

风电机组一次调频特性研究

郭炜¹, 孔维君², 柳伟³

(1.江苏省电力公司电力经济技术研究院,江苏南京 210008;2.南京供电公司,江苏南京 210009;
3.东南大学电气工程学院,江苏南京 210096)

摘要:针对目前流行的风力发电机组(定速风电机组和变速风电机组)的一次调频特性进行比较分析,并与常规火力同步发电机组进行比较,从而更全面地分析风电机组的一次频率控制特性。基于以上分析,设计出变速风电机组(主要针对双馈风电机组)一次调频辅助频率控制器,从而提高了变速风电机组的频率控制能力。基于PSCAD/EMTDC平台搭建仿真系统模型,对常规火电机组、定速风电机组、以及变速风电机组的调频特性进行了仿真验证和比较,证明了所设计的变速风电机组一次调频辅助频率控制器的有效性。

关键词:定速风电机组;变速风电机组;同步发电机组;一次调频;辅助频率控制器

中图分类号:TM614

文献标志码:B

文章编号:1009-0665(2013)04-0031-04

风力发电环境好、技术成熟、可靠性高、成本低且规模效益显著,但具有许多异于常规发电的特点,风电场并网运行后,出现了很多亟待解决的技术难题。大规模风电接入电网后,在向电网提供清洁能源的同时,也给电网的运行带来一些负面影响。风电场输出功率取决于风速,风速时刻都在发生变化,具有较强的随机性和间歇性^[1]。随着风电场数量和装机容量的不断增大,并网风电场风电功率波动将给电力系统安全经济运行带来诸多不利影响。尤其对于风电渗透率较高的地区,由于改变了电网原有的潮流分布、线路传输功率与整个系统的惯量,风电接入并网后系统的电压稳定性、暂态稳定性及频率稳定性都会受到较大的影响^[2]。

研究表明,在系统发生频率偏移时,定速风电机组可以释放动能为系统提供惯量支持,但目前流行的变速风力发电机组(本文主要指双馈风电机组),由于转子通过换流器与电网连接,造成转子转速与系统频率解耦,对系统的惯量没有贡献,从而无法提供一次频率控制^[3]。大规模变速风力发电接入将降低传统发电机组的运行比例,从而降低系统的总惯量和频率控制能力,这也意味着由于功率不平衡所造成的系统频率偏移将更大^[4,5]。目前,国家在鼓励风力发电入网的同时,又采用相关标准对接入地点、容量等进行限制,而随着风力发电在电网中渗透率的提高,其带来的严重惯量损失必将成为威胁电网安全和限制接入水平的关键因素^[6]。因此有必要对变速风电机组、定速风电机组、以及常规火电同步发电机组的调频特性进行比较,从而深入了解各类机组的调频特性,进而采取相应的措施来提高各类风电机组对系统有功功率和频率的控制能力,减小风电接入对电力系统的冲击,

对提高风电接入水平具有重要意义^[7,8]。

1 风电机组一次调频特性

1.1 变速与定速风电机组比较

在电网发生频率大幅度降低的事故时,系统的惯量对于频率降低的变化率起到了决定作用,即惯量越低,系统频率降低越快。在一定负荷情况下,不同类型的风电机组并网运行时,势必会取代部分常规发电机组,给系统的惯量带来较大的冲击。因此有必要对不同类型的风电机组的频率响应特性予以研究,以期找到合理有效的频率控制方法,提高系统运行的稳定性与可靠性。随着风力发电技术的发展,风力发电机的一次调频特性受到关注。大量文献研究各类风机的惯量反应和调频特性,文献[9,10]比较了定速风电机组和变速风电机组发生频率偏移时的频率响应特性。研究表明,当系统发生功率不平衡扰动导致频率偏移时,定速风电机组与变速风电机组表现出不同的频率响应特性。

(1) 定速风电机组。当系统发生频率偏移时,能够释放储存在风机叶片中的动能,为系统提供频率支撑;其工作原理是当电网频率发生变化时,转差出现变化,电枢反应跟着变化,因而机组与电网交换的有功与无功发生变化。同时因力矩的不平衡,异步电机转速将发生变化,最终达到稳定的转差率,功率交换也达到稳定值。

(2) 变速风电机组。其转子通过换流器与电网连接,造成转子转速与系统频率解耦,对系统的惯量没有贡献,也无法为一次频率控制提供支撑;由于变速风电机组采用了电力电子变换器,实现了机械功率与系统电磁功率的解耦控制,也因此失去了对频率的快速有效响应,导致其旋转动能对整个系统的惯量几乎没有贡献。

