

DOI: 10.7667/PSPC151945

并网双馈风力机感应发电机效应研究

吕勇¹, 雷涛¹, 黄国华¹, 马淑慧¹, 张奇²

(1. 国网淮北供电公司, 安徽 淮北 235000; 2. 秦皇岛供电公司, 河北 秦皇岛 066000)

摘要: 中国大型风电场的建立, 使得大容量风功率需交流输电系统远距离输送。风力机通过含串联电容补偿的交流输电系统外送功率时, 可能诱发感应发电机效应(Induction Generator Effect, IGE), 威胁系统的安全稳定运行。建立了双馈风力发电系统模型, 从理论角度分析了影响感应发电机效应的因素; 采用复转矩系数法, 计算了串补度、输电线路电阻及风速变化时, 系统的电气阻尼, 最后进行了时域仿真验证。研究表明, 串补度的增大、风速的减小及输电线路电阻的减小可以增大系统的电气负阻尼。当系统等效电气负阻尼大于定子和输电系统等效正阻尼之和时, 将导致输出功率发散振荡, 即产生感应发电机效应。

关键词: 双馈风力发电机; 感应发电机效应(IGE); 复转矩系数; 电气阻尼

Induction generator effect analysis of doubly-fed wind generator connected to the power system

LÜ Yong¹, LEI Tao¹, HUANG Guohua¹, MA Shuhui¹, ZHANG Qi²

(1. State Grid Huaibei Power Supply Company, Huaibei 235000, China;

2. State Grid Qinhuangdao Electric Power Company, Qinhuangdao 066000, China)

Abstract: The establishment of large-scale wind power bases makes large wind power capacity, long-distance transport inevitable. The wind power passing through a series capacitor compensated line may cause induction generator effect (IGE) issues. This paper establishes a doubly-fed wind power system model to analyze the factors that influence the induction generator effect. Complex torque coefficient method is used to calculate the electrical damping at different series compensation, transmission line resistance and wind speed. The results show that the increase of series compensation and the decrease of wind speed and transmission line resistance can increase electrical negative damping. When the electrical negative damping is greater than the stator and the equivalent resistance of the transmission system, it will lead to continued divergence line current oscillations, which produces the induction generator effect.

Key words: DFIG-based wind turbine; induction generator effect (IGE); complex torque coefficient; electrical damping

0 引言

随着经济的发展, 中国面临的环境问题日益突出, 雾霾天气频发, 发展清洁能源, 迫在眉睫。风能作为一种可再生清洁能源, 在中国储量丰富。近几年, 在国家政策的指导下, 风电迅猛发展, 截止到2012年底, 中国一跃成为世界上风电装机容量最大的国家^[1]。中国的风力资源与负荷中心呈逆向分布, 大规模风功率通常选择经交流输电线路外送。为提高线路的传输容量, 常采用串联电容补偿的方式。大规模风电经带串联电容补偿的交流输电线路外送时, 可能在风力发电机中诱发类似于汽轮机发电机的感应发电机效应, 引起功率振荡, 破坏系统稳定^[2-4]。

文献[5]指出, 感应发电机效应是自励磁的一种, 也是次同步振荡现象的一种。同步发电机组在带容性负载或经串联电容补偿的线路接入系统时, 在满足一定的条件下可能发生感应发电机效应。文献[6-7]指出风力机轴系刚度较小, 自然扭振频率低(1~2 Hz), 需极高的串补度才能激发机电扭振相互作用。因此, 感应发电机效应(Induction Generator Effect, IGE)是双馈风机经串补交流输电系统外送功率的主要问题。因此, 研究和分析大规模双馈风电外送功率时, 由串联补偿电容参数设置不当激发的感应发电机效应, 对电力系统的安全稳定运行具有重要意义。

本文针对该问题展开讨论, 建立了双馈风力机通过串联电容补偿的交流输电线路接入交流无穷大

系统的模型, 通过理论分析了串补度、风速对感应发电机效应的影响, 利用测试信号法, 计算了串补度、风速及输电线路电阻变化时的电气阻尼曲线, 并进行了时域仿真验证。

