

异步风电机组接入系统的小干扰稳定及控制

关宏亮^{1,2}, 迟永宁², 戴慧珠², 杨以涵¹

(1. 华北电力大学电气与电子工程学院, 北京市 102206; 2. 中国电力科学研究院, 北京市 100085)

摘要:在电力系统分析软件 DIgSILENT/Power Factory 中建立基于普通异步发电机的风电机组(异步风电机组)和电力系统模型,分析异步风电机组对电力系统小干扰稳定性及阻尼特性的影响。提出了一种改进的桨距角控制方案——将系统频率偏差信号引入桨距角控制系统。在系统发生低频振荡时,通过调节桨距角控制异步风电机组输出功率,使风电场输出功率与系统功率振荡的频率相关。对系统进行特征值分析和故障时域仿真,2 种分析结果都表明,改进的桨距角控制环节能够改善系统阻尼,对系统功率振荡具有很好的阻尼和抑制作用,加强了系统动态稳定性。

关键词:异步风电机组; 小干扰稳定; 桨距角控制; 低频振荡

中图分类号: TM761; TM712

0 引言

风电场装机容量的扩大使其对系统的影响越来越明显,研究风电并网后对系统的影响成为备受关注的课题^[1-8]。已有很多学者研究风电场对系统潮流及暂态稳定^[9]的影响,但对小干扰稳定性问题的研究却比较少。并网风电容量的增加有可能对系统阻尼产生不利的影响,特别是风电场位于偏远地区,装机容量较大时,需经长线路输入系统,此时风电对系统小干扰稳定及阻尼特性的影响^[10-11]、风电机组稳定运行的规律^[12]等问题就显得尤为重要。

文献[11,13]分析了大容量风电场接入电力系统后对电力系统小干扰稳定性的影响,讨论了不同运行方式下风电场对系统阻尼的影响。文献[14-15]建立了双馈变速风电机组的小干扰稳定模型,分析了双馈变速风电机组对电力系统小干扰稳定性的影响,并且通过控制系统改善系统阻尼特性,提高系统动态稳定性。文献[16]建立了风电场模型,通过改变风电场与系统间的联系阻抗和风电场出力,对含风电场的单机无穷大系统和 3 机系统进行了小干扰稳定性分析。文献[17]建立了采用异步风电机组风电场的小干扰动态模型,研究了异步风电机组对系统频率变化的响应问题。

本文应用小干扰稳定性分析方法^[18-19],在推导出异步风电机组线性化状态方程的基础上,利用 DIgSILENT/Power Factory 进行频域分析和时域仿真,分析异步风电机组对电力系统小干扰稳定性及阻尼特性的影响。提出主动失速异步风电机组桨

距角控制方案,对抑制系统低频功率振荡具有很好的效果,提高了接入异步风电场的电力系统动态稳定性。

1 数学模型

1.1 空气动力学模型

风速与风力机机械功率的关系为:

$$P_w = \frac{1}{2} \rho \pi R^2 C_p(\beta, \lambda) V_{eq}^3$$

式中: P_w 为风力机机械功率; T_w 为风力机机械转矩; ρ 为空气密度; R 为风力机叶轮半径; β 为桨距角; $\lambda = R\omega_t/V_{eq}$,为叶尖速比; ω_t 为风力机转速; V_{eq} 为风速; C_p 为风力机的风能转换效率系数。

相应的风力机机械转矩方程为:

$$T_w = \frac{1}{2} \rho \pi R^3 C_p(\beta, \lambda) \frac{V_{eq}^2}{\lambda} \tag{1}$$

1.2 桨距角控制系统模型

当风速变化时,为更有效地利用风能,风机运行点将发生相应的变化,为保证风力机的输出平稳,需要对风力机的桨距角进行调整。桨距角控制系统用下式表达:

$$\frac{d\beta}{dt} = \frac{1}{T_\beta} (\beta_0 - \beta) \tag{2}$$

式中: β_0 为桨距角初始值; T_β 为桨距角控制系统的惯性时间常数。

1.3 轴系模型

轴系一般包括低速轴、齿轮箱和高速轴 3 个部分。本文采用两质块模型来表示轴系,分别由风力机与发电机的惯量表示,如图 1 所示。图 1 中风力机的低速轴与发电机的高速轴为柔性连接;而发电

