang-xin, TU Er-xun, CHAO Qin

(Electrical Engineering Institute, Xinjiang University, Urumqi 830008, China)

Abstract: The paper presents the principle of variable speed constant frequency (VSCF) AC excited wind power system. It also builds the $d-q$ coordinate system mathematic model of VSCF AC excited wind power generation system by the coordinate commutation technology, builds the simulink model by Matlab and analyses the stability of double-fed wind generator which is subjected to the interference. The simulation results show that the established model is correct and it can capture as much wind energy as possible, may improve the stability of electric power system, and its rotor speed may adjust and have ability for reactive power regulating in self-help ways. The conclusions provide that VSCF double-fed wind generator possesses good dynamic characteristics and has theoretical foundation for ulteriorly studying on wind power system.

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

Key words: wind power; variable-speed constant-frequency technology; mathematic model; double-fed wind generator; system stability

中图分类号: TM712 文献标识码: A 文章编号: 1003-4897(2007)14-0007-03

0 引言

风力发电机作为一种绿色能源在世界各地得到了大力的推广, 许多国家为鼓励风能的利用, 制定了相应的政策。我国的风力发电事业自从 1993 年电力部决定加快风力发电商业化进程以后发生了比较大的发展, 如新疆达坂城、内蒙古辉腾锡勒、广东南澳等地区已有、新建或准备扩建的风电场已经是较大的了, 另外目前我国还有一系列风电场项目正在建设中或已列入计划。在过去的 20 多年当中, 风力发电机组由最初的定桨距型发展到变桨距型, 从转速固定的变桨距型发展到目前技术最为先进的变速变桨距型, 发电效率在显著提高。特别是变速

变桨距机组, 其发电机中采用的变速恒频技术提高了风力发电机组在低风速情况下的出力水平^[1]。近年来, 随着交流调速技术的日趋成熟, 双馈异步绕线电机开始成为风力发电机的主要选择方向。本文根据变速恒频风力发电机组的特性, 建立了能表征变速恒频风力发电机组特性的动态数学模型, 并且在 Matlab 搭建了仿真模块, 仿真分析了双馈风力发电机在稳态运行时受到阵风干扰和系统外部线路发生短路时两种情况下的动态响应过程。

1 交流励磁双馈风力发电机组的基本结构与动态数学模型

1.1 交流励磁双馈风力发电机组的基本结构

基于变速恒频控制技术的交流励磁风力发电系统主要由风速、风轮、交流励磁发电机、变频器、

基金项目: 国家自然科学基金(50667002); 新疆教育厅重点项目(XJEDU2005I01)

励磁系统、控制检测系统组成。定子侧直接接入无穷大的电网系统，而转子侧通双向变频器接入所需低频电流。因为定子与转子两侧都有能量的馈送，所以称为双馈发电机^[2]。交流励磁双馈风力发电机组的结构简图如图 1 所示：

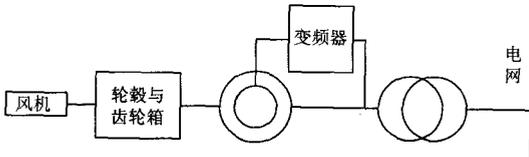


图 1 变速恒频风力发电机的结构简图

Fig.1 Diagram of VSCF wind power generation

1.2 风力发电机组动力系统数学模型

风力发电机组动力系统数学模型可表示为：

$$M_{\omega} = \frac{1}{2} \pi \rho C_p R^3 \frac{V_{\omega}}{\lambda} \cdot \frac{\Omega_N}{P_N} \times 10^{-3}$$

$$\frac{dM_T}{dt} = \frac{1}{T_h} (M_{\omega} - M_T)$$

$$\frac{d\Omega}{dt} = \frac{1}{T_l} (M_l - M_m)$$

式中： ρ 为空气密度 (kg/m^3)； c_p 为风力机功率效率系数； R 为叶片半径 (m)； V_{ω} 为作用于风力机风速 (m/s)； $\lambda = \Omega R / V_{\omega}$ 为叶尖速率； Ω 为叶片机械角速度 (rad/s)； Ω_N 为风力机额定机械角速度 (rad/s)； P_N 为风力机额定功率 (kW)； M_T 为机械转矩 (p.u.)； T_h 为轮毂惯性时间常数 (s)； M_{ω} 、 M_l 、 M_m 分别为叶片侧转矩、联轴器齿轮箱侧转矩、联轴器发电机侧转矩 (p.u.)； T_l 为齿轮箱和联轴器的惯性时间常数 (s)^[3]。

