

含双馈风电场电力系统暂态稳定性分析

盛超¹, 曾杰¹, 郝正航², 曾沅²

(1. 广东电网公司电力科学研究院, 广州 510080;

2. 天津大学智能电网教育部重点实验室, 天津 300072)

摘要: 随着风电装机容量的增长, 风电场接入运行对电力系统稳定性的影响不容忽视。借助单机无穷大系统分析了双馈风电机组的自身稳定性, 发现双馈感应发电机转子运动没有机电暂态失稳现象, 但存在电磁暂态失稳现象; 研究了双馈风电场与同步电机运行在典型接线方式下系统稳定性的差异和变化。仿真算例表明, 由于双馈风电机组有功功率的快恢复特性, 可能使含双馈风电场混合电力系统的暂态稳定水平显著降低。

关键词: 双馈感应发电机; 风电场; 电力系统; 暂态稳定性

中图分类号: TM712 **文献标志码:** A **文章编号:** 1003-8930(2012)01-0133-05

Analysis of Transient Stability of Power Systems with DFIG-based Wind Farms

SHENG Chao¹, ZENG Jie¹, HAO Zheng-hang², ZENG Yuan²

(1. Electric Power Research Institute of Guangdong Power Grid Corporation,
Guangzhou 510080, China;

2. Key Laboratory of Smart Grid of Ministry of Education, Tianjin University,
Tianjin 300072, China)

Abstract: The integration of large scale wind farm brings serious influence to the stability of power system. The stability of doubly-fed induction generator (DFIG) via single machine vs. infinite system is investigated at first. It is revealed that, for the rotor motion of DFIG itself, there exists the electromagnetic transition unstable phenomenon but not kinetic unstable phenomenon. Furthermore, according to the connection mode of DFIG-based wind farm and traditional synchronous generator, the transient stability of power system is compared and analyzed. Examples by simulation show that, due to the fast recovery character of the active power output by DFIG, the transient stability of hybrid system containing DFIG-based wind farm may be deteriorated obviously.

Key words: doubly-fed induction generator; wind farm; power system; transient stability

双馈式风电机组与常规同步发电机有很多不同, 随着风电装机容量的增长, 风电对电力系统稳定性影响不容忽视。尤其在我国的, 虽然风能资源丰富, 但适合大规模开发风电的地区一般都远离负荷中心, 甚至远离主干电网。当风电高比例渗入电网以后, 对电网稳定性产生怎样的影响, 国内外学者开展了对这一问题的研究。从已发表的文献来看, 研究方法大致相同——即通过仿真工具建立风电

场模型, 再将风电场接入电力系统, 仿真计算以后得出稳定性结论。为了得出风电对电力系统稳定性影响是正面还是负面, 通常的做法是将风电场替换为常规同步电机后, 再次做相同的仿真计算, 以此作为与前者比较的参考。

文献[1]研究了大规模风电接入对电力系统的影响。通过对双馈风电机组进行动态建模以及对包含风电场的电力系统进行仿真计算, 研究结果表

收稿日期: 2011-05-06; 修回日期: 2011-12-05

明大规模的风电接入可能会使电网出现线路传输功率越限、短路容量增加及电力系统稳定性发生变化等问题。文献[2]假设了一个示例系统,在电网末端接入 100 MW 的双馈式风电场,研究了受扰后系统的动态行为,又将该风电场替换为相同容量的常规同步电站,又做了相同的仿真分析。结论是接入双馈式风电场比接入同等容量的常规电站有更好的阻尼特性和暂态稳定性。文献[3]认为,双馈机组的机械惯性与电力系统解耦,于是将双馈机组视为无机械惯性的常规同步机组,通过计算特征值对机组机械惯性的灵敏度来判断风电机组对电力系统稳定性影响的性质。事实上,这种做法只考虑到双馈机组的一个特点——机电解耦性,没有考虑到双馈机组的其他特性,将双馈机组仅仅视为无惯性的同步机组值得商榷。文献[4]的做法与文献[1]类似,但该文全面考虑了测试系统中同步电机和负荷的各种建模,仿真结论是双馈机组代替同步机组后暂态稳定性趋向增强,但在有些故障条件下也出现暂态稳定性减弱情况。文献[5]研究了风电场整体与电网的相互作用,指出了风电场接入容量与电力系统电压稳定性及功角暂态稳定性的关系。文献[6]研究了双馈风电机组与电力系统中同步电机的交互作用,认为双馈风电机组可能对电力系统稳定性不利。