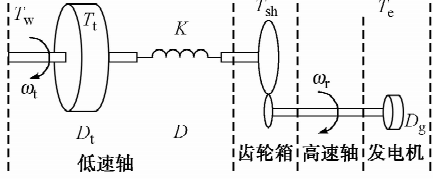
收稿日期: 2007-09-21; 修回日期: 2007-11-02。

机的高速轴可以认为是刚性的。轴系模型为:

$$\begin{cases} T_t \frac{d\omega_t}{dt} = T_w - T_{sh} \\ T_J \frac{d\omega_r}{dt} = T_{sh} - T_r \\ \frac{d\theta_w}{dt} = (\omega_t - \omega_r) \omega_0 \end{cases} \quad (3)$$

$$T_{sh} = K\theta_w + D \frac{d\theta_w}{dt} \quad (4)$$

式中: T_t 和 T_J 分别为风力机和发电机的转动惯量; T_w, T_{sh}, T_r 分别为风力机输出机械转矩、轴系转矩和发电机转子机械转矩(标么值); ω_t 和 ω_r 分别为风力机转速和发电机转速(标么值); ω_0 为定子磁场转速,即系统同步转速(标么值取 1.0); θ_w 为轴系扭曲角度; K 为轴的刚度系数; D 为轴的阻尼系数。



D_t 为风力机的阻尼系数; D_g 为发电机的阻尼系数; T_e 为发电机电磁功率。

图 1 异步风电机组两质块模型示意图

Fig. 1 Two-mass model sketch of wind turbine with asynchronous generator

考虑到 $s = (\omega_r - \omega_0) / \omega_0$, 同时将式(4)代入式(3)得到:

$$\begin{cases} T_t \frac{d\omega_t}{dt} = T_w - K\theta_w - D[\omega_t - (s\omega_0 + 1)]\omega_0 \\ T_J \omega_0 \frac{ds}{dt} = K\theta_w + D[\omega_t - (s\omega_0 + 1)]\omega_0 - T_r \\ \frac{d\theta_w}{dt} = [\omega_t - (s\omega_0 + 1)]\omega_0 \end{cases} \quad (5)$$

1.4 异步发电机模型

异步风电机组采用异步发电机,忽略异步发电机的定子电磁暂态过程,以定子暂态电抗后电势表示的异步发电机转子电磁暂态方程^[18]为:

$$\begin{cases} \frac{dE_d'}{dt} = -\frac{X-X'}{T_0'} i_{qs} - \frac{1}{T_0'} E_d' + s\omega_0 E_q' \\ \frac{dE_q'}{dt} = \frac{X-X'}{T_0'} i_{ds} - s\omega_0 E_d' - \frac{1}{T_0'} E_q' \end{cases} \quad (6)$$

式中: $X' = \frac{\omega_0 (L_{ss} L_{rr} - L_m^2)}{L_{rr}}$; $X = \omega_0 L_{ss}$; $T_0' = \frac{L_{rr}}{R_r}$; 下标 d 和 q 分别表示 d 轴和 q 轴分量; 下标 s 和 r 分别表示定子和转子分量; L_m 为定、转子互感; L_{ss} 为定子自感; L_{rr} 为转子自感。

发电机电磁功率用电压、电流分量表示为:

$$T_e = E_d' i_{ds} + E_q' i_{qs} \quad (7)$$

根据发电机转子运动方程,有

$$T_J \omega_0 \frac{ds}{dt} = T_r - T_e \quad (8)$$

整理上述微分方程,并在其稳态运行点处线性化,得到以 $\Delta\beta, \Delta\omega_t, \Delta s, \Delta\theta_w, \Delta E_d', \Delta E_q'$ 为状态变量的异步风电机组状态方程。

2 改进的桨距角控制系统模型

对于常规的火电机组,在系统频率(即机组转速)变化时,同步发电机通过向系统增加或者减少注入功率进行调节。系统内发生低频功率振荡时同样会影响到系统频率,可以采用控制向系统注入功率多少对功率振荡进行阻尼和抑制。很多异步风电机组是采用主动失速桨距角控制方案的,文献[20]对主动失速风电机组有详细描述,对于其主动失速控制作用在文献[21]中有各种动态行为的仿真分析。本文利用这个特点在异步风电机组桨距角控制系统中增加系统频率输入量,控制风力机桨距角,使风电机组输出与系统低频功率振荡相关的阻尼功率,减小系统恢复稳定运行的时间。

要使异步风电机组实现削弱或者抑制系统功率振荡的目的,桨距角控制模块就必须在系统频率升高时调整桨距角降低风电机组功率输出,而在系统频率降低时增加风电机组功率输出。桨距角控制模型如图 2 所示。