1 双馈风力发电系统模型

双馈风力发电机采用串补交流系统外送功率模型如图 1 所示。

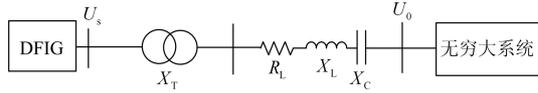


图 1 双馈风力机采用串补交流系统外送示意图

Fig. 1 DFIG-based wind turbines connect to the infinite power system through the series compensation line

图 1 中, U_0 为无穷大交流系统母线电压, U_s 为双馈风力机机端电压, R_L 为线路电阻, X_L 为线路电抗、 X_C 为串联电容的电抗, X_T 为变压器电抗。

双馈风力发电机采用矢量控制, 通过控制转子 dq 轴电流, 实现对发电机有功、无功或电压的解耦控制。常用的控制策略为定子电压定向(Stator Voltage Oriented, SVO)和定子磁链定向(Stator Flux Oriented, SFO), 在忽略定子电阻时, 这两种方式是等效的^[8-9]。本文中定子侧变换器(Grid Side Converter, GSC)采用定子定电压定向控制策略, 转子侧变换器(Rotor Side Converter, RSC)采用定子磁链定向的控制策略。

2 感应发电机效应机理分析

发电机要实现有效的机电能量转换, 定、转子旋转磁场必须保持相对静止。在双馈风力发电机中, 转子采用交流励磁变换器励磁, 当风速变化、发电机转速做相应的变化时, 转子励磁电流的频率做相应的变化, 保证定子输出频率恒定^[8,10-11]。双馈风力发电机转子转速随风速变化, 与汽轮发电机中转子以同步速旋转不同。

稳定运行时各转速之间的关系为

$$n_1 = n_2 + n_r \quad (1)$$

式(1)中: n_1 为定子磁场的同步转速; n_2 为转子磁场相对于转子的转速; n_r 为转子本身的转速, 与之对应的 f_r 为转子频率。

图 1 所示含串补输电线路的双馈风力发电机单机对无穷大系统模型自然谐振频率^[12] f_{er} 。

$$f_{er} = f_0 \sqrt{X_C / X_{L\Sigma}} \quad (2)$$

式(2)中: $f_0=50$ Hz, 为系统工频; $X_{L\Sigma}$ 为工频下, 双馈风力发电机等值电抗、变压器电抗及线路电抗之

和; X_C 为工频下, 串补电容的电抗, 且 $X_C=k \times X_L$; k 为线路串补度。通常 $f_{er} < f_0$, 所以谐振频率 f_{er} 又叫次同步频率。

在次同步频率下, DFIG 转子滑差为

$$s = \frac{f_{er} - f_r}{f_{er}} \quad (3)$$

式(3)中: f_r 为转子频率, 通常 $f_{er} < f_r$, 则 $s < 0$ 。

双馈风力发电机采用串补交流系统外送功率模型等效电路如图 2 所示。

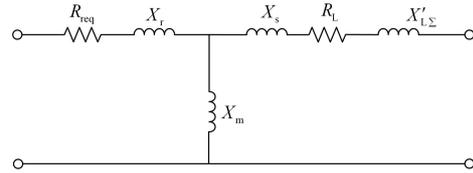


图 2 用于分析感应发电机效应的等效电路图

Fig. 2 Equivalent circuit used for IGE analysis

图 2 中, X_r 为双馈风力机的转子漏抗, X_s 为双馈风力机的定子漏抗, X_m 为励磁电抗, $X'_{L\Sigma}$ 为除去双馈风力发电机等值电抗的值, R_{req} 为双馈风力机的转子等效电阻, 在次同步频率 f_{er} 下:

$$R_{req} = R_r / s \quad (4)$$

联立式(3)、式(4)得:

$$R_{req} = -\frac{R_r}{f_r / f_{er} - 1} \quad (5)$$

可知, 转子在次同步频率下的等效电阻 R_{req} 呈负值, 且 $|R_{req}|$ 随 f_{er} 的增大而增大, 随 f_r 的减小而增大, 即 $|R_{req}|$ 随串补度的增大而增大, 随风速的减小而增大。当 $|R_{req}|$ 大于定子和输电系统在该谐振频率下的等效电阻之和时, 整个系统电阻值为负值, 将导致线路电流持续发散振荡, 即系统产生感应发电机效应^[13-16]。