本文在文献[6]的基础上,研究双馈风电机组自身的稳定性,并深入的分析了双馈风电场对电力系统的稳定性影响。

1 双馈风电机组的基本结构

双馈风力发电机组的基本物理结构如图 1 所示,由风力机、传动轴及齿轮箱、双馈感应发电机 DFIG(doubly-fed induction generator) 和双脉冲宽度调制 PWM(pulse width modulation) 变流器及其控制系统组成^[7,8]。

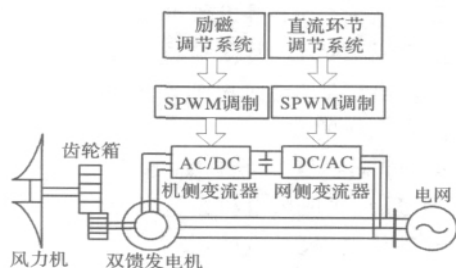


图 1 双馈风力发电机组基本结构
Fig.1 Structure of DFIG-based wind turbine

风力机的作用是通过叶轮捕获风能,将风能转化为作用在轮毂上的机械转矩;传动轴及齿轮箱的作用是将风力机的驱动作用传递给发电机并提升转速;双馈感应发电机类似于绕线式异步电机,其作用是将机械能转化为电能,且保证输出恒频的交流电压;双 PWM 变流器一方面为双馈电机提供交流励磁,另一方面为转子到电网之间提供功率流动途径,它可运行于 4 个象限。

双馈电机的核心控制部件是双 PWM 变流器,其中与转子绕组直接相连的称为机侧变流器,与电网直接相连的称为网侧变流器,两个变流器的直流侧由共同的电容器提供电压支撑。机侧变流器的基本功能是为双馈发电机提供励磁电压,并且在矢量控制策略下实现有功和无功的解耦调节;网侧变流器的主要功能是在直流调节系统的控制下维持电容电压恒定,同时具有调节功率因数的功能。此外,这两个“背靠背”变流器构成了四象限可逆变流系统,即从机侧到网侧可实现有功、无功双向流动。

2 DFIG 自身稳定性分析

所谓自身稳定性是指单台机组接入无穷大系统的稳定性问题。对这一问题的研究,在方法上可借鉴基于同步电机的“单机无穷大系统”,因此,回顾同步电机的稳定性概念和理论可以为研究 DFIG 稳定问题拓展想象的空间。

同步电机的“单机无穷大系统”有两个主要的稳定问题,其一是大扰动下的暂态稳定问题,其二是小扰动下的低频振荡问题。对于暂态稳定问题,“等面积定则”从物理意义上揭示了稳定机理并提供判据。从非线性动力方程的角度看,同步电机的摇摆方程是关于功角的非线性二阶微分方程,有一个稳定平衡点和一个不稳定平衡点,从李雅谱诺夫稳定概念上可以确定一定存在有限的稳定域边界。对于低频机电振荡,是因为线性化的二阶转子运动方程的特征根是共轭复根,而且在一定控制参数和运行条件下,共轭复根的实部可能为正。

综上所述,同步电机的两个稳定问题均由二阶转子运动方程引起。对于 DFIG 其情况完全不同于同步电机,由于机电解耦性,DFIG 转子运动方程不是二阶微分方程而是关于转速的一阶微分方程,故不存在类似于同步电机的动力学失稳问题。但是,由于 DFIG 采用了双闭环励磁调节,再加上 Park 方程仍然是非线性高阶微分方程,因此存在电磁暂态尺度下动力学稳定性问题。

为说明上述观点,考察如下示例系统的动态行为。图 2 是单台 DFIG 经输电线路接入无穷大母线的系统接线图。

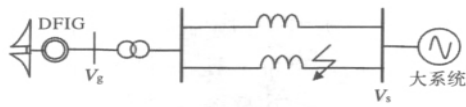


图 2 基于 DFIG 的单机无穷大系统
Fig. 2 DFIG-based single machine infinite bus system

利用 Matlab/Simulink 的 Power System Block 建立 DFIG 及其控制系统仿真模型,其中 DFIG 参数如表 1 所示。

表 1 DFIG 参数 Tab. 1 DFIG parameters				
定子电感 / mH	转子电感 / mH	定转子互感 / mH	定子电阻 / Ω	转子电阻 / Ω
15.56	16.2	15.66	0.008	0.0188