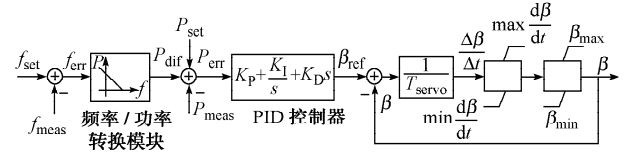


图 2 桨距角控制模型

Fig. 2 Pitch control model

图 2 中: f_{set} 为系统稳定运行频率,即桨距角控制系统的参考频率值; f_{meas} 为系统实际测量频率; 2 个频率值产生的误差信号经过频率/功率转换模块(斜率为负的线性函数)后形成了功率差值 P_{dif} ; P_{set} 为功率设置值(额定值); P_{meas} 为风电机组实际输出功率测量值; 功率调节信号 P_{err} 经过一个 PID 控制器(包括比例、积分、微分环节)形成桨距角控制参考值 β_{ref} , 输入桨距角控制系统调节风力机桨距角。PID 控制器的各控制参数对于桨距角控制系统尤为重要,需要充分考虑空气动力学特点,在风电机组不同的叶尖速比情况下,桨距角调节的速率($dP/d\theta$)是不同的,即 PID 控制器的参数需要根据叶尖速比进行调节。另外,由于风力机桨距角控制需要机械

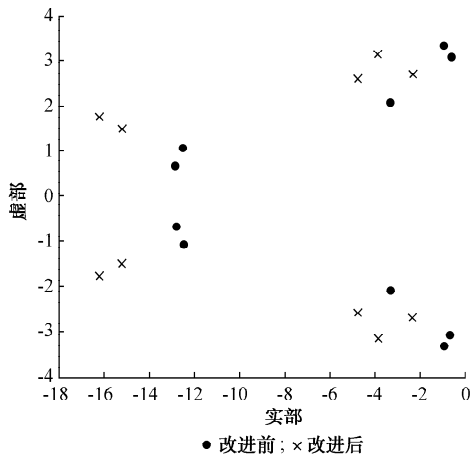


图4 桨距角控制模型改进前后特征根的变化
Fig.4 Eigenvalues with different pitch control model

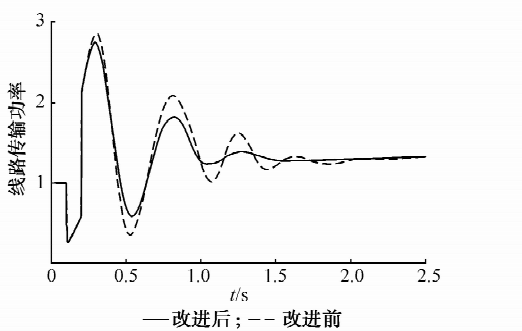


图5 桨距角控制模型改进前后功率振荡曲线

Fig.5 Power oscillation curves with different pitch control model

线路后,母线B和母线C之间仅一回线路相连,图5中曲线为传输线路BC无故障线路传输功率波动情况。采用改进的桨距角控制模型后线路功率波动平息时间较短,功率波动幅值也有所下降。采用改进后的桨距角控制模型后,从频域特征根变化及时域的线路故障仿真分析可以看出,改进后的桨距角控制模型能够增强系统阻尼,快速平息功率振荡,改善了系统动态稳定性。