3 复转矩系数法及电气阻尼分析

3.1 复转矩系数法^[2]的基本原理

对于待研究的双馈风力发电系统, 在小扰动作用下, 发电机电磁转矩的增量为

$$\Delta T_e = K_e \Delta \delta + D_e \Delta \omega \quad (6)$$

式(6)中: $K_e \Delta \delta$ 为同步转矩; $D_e \Delta \omega$ 为阻尼转矩; K_e 和 D_e 被称为同步转矩系数和阻尼转矩系数; $\Delta \delta$ 和 $\Delta \omega$ 为相对于同步旋转坐标系的功率角增量和角速度增量。

发电机转子运动方程:

$$\Delta \omega = \frac{1}{\omega_0} \times \frac{d\Delta \delta}{dt} \quad (7)$$

当发电机转子做频率为 $\lambda\omega_0$ 的稳态小值振荡时:

$$\Delta\dot{\omega} = \frac{1}{\omega_0} (j\lambda\omega_0)\Delta\dot{\delta} \quad (8)$$

$$\Delta\dot{T}_e = K_e(\lambda)\Delta\dot{\delta} + D_e(\lambda)\Delta\dot{\omega} \quad (9)$$

联立式(8)、式(9)得:

$$\frac{\Delta\dot{T}_e}{\Delta\dot{\omega}} = D_e(\lambda) - j\frac{1}{\lambda}K_e(\lambda) \quad (10)$$

因此, 求解系统的电气阻尼, 可以为判断是否发生感应发电机效应, 提供依据。

3.2 电气阻尼曲线

3.2.1 串补度变化对电气阻尼系数的影响

在 PSCAD/EMTDC 中搭建如图 1 所示的仿真系统, 设置串补度为 20% ($X_C=0.2$ p.u.) 和 60% ($X_C=0.3$ p.u.), 绘制电气阻尼曲线, 如图 3 所示。

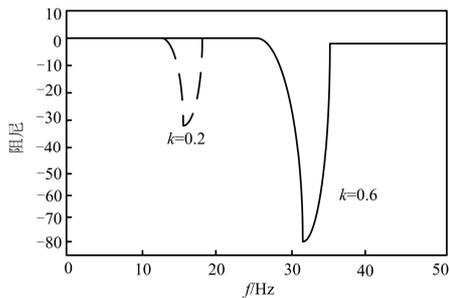


图 3 串补度变化对电气阻尼系数的影响

Fig. 3 Impact of changes in series compensation for electrical damping

由图 3 可知, 在一固定串补度下, 非谐振频率时电气阻尼为零, 在满足谐振条件频率附近时, 系统电气阻尼为负, 其绝对值急剧增大, 在谐振点达到最大值; 不同串补度对应的谐振频率不同, 串补度越高, 谐振频率越高, 负阻尼作用越明显。

3.2.2 输电线路电阻变化对电气阻尼系数的影响

保持其他参数不变, 设置线路电阻分别为 0.04 p.u.、0.06 p.u.、0.08 p.u., 进行仿真, 绘制系统电气阻尼曲线, 如图 4 所示。

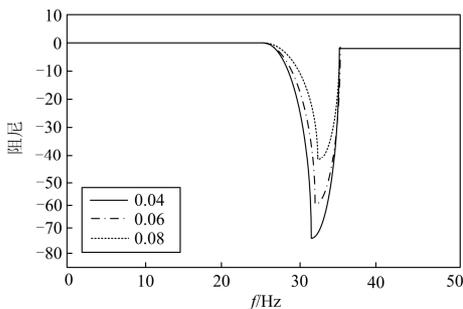


图 4 输电线路电阻变化对电气阻尼系数的影响

Fig. 4 Impact of changes in changes in transmission line resistance for electrical damping