故障设置如下:在 $t = 3.00\text{ s}$ 时一回输电线路发生三相短路故障, $t = 3.04\text{ s}$ 时故障线路切除, $t = 3.6\text{ s}$ 时线路重合成功。图 3 是故障前后的 DFIG 定子有功和无功,可以看出,故障导致定子有功和无功发生剧烈振荡,当故障清除以后又经过大约 1 s 的时间定子有功和无功又恢复到初值,系统最终恢复了稳定。图 4 是 DFIG 转子转速的暂态变化过程。

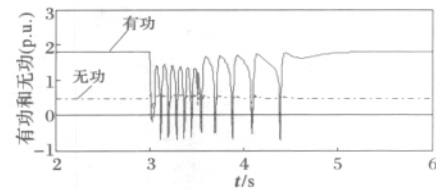


图 3 DFIG 定子有功和无功的暂态响应
Fig. 3 DFIG stator active and reactive power

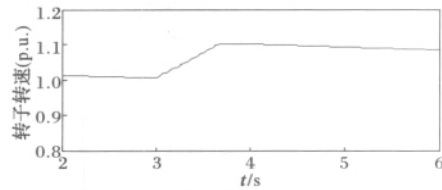


图 4 DFIG 转子转速的暂态响应
Fig. 4 DFIG rotor speed

从图 4 可以看出,受扰后的 DFIG 在机械转矩不变的条件下,其转速可以大范围变化,而没有出现动力学失稳现象。当转速发生变化时,其转子电

流的频率发生变化,如图 5 所示。

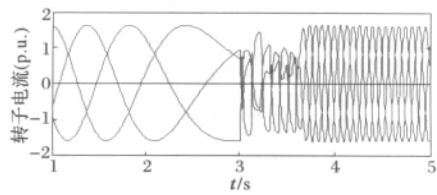


图 5 DFIG 转子电流的暂态响应
Fig. 5 Transient response DFIG rotor current

研究发现,当定、转子绕组的电阻减小时,电磁模式阻尼变小,容易出现电磁暂态失稳现象。当定子电阻和转子电阻减小 12% 后,再做如上故障仿真,发现定子有功和无功出现了永久性振荡现象,如图 6 所示,表明存在电磁暂态的动力学失稳问题。

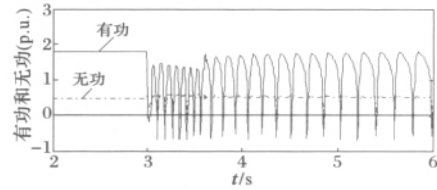


图 6 电磁暂态失稳现象
Fig. 6 Electromagnetic transient instability

3 风电场与电力系统的交互作用

当风电场与电力系统中的同步发电机 SG(synchronous generator) 的电气距离很小时,风电机组和同步机组可发生强烈的交互作用,这一问题在中国风电模式下尤为突出。对于欧洲风电而言,风电场规模小,分布式地接入配电系统,配电系统属于电力系统末梢,风电场与同步电机的交互作用非常微弱,这也是欧洲风电对电网影响很小的根本原因。研究风电与电力系统的交互作用,可使用如图 7 所示的典型接线模式,即风电场与同步电机(常规电站)并列运行。

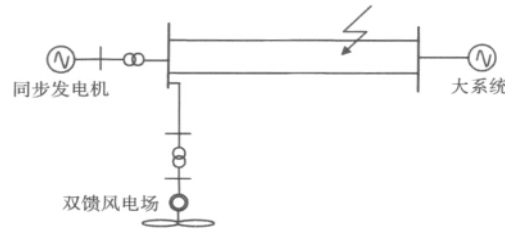


图 7 风电场与同步电机并列运行系统
Fig. 7 Hybrid system of a wind farm and a SG

文献[6]在双馈机组功角概念的基础上,提出了DFIG和SG的功角摇摆曲线可能存在两类交点,将其分别定义为主动交越点和被动交越点,交越性质决定了DFIG对SG稳定性影响的性质。大扰动时,SG的首摆期间有主动交越点,DFIG降低了系统的暂态稳定性,因此对于双馈风电场与常规电站并列运行的输电系统,风电场极有可能降低系统的暂态稳定性。