1.3 d-q-0坐标系下双馈风力发电机组的数学模型

d-q-0 坐标系中定子电压方程式可以表示为：

$$\begin{bmatrix} u_{ds} \\ u_{qs} \\ u_{0s} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -r_s & 0 & 0 \\ 0 & -r_s & 0 \\ 0 & 0 & -r_s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{ds} \\ i_{qs} \\ i_{0s} \end{bmatrix} + P \begin{bmatrix} \Psi_{ds} \\ \Psi_{qs} \\ \Psi_{0s} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & -\omega_0 & 0 \\ \omega_0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Psi_{ds} \\ \Psi_{qs} \\ \Psi_{0s} \end{bmatrix}$$

d-q-0 坐标系中转子电压方程式可以表示为：

$$\begin{bmatrix} u_{dr} \\ u_{qr} \\ u_{0r} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r_r & 0 & 0 \\ 0 & r_r & 0 \\ 0 & 0 & r_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{dr} \\ i_{qr} \\ i_{0r} \end{bmatrix} + P \begin{bmatrix} \Psi_{dr} \\ \Psi_{qr} \\ \Psi_{0r} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & -(\omega_0 - \omega_r) & 0 \\ (\omega_0 - \omega_r) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Psi_{dr} \\ \Psi_{qr} \\ \Psi_{0r} \end{bmatrix}$$

d-q-0 坐标系中磁链方程式可以表示为：

$$\begin{bmatrix} \Psi_{ds} \\ \Psi_{qs} \\ \Psi_{dr} \\ \Psi_{qr} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -L_s & 0 & L_m & 0 \\ 0 & -L_s & 0 & L_m \\ -L_m & 0 & L_r & 0 \\ 0 & -L_m & 0 & L_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{ds} \\ i_{qs} \\ i_{dr} \\ i_{qr} \end{bmatrix}$$

d-q-0 坐标系下的电磁转矩方程为：

$$T_c = (3/2)n_p L_{ms} (i_{qs} i_{dr} - i_{ds} i_{qr})$$

$$\text{机电运动方程式: } T_m = T_c + \frac{J}{n_p} \frac{d\omega_r}{dt}$$

上式一起构成了交流励磁发电机在 d-q-0 坐标系下的数学模型。从中可以看出该方程式比较简单，也消除了互感之间的耦合关系，它们现在是一组常系数微分方程，这就是坐标变换的最终目的所在。

2 并网双馈风力发电机组的稳定性仿真分析

选定双馈发电机组的参数如下：转子电阻 $r_r=0.0073 \text{ pu}$ ，定子电阻 $r_s=0.00706 \text{ pu}$ ，定子漏抗 $X_s=0.171 \text{ pu}$ ，转子漏抗 $X_r=0.156 \text{ pu}$ ，激磁电抗 $X_m=2.9 \text{ pu}$ ，发电机转动部分惯性时间常数 $T_J=5.04 \text{ pu}$ ，风力机与发电机之间机械传动部分时间常数 $T_d=0.5 \text{ s}$ ，极对数 $p=3$ 。含风速变化的双馈风力发电机组经升压变之后与无穷大系统连接的仿真模块图如图 2 所示。

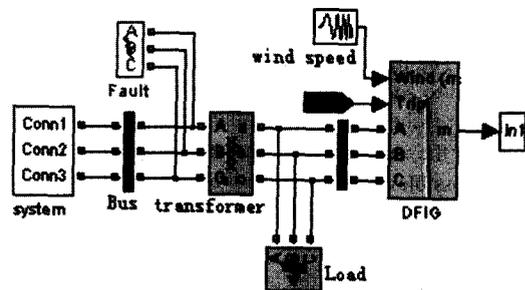


图 2 双馈风力发电机组并网运行时的仿真图

Fig.2 Simulation of double-fed wind generator linked on the net

1) 稳态运行时的仿真分析

基本风速为 $8 \text{ m}/\text{s}$ 时双馈风力发电机组稳态运行时，在 2 s 时出现了 $16 \text{ m}/\text{s}$ 的阵风的干扰，阵风持续 5 s 时间，风速又逐渐变成基本风速，在持续到 15 s 时又风速减弱为 $4 \text{ m}/\text{s}$ ，持续 3 s 后风速又逐渐变成基本风速。在这种情况下，仿真结果如图 3、图 4、图 5 所示。