3.2.3 风速变化对电气阻尼系数的影响

保持系统中其他参数不变, 改变风速给定值, 设置风速为 9 m/s、11 m/s、13 m/s 三种情况, 绘制的电气阻尼曲线, 如图 5 所示。

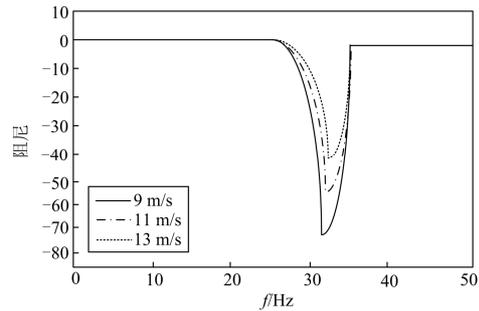


图 5 风速变化对电气阻尼系数的影响

Fig. 5 Impact of wind changes for electrical damping

由图 5 知, 风速的变化对电气谐振频率没有影响, 但会改变等效电阻的值。随着风速的增大等效电阻的绝对值减小。

4 时域仿真验证

4.1 串补度对 IGE 影响的仿真验证

在 Matlab/Simulink 中搭建如图 1 所示系统仿真模型, 改变线路串补度, 得到不同串补度有功和无功功率振荡曲线如图 6 所示。

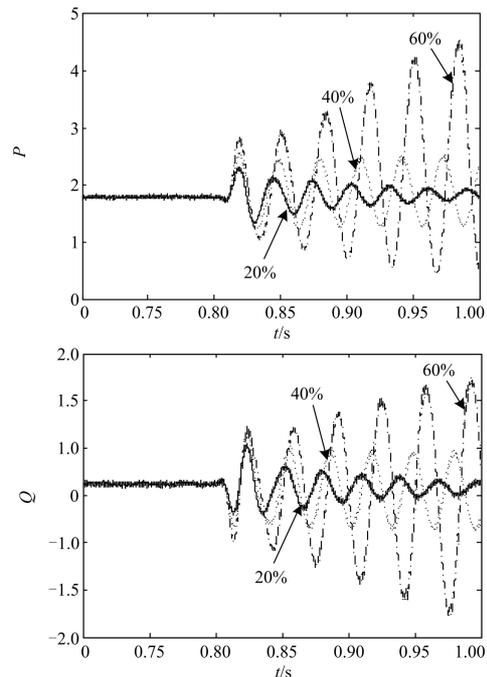


图 6 不同串补度下有功和无功功率振荡曲线

Fig. 6 Active and reactive power oscillation curves at different compensation levels

由图 6 可知, 当串补度为 20% 时, 有功和无功功率振荡收敛; 当串补度由 20% 提高到 40% 时, 有功和无功功率等幅振荡; 当串补度由 40% 提高到 60% 时, 有功和无功功率振荡发散。仿真结果表明, 随着串补度的提高, 输送功率由收敛变为发散, 且线路串补度越高, IGE 现象越明显。

4.2 输电线路电阻对 IGE 影响的仿真验证

保持其他参数不变, 改变线路电阻的数值, 取输电线路电阻为 0.04 p.u.、0.06 p.u.、0.08 p.u. 三种情况, 得到不同输电线路电阻下有功和无功功率振荡曲线如图 7 所示。