5 结论

1)风电场接入电力系统后增加了与风电场强相关的振荡模式,但这些振荡模式具有很好的阻尼特性。

2)异步风电机组接入系统后虽然改变了系统的振荡模式,但是随着风电比例的增大,系统阻尼特性并没有明显改变。

3)改进的桨距角控制模型引入系统频率偏差输入信号,能够增强系统阻尼,降低低频振荡幅值,缩短低频振荡时间,改善了系统动态稳定性。

参考文献

- [1] AKHMATOV V, KNUDSEN H, NIELSEN A. Advanced simulation of windmills in the electric power supply. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 2000, 22(6): 421-434.
- [2] GUSTAFSSON M, WIJK J. Aggregation of wind park models for studies on power system dynamics in weak networks// *Proceedings of EWEA Special Topic Conference: Wind Power 21st Century*, Sep 25-27, 2000, Dublin, Germany: 89-92.
- [3] 雷亚洲. 与风电并网相关的研究课题. *电力系统自动化*, 2003, 27(8): 84-89.
LEI Yazhou. Studies on wind farm integration into power system. *Automation of Electric Power Systems*, 2003, 27(8): 84-89.
- [4] HA L T, SAJA T K. Investigation of power loss and voltage stability limits for large wind farm connections to a subtransmission network// *Proceedings of IEEE Power Engineering Society General Meeting: Vol 2*, Jun 6-10, 2004, Denver, CO, USA: 2251-2256.
- [5] SODER L. Reserve margin planning in a wind-hydro-thermal power system. *IEEE Trans on Power Systems*, 1993, 8(2): 564-571.
- [6] JENKINS N. Embedded generation: Part 2. *Power Engineering Journal*, 1996, 6(5): 233-239.
- [7] 关宏亮,迟永宁,王伟胜,等. 双馈变速风电机组频率控制的仿真研究. *电力系统自动化*, 2007, 31(7): 61-65.
GUAN Hongliang, CHI Yongning, WANG Weisheng, et al. Simulation on frequency control of doubly fed induction generator based wind turbine. *Automation of Electric Power Systems*, 2007, 31(7): 61-65.
- [8] LARSSON A. Flicker emission of wind turbines caused by continuous operation. *IEEE Trans on Energy Conversion*, 2002, 17(1): 114-118.
- [9] 迟永宁,关宏亮,王伟胜,等. SVC与桨距角控制改善异步机风电场暂态电压稳定性. *电力系统自动化*, 2007, 31(3): 95-100.
CHI Yongning, GUAN Hongliang, WANG Weisheng, et al. Enhancement of transient voltage stability of induction generator based wind farm by SVC and pitch control. *Automation of Electric Power Systems*, 2007, 31(3): 95-100.
- [10] HAGSTROM E, NORHEIM I, UHLEN K. Large scale wind power integration in Norway and effect on damping in the Nordic Grid. *Wind Energy*, 2005, 8(3): 375-384.
- [11] MENDONCA A, LOPES J A P. Impact of large scale wind power integration on small signal stability// *Proceedings of 2005 International Conference on Future Power Systems*, Nov 16-18, 2005, Porto, Portugal: 5p.
- [12] PAI M A, SEN GUPTA D P, PADIYAR K R. Small signal analysis of power systems. Harrow, UK: Alpha Science International, 2004.
- [13] 张红光,张粒子,陈树勇,等. 大容量风电场对电力系统小干扰稳定和阻尼特性的影响. *电网技术*, 2007, 31(13): 75-80.
ZHANG Hongguang, ZHANG Lizi, CHEN Shuyong, et al. Influence of large scale wind farms on power system small signal stability and damping characteristic. *Power System Technology*, 2007, 31(13): 75-80.

- [14] ROUCO L, ZMORA J L. Dynamic patterns and model order reduction in small-signal models of doubly fed induction generator for wind power applications// Proceedings of IEEE Power Engineering Society General Meeting, Universidad Pontificia Comillas, Jun 18-22, 2006, Madrid, Spain; 8p.
- [15] WU F, ZHANG X P, GODFREY K, et al. Small signal stability analysis and optimal control of a wind turbine with doubly fed induction generator. IEE Proceedings: Generation, Transmission and Distribution, 2007, 1(5): 751-760.
- [16] 汤宏, 吴俊玲, 周双喜. 包含风电场电力系统的小干扰稳定分析建模和仿真. 电网技术, 2004, 28(1): 38-41.
TANG Hong, WU Junling, ZHOU Shuangxi. Modeling and simulation for small signal stability analysis of power system containing wind farm. Power System Technology, 2004, 28(1): 38-41.
- [17] TABESH A, IRAVANI R. Small-signal dynamic model and analysis of a fixed-speed wind farm: a frequency response approach. IEEE Trans on Power Delivery, 2006, 21(2): 778-787.
- [18] KUNDUR P. Power system stability and control. New York, NY, USA; McGraw-Hill Inc, 1994.
- [19] 李光琦. 电力系统暂态分析. 北京: 水利电力出版社, 1989.
- [20] JAUCH C, HANSEN A D, SRENSSEN P, et al. Simulation model of an active-stall fixed-speed wind turbine controller. Wind Engineering, 2004, 28(23): 177-198.
- [21] SPRUCE C J. Power control of active stall wind turbines// Proceedings of European Wind Energy Conference, Feb 22, 2004, London, UK.

关宏亮(1977—), 男, 通信作者, 博士研究生, 主要研究方向: 电力系统运行、分析与控制, 风力发电及其并网技术。
E-mail: ghliang@epri.ac.cn

迟永宁(1973—), 男, 博士, 主要研究方向: 电力系统稳定性分析、风电并网对电网的影响。

戴慧珠(1939—), 女, 教授, 博士生导师, 主要研究方向: 电力系统分析与风力发电等。

Small Signal Stability and Control of Wind Turbine with Asynchronous Generator Integration into Power System

GUAN Hongliang^{1,2}, CHI Yongning², DAI Huizhu², YANG Yihan¹

(1. North China Electric Power University, Beijing 102206, China;

2. China Electric Power Research Institute, Beijing 100085, China)

Abstract: The models of conventional wind turbines with an asynchronous generator and power system are developed in DigSILENT/Power Factory. Based on the model, the impacts of wind turbines with an asynchronous generator on the small-signal stability and damping characteristics of power system are analysed. An improved pitch control scheme is presented by introducing a frequency deviation signal into the control system. When low frequency oscillation happens, the wind turbine output is regulated to correlate with system oscillation frequencies. Both frequency domain analysis and time domain simulation results demonstrate that the improved pitch control methods significantly improve the damping characteristics of power system. Therefore the power oscillations are mitigated and the system dynamic stability is enhanced effectively in the system.

Key words: wind turbine with asynchronous generator; small signal stability; pitch control; low frequency oscillation