以图7所示系统为例,考察含风电的电力系统暂态稳定性。为了量化分析,需要比照标准,故研究三种情形:①图7所示的混合系统;②将图7中双馈风电场替换为另一同容量的同步电机,形成两台同步电机对无穷大系统;③将图7中的同步发电机替换为另一同容量的双馈风电场,形成两个风电场对无穷大系统。故障设置:3.00 s一回线路上发生三相短路故障,3.04 s三相跳开,3.60 s重合。

3.1 同步电机与风电场并列情形

对情形①做暂态仿真分析,所得同步电机和风电场的有功功率如图8所示。由图中可以看出,混合电力系统最终失去稳定。从风电场的有功波形上看出,在故障后的0~0.3 s期间,风电场的有功出力几乎不变,这导致了同步电机暂态过程的“加速面积”增加,降低了系统的稳定性。

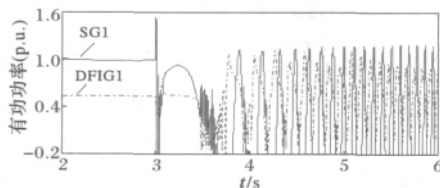


图8 情形①的暂态仿真波形

Fig. 8 Transient simulation curves in case ①

3.2 两台同步电机并列情形

对情形②做暂态仿真分析,所得两台同步电机的有功功率如图9所示。

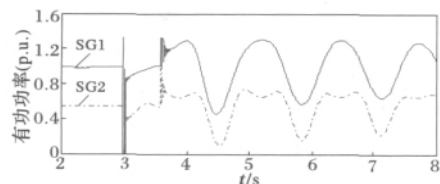


图9 情形②的暂态仿真波形

Fig. 9 Transient simulation curves in case ②

由图9可见,当两台同步电机并列运行时,短路故障开断一回线路后,因为同步发电机功角不能

迅速增大,在故障后的0~0.3 s期间SG2的有功功率小于故障前,之后随功角的增大功率上升并持续摇摆一段时间,最终系统趋于稳定。从图8和图9两种情形的对比中得出,混合电力系统的暂态稳定性较单纯同步电力系统稳定性差。分析其原因在于双馈风电机组的功率特性具有“快恢复特性”,即双馈风电机组由于有功功率的可快速调节,在不过载的情况下即使网络出现故障仍然可以保持出力基本不变,这一特性对与之并列的同步电机产生了不利影响。

3.3 风电场并列情形

对于情形③做暂态仿真分析,所得两个风电场的有功功率如图10所示。从图10可以看出,双馈风电场在经历一个暂态过程后没有失去稳定。

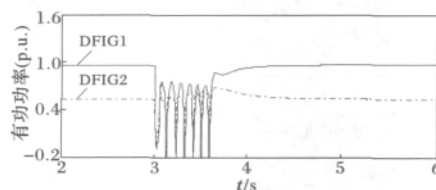


图10 情形③的暂态仿真波形

Fig. 10 Transient simulation curves in case ③

4 结语

(1) 对于双馈风电机组的自身稳定性,其双馈感应发电机的转子运动没有动力学失稳问题,即没有机电暂态失稳现象,但存在电磁暂态失稳现象。

(2) 对于含双馈风电场的混合电力系统,由于双馈风电机组有功功率的快恢复特性,可能使混合电力系统的暂态稳定水平显著降低。因此,对于我国未来风火打捆输电系统的稳定性问题需要高度重视。

参考文献:

- [1] 迟永宁,刘燕华,王伟胜,等(Chi Yongning, Liu Yanhua, Wang Weisheng, et al). 风电接入对电力系统的影响(Study on impact of wind power integration on power system)[J]. 电网技术(Power System Technology), 2007, 31(3): 77-81.
- [2] Muljadi E, Butterfield C P, Parsons B, et al. Effect of variable speed wind turbine generator on stability of a weak grid[J]. IEEE Trans of Energy Conversion, 2007, 22(1): 29-36.
- [3] Gautam Durga, Vittal Vijay, Harbour Terry. Impact of increased penetration of DFIG based wind turbine