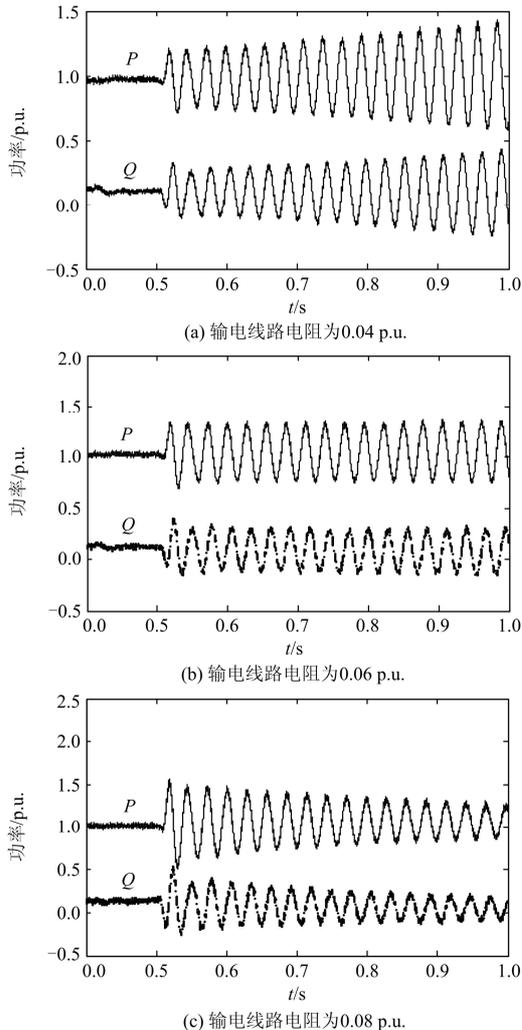


图 7 不同输电线路电阻下功率振荡曲线

Fig. 7 Active and reactive power oscillation curves at different transmission line resistance

由图 7 可知, 随着输电线路电阻的增大, 输出功率由发散变为收敛。输电线路提供的正阻尼可以抵消串联电容补偿引入的负阻尼, 抑制感应发电机效应。

4.3 风速对 IGE 影响的仿真验证

保持其他参数不变, 改变风速给定值, 设定风

速分别为 9 m/s、11 m/s、13 m/s 三种情况, 得到不同风速下有功和无功功率振荡曲线如图 8 所示。

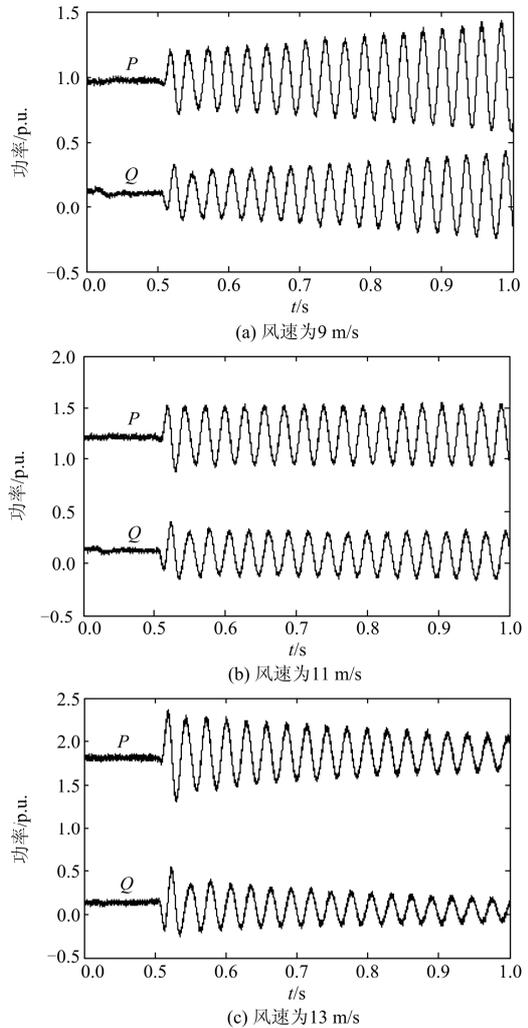


图 8 不同风速下功率振荡曲线

Fig. 8 Active and reactive power oscillation curves at different wind speed

由图 8 可知, 当风速为 9 m/s 时, 有功和无功功率振荡发散; 当风速由 9 m/s 提高到 11 m/s 时, 功率等幅振荡; 当风速由 11 m/s 提高到 13 m/s 时, 功率收敛。仿真结果表明, 随着风速的增大, 功率由发散变为收敛, 且风速越低, IGE 现象越明显。

5 结论

(1) 串联补偿电容给系统引入负阻尼; 不同串补度对应的谐振频率不同, 且串补度越高, 谐振频率越高, 负阻尼作用越明显; 当串补度超过 40% 时, 电气负阻尼大于系统正阻尼, 引发系统感应发电机效应。