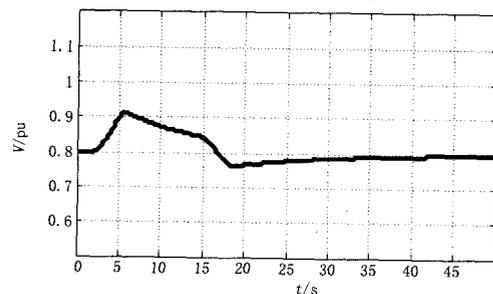


图 3 发电机的转子转速曲线

Fig.3 Curve of rotor speed

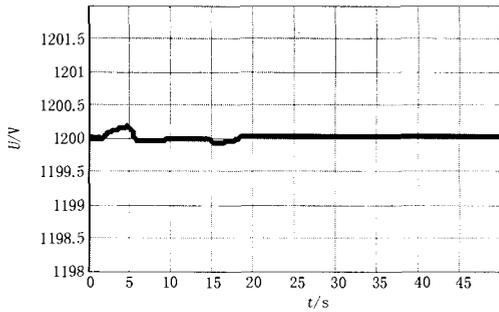


图 4 发电机的转子励磁电压曲线

Fig.4 Curve of exciting voltage

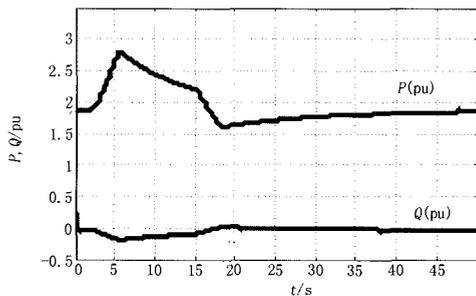


图 5 发电机有功、无功曲线

Fig.5 Curve of active reactive power

由图 3、图 4 可知,双馈风力发电机组在稳态运行时受到风速变化的干扰,发电机组转子侧的变频器的输出励磁电压会进行相应的调节,使得发电机出口处的电压能够保持恒定。由图 5 可知,双馈风力发电机组发出的有功可以根据风速的改变,使得风能可以有效的利用,同时无功也能进行调节。因此交流励磁双馈风力发电机组对风速的波动具有一定的抗干扰能力。

2) 暂态时的仿真分析

基本风速为 8 m/s 时双馈风力发电机组稳态运行,在 5 s 时风力发电机组和系统连接的线路上发生了单相短路,故障持续 0.15 s,此时仿真结果如图 6、图 7 所示。

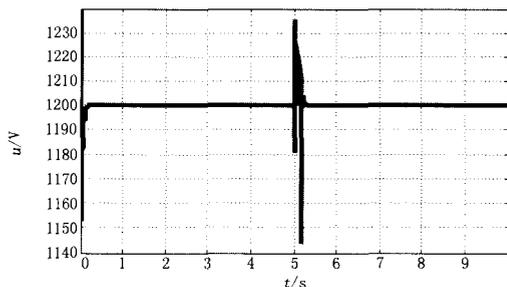


图 6 发电机的转子励磁电压曲线

Fig.6 Curve of exciting voltage

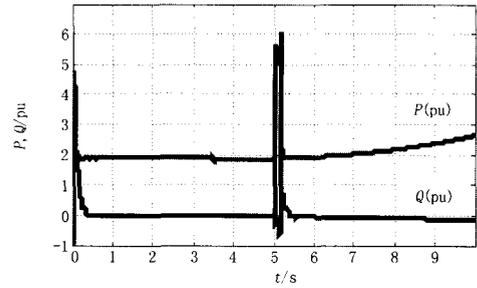


图 7 发电机有功、无功曲线

Fig.7 Curve of active reactive power

由图 6、图 7 可知,基本风速下,双馈风力发电机组能保证平稳的工作。突然在 5 s 时靠近发电机侧的线路发生了瞬时性故障,线路中电压急剧下降。由图 6 可见,此时发电机转子侧的励磁电压也随之发生相应的变化,这样就抑制了机端电压的恶性下降。由图 7 可见,发生故障时发电机发出的无功功率会相应的增加,这样能保证系统的电压能维持在允许的范围之内。5.15 s 时故障切除后双馈风力发电机组能很快的稳定下来。德国最大的电网公司之一 E.ON 公司规定风电机端电压在不低于 0.9 pu 时要求风电机组能够持续运行。由图 6 知,当靠近风电接入点发生故障时,机端电压下降约为 0.94 pu,机组能够持续并网运行,这就说明交流励磁双馈风力发电机组具有低电压穿越功能(LVRT)。所谓 LVRT 功能,就是当系统发生故障时,要求风电机组能够承受短时的电压降低而不退出运行,使之能够继续向系统输入功率以支撑系统电压。这种功能使风电机组较以往固定转速机组在系统故障时对系统的贡献更大,风电场不但不是系统的负担,反而成为系统故障恢复的有利支撑电源。