- generators on transient and small signal stability of power systems[J]. IEEE Trans on Power Systems, 2009, 24(3): 1426—1434.
- [4] Shi Libao, Dai Shiqiang, Ni Yixin, *et al*. Transient stability of power systems with high penetration of DFIG based wind farms[C]//IEEE Power and Energy Society General Meeting, Calgary Canada; 2009.
- [5] 郝正航, 余贻鑫(Hao Zhenghang, Yu Yixin). 双馈风力发电机组对电力系统稳定性影响(The influence of doubly-fed induction generator on stability of power system)[J]. 电力系统保护与控制(Power System Protection and Control), 2011, 39(3): 7—11, 17.
- [6] Pena R, Clare J C, Asher G M. Doubly fed induction generator using back-to-back PWM converters and its application to variable-speed wind-energy generation [J]. IEE Proceedings: Electric Power Applications, 1996, 143(3): 231—241.
- [7] Muller S, Deicke M, De Doncker R W. Doubly fed induction generator systems for wind turbines[J]. IEEE Industry Applications Magazine, 2002, 8(3): 26—33.

作者简介:

盛超(1972—),男,工程师,研究方向为电力系统分析及励磁控制。Email:sheng_chao@163.net

曾杰(1979—),男,工程师,研究方向为电力系统分析和新能源。Email:zjhust@gmail.com

郝正航(1972—),男,博士,研究方向为电力系统稳定和风力发电。Email:haozhenghang@163.com

曾沅(1975—),男,副教授,研究方向为电力系统安全性与稳定性。Email:zengyuan@tju.edu.cn

(上接第132页)

- [5] 孙宏斌, 张伯明, 郭庆来, 等(Sun Hongbin, Zhang Boming, Guo Qinglai, *et al*). 基于软分区的全局电压优化控制系统设计(Design for global optimal voltage control system based on soft identification of secondary control zones)[J]. 电力系统自动化(Automation of Electric Power Systems), 2003, 27(8): 16—20.
- [6] 孙元章, 王志芳, 姚小寅(Sun Yuanzhang, Wang Zhifang, Yao Xiaoyin). 电力系统二级电压控制的研究(Study on secondary voltage control of power system)[J]. 电力系统自动化(Automation of Electric Power Systems), 1999, 23(9): 9—14.
- [7] 盛戈峰, 江秀臣, 涂光瑜, 等(Sheng Gehao, Jiang Xiuchen, Tu Guangyu, *et al*). 基于多Agent的二级电压紧急优化控制方法(Optimal method for emergency secondary voltage control based on multi-agent technology)[J]. 电力系统及其自动化学报(Proceedings of the CSU-EPSC), 2005, 17(5): 1—6, 49.
- [8] 陈中, 杜文娟, 王海风, 等(Chen Zhong, Du Wenjuan, Wang Haifeng, *et al*). 电压稳定后紧急控制多代理系统框架(Framework of multi-agent system in post-emergency voltage stability control)[J]. 电力系统自动化(Automation of Electric Power Systems), 2006, 30(12): 33—37.
- [9] 李海峰, 王海风, 陈珩(Li Haifeng, Wang Haifeng, Chen Heng). 紧急情况下二次电压的多代理协调控制(Multi-agent based secondary voltage coordination control in power system contingencies)[J]. 电力系统自动化(Automation of Electric Power Systems), 2001, 25(24): 17—21.
- [10] 赵晋泉, 江晓东, 张伯明(Zhao Jinquan, Chiang Xiaodong, Zhang Boming). 一种基于连续线性规划技术的在线静态安全校正算法(A successive linear programming based on-line static security corrective control approach)[J]. 电网技术(Power System Technology), 2005, 29(5): 25—30.
- [11] 范磊, 陈珩(Fan Lei, Chen Heng). 二次电压控制研究(一)(Study of secondary voltage control part one: structural model and nested clustering algorithm)[J]. 电力系统自动化(Automation of Electric Power Systems), 2000, 24(11): 18—21.
- [12] 张伯明, 陈寿孙, 严正. 高等电力网络分析[M]. 北京: 清华大学出版社, 2007.

作者简介:

陈得宇(1974—),男,博士研究生,主要从事智能体(Agent)技术在电力系统中应用,大系统建模、控制及辅助决策支持系统等研究。Email:chen_power@163.com

沈继红(1966—),男,教授,博士生导师,研究方向为复杂系统建模与仿真等。Email:shenjiahong@hrbeu.edu.cn

张仁忠(1952—),男,教授,研究方向为系统工程理论与应用。Email:zhangrenzhong@hrbeu.edu.cn