(2) 输电线路的电阻变化, 不改变电气谐振的频

率,但对电气阻尼系数有很大的影响,电阻越大,电气谐振点的负阻尼越小;当输电线路电阻小于0.06时,系统发生感应发电机效应。

(3) 风速的变化不影响电气谐振频率,但会改变等效电阻的值。随着风速的减小等效负阻尼增大;当风速低于 11 m/s 时,系统发生感应发电机效应。

参考文献

[1] 李俊峰. 2013 中国风电发展报告[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 2013.

[2] 徐政. 交直流电力系统动态行为分析[M]. 北京: 机械工业出版社, 2004.

[3] 毕天姝, 孔永乐, 肖仕武, 等. 大规模风电外送中的次同步振荡问题[J]. 电力科学与技术学报, 2012, 27(1): 10-15.
BI Tianshu, KONG Yongle, XIAO Shiwu, et al. Review of sub-synchronous oscillation with large-scale wind power transmission[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2012, 27(1): 10-15.

[4] 任先文, 孔祥实, 令晓伟. 基于时滞反馈控制系统抑制次同步谐振[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 40(17): 24-29.
REN Xianwen, KONG Xiangshi, LING Xiaowei. Mitigating subsynchronous resonance (SSR) using delayed feedback control system[J]. Power System Protection and Control, 2014, 40(17): 24-29.

[5] 程时杰, 曹一家, 江全元. 电力系统次同步振荡的理论与方法[M]. 北京: 科学出版社, 2009.

[6] FAN L L, KAVASSERI R, MIAO LEE Z X, et al. Modeling of DFIG-based wind farms for SSR analysis[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2010, 25(4): 2073-2082.

[7] OSTADI A, YAZDANI A, VARMA R K. Modeling and stability analysis of a DFIG-based wind-power generator interfaced with a series-compensated line[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2009, 24(3): 1504-1514.

[8] 贺益康, 胡家兵, 徐烈. 并网双馈异步风力发电机运行控制[M]. 北京: 中国电力出版社, 2011.

[9] 张宝群, 张伯明, 吴文传. 基于小干扰稳定的双馈感应电机电磁模型降阶分析[J]. 电力系统自动化, 2010, 34(10): 51-55.
ZHANG Baoqun, ZHANG Boming, WU Wenchuan. Small signal based reduced electromagnetic model analysis of double fed induction generator[J]. Automation of Electric Power Systems, 2010, 34(10): 51-55.

[10] AKHMATOV V. 风力发电用感应发电机[M]. 北京: 中国电力出版社, 2009.

[11] ANAYA-LARA O. 风力发电的模拟与控制[M]. 北京: 机械工业出版社, 2010.

[12] 倪以信, 陈寿孙, 张宝霖. 动态电力系统理论和分析[M]. 北京: 清华大学出版社, 2002.

[13] 刘皓明, 唐俏俏, 朱凌志, 等. 双馈型风电场参与电压无功调节的分层控制方案[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(24): 80-85.
LIU Haoming, TANG Qiaoqiao, ZHU Lingzhi, et al. Hierarchical control strategy of voltage and reactive power for DFIG wind farm[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(24): 80-85.

[14] 王以笑, 张新昌, 路进升, 等. 基于 DlgSILENT 的并网光伏发电系统的建模与仿真[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(3): 49-55.
WANG Yixiao, ZHANG Xinchang, LU Jinsheng, et al. Modeling and simulation of grid-connected PV system based on DlgSILEN software[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(3): 49-55.

收稿日期: 2015-11-05; 修回日期: 2016-01-07

作者简介:

吕 勇 (1973-), 男, 本科, 工程师, 研究方向电网规划; E-mail: 13956470666@139.com

雷 涛 (1983-), 男, 本科, 工程师, 研究方向配电网规划、运行; E-mail: 13866882883@139.com

黄国华 (1970-), 男, 本科, 工程师, 研究方向智能配电网. E-mail: 15309618029@163.com

(编辑 姜新丽)