3 结论

本文分析了变速恒频交流励磁双馈风力发电机的结构及其工作原理,对交流励磁发电机组进行了数学建模和仿真分析。从所得到的仿真结果来看,由于双馈风力发电机的转子侧励磁电压的频率可由变频器根据风速的变化进行调节,因此对风速的变化和电网电压的波动具有一定的动态适应能力,从而验证了该机型更适合于风力发电场。目前,新疆达坂城风电三场安装的机组中也有具有 LVRT 功能的变速恒频交流励磁风力发电机组,所以在系统靠近风电接入点发生故障的过程中风电场始终能够在线运行,随着这种变速风机装机容量的增加,达坂

(下转第 16 页 continued on page 16)

压器容量和加大导线截面来提高配电网供电能力的作法是值得思考的。日本采用的小容量、多布点、短距离的配电模式可以为我们今后配电网的规划和建设做一些参考和借鉴。

4 结语

提高配电网供电能力对于供电企业和用户都是很有意义的。从本文的分析可以看出,在当前我国常用的配电模式下,配网的供电能力是较低的,满足负荷发展的能力是较差的。因此,在电网改造和建设的过程中,应该借鉴国外先进经验,寻求更为合理的配电模式,从根本上提高配网的供电能力。

参考文献

- [1] 张学松,柳焯,于尔铿,等.配电网潮流算法比较研究[J].电网技术,1998,22(4):45-49.
ZHANG Xue-song,LIU Zhuo,YU Er-keng,et al.A Comparison on Power Flow Calculation Methods for Distribution Network[J]. Power System Technology, 1998,22(4):45-49.
- [2] 孙宏斌,张伯明,相年德.配电网潮流前推回推的收敛性研究[J].中国电机工程学报,1999,19(7):26-29.
SUN Hong-bin,ZHANG Bo-ming,XIANG Nian-de.Study

on Convergence on Back/forward Sweep Distribution Power Flow[J].Proceedings of the CSEE,1999,19(7): 26-29.

- [3] Chen T H, Chen M S,Hwang K J, et al. Distribution System Power Flow Analysis -a Rigid Approach[J]. IEEE Trans on Power Delivery,1991, 6(3):1146- 1152.
- [4] 谢开贵,周平,刘洋.配电网潮流计算的递推算法[J].电力系统自动化,2004,28(4):36-39.
XIE Kai-gui,ZHOU Ping,LIU Yang.Recursive Load Flow Algorithm for Electric Distribution Networks[J]. Automation of Electric Power Systems,2004,28(4): 36-39.
- [5] 孙健,江道灼.基于牛顿法的配电网潮流计算方法[J].电网技术,2004,28(15):40-44.
SUN Jian,JIANG Dao-zhuo. A Zbus Power Flow Calculation Method for Distribution Network Based on Newton Method[J]. Power System Technology, 2004, 28(15):40-44.

收稿日期:2006-12-11; 修回日期:2007-04-21

作者简介:

汪卫华(1977-),男,硕士,工程师,主要从事电网运行分析及继电保护工作。E-mail:ftcwang@163.com

(上接第9页 continued from page 9)

城风电场也将成为乌鲁木齐电网系统故障恢复的有利支撑电源。正因为双馈风力发电机有诸多的优点,它的应用前景非常广阔,成为众多研究人士关注的焦点,但从实际的应用来看,仍存在不少亟待解决的问题^[4],例如:电机定、转子绕组与励磁变频装置匹配的研究;变频装置研究;控制理论与矢量控制技术的研究;电机稳定性及各种非正常工况下电机承受能力的研究等。

参考文献

- [1] 李晶,王伟胜.变速恒频风力发电机组建模与仿真[J].电网技术,2003,27(9):14-17.
LI Jing, WANG Wei-sheng. Modeling and Dynamic Simulation of Variable Speed Wind Turbine[J]. Power System Technology, 2003, 27(9): 14-17.
- [2] 叶杭冷.风力发电机组控制技术(第二版)[M].北京:机械工业出版社,2006.95-165.
YE Hang-ye. Control Technology for Wind Turbine Generator, Second Edition [M]. Beijing: China Machine

Press, 2006.95-165.

- [3] 申洪,梁军.基于电力系统暂态稳定分析的风电场穿透功率极限计算[J].电网技术,2002,26(8):8-11.
SHE Hong, LIANG Jun. Calculation of Wind Power Penetration Based on Power System Transient Stability Analysis[J]. Power System Technology, 2002, 26(8): 8-11.
- [4] 马幼捷,张继东.风电场的稳定问题[J].可再生能源,2006,127(3):36-39.
MA You-jie, ZHANG Ji-dong. Study on Voltage Stability of Wind Power Systems[J]. Renewable Energy, 2006, 127(3): 36-39.

收稿日期:2007-01-15; 修回日期:2007-04-08

作者简介:

闫广新(1981-),男,硕士研究生,研究方向为电力系统综合自动化;E-mail:friendlygx@163.com

晁勤(1959-),女,教授,博士研究生导师,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。