1.2 变速风电机组与常规火电机组比较

变速风电机组与常规火电机组惯量反应和频率响

应特性有很大区别^[11]。系统频率下降时,变速风电机组与常规火电机组频率响应特性对比曲线如图1所示。其中,变速风电机组安装有附加一次频率控制环节,可以通过降低转子转速释放转子叶片中的部分转子动能提供频率支撑;常规火电机组安装有调速器,在频率下降时能增大有功出力提供频率支撑。

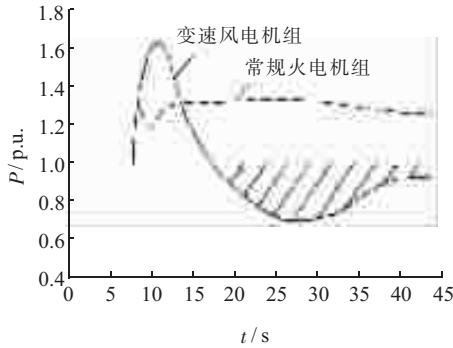


图1 频率响应特性比较

由图1中曲线看出,火电机组由于调速器动作增加原动机输入,提供持续的额外有功支撑,但响应有一定的延时;而安装附加转子控制环的变速风电机组对于频率变化可以做出快速响应,但转子转速需要一定的恢复过程,如图中阴影部分,根据能量守恒原理,风电机组转子转速需要一段过程才能恢复到最佳运行状态。由此可知,变速风电机组频率控制特性与常规火力发电机组相比具有一些不同之处^[12]:

(1) 快速性,即当控制系统有功参考值发生变化时,变速风电机组输出的有功功率能快速跟踪其变化;

(2) 暂态性,由于变速风电机组是通过调整转子转速,释放或吸收转子部分动能,改变其有功输出,而并不能调整原动机的输入变化,因此只能提供短暂的有功支撑。

2 变速风电机组一次调频辅助频率控制器

双馈变速风电机组一般运行在最大风能追踪控制模式下,输出的有功功率已经达到可利用风能的最大值。当系统发生功率扰动频率下降时,双馈风电机组无法增加原动机的出力为系统提供频率支持。而双馈风电机组控制系统实现了变转速运行,其转子转速的运行变化空间较大,可从风速较大时的超同步运行,转速为 $\omega=1.2$ p.u.到风速较低时次同步运行,转速为 $\omega=0.7$ p.u.运行。假设转子转速从 ω_0 变为 ω_1 ,频率从 f_0 变为 f_1 ,转子释放的动能为: $\Delta E = H(\omega_0^2 - \omega_1^2)$,其中, H 为惯性时间常数。如此,双馈风电机组最大可以提供转子约60%的动能,常规火电机组转子转速运行范围仅为0.95~1.00 p.u.,仅能提供转子约9.75%的动能。当双馈风电机组在电网中渗透率较高时,其转子动能对系统转动惯量的贡献不容忽视。因此双馈风电机组通过

调整转子转速释放或吸收转子部分转子动能参与一次频率控制^[13,14]。

通过设计频率附加控制环,控制双馈风电机组的转子动能,使双馈发电机组也能够像常规发电机一样参与系统一次频率调制,其附加辅助频率控制器结构如图2所示。

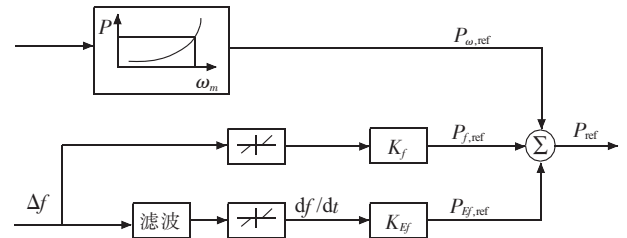


图2 辅助频率控制器结构

频率附加控制环可以用方程式描述:

$$\begin{cases} P_{f,ref} = K_f \Delta f \\ P_{Ef,ref} = K_{Ef} \frac{d\Delta f}{dt} \\ P_{D,ref} = P_{f,ref} + P_{Ef,ref} = K_f \Delta f + K_{Ef} \frac{d\Delta f}{dt} \end{cases} \quad (1)$$

式(1)中: K_f 和 K_{Ef} 分别为频率偏差和偏差变化率的比例系数; $P_{D,ref}$ 为附加控制得到的功率参考值增量; P_{ref} 为系统总的功率参考值。

为进一步研究含双馈风电机组系统的惯量反应特性,假设 P_C 为系统中常规发电机的功率输出; P_D 为双馈风力发电机组的功率输出; P_L 为负载有功功率; P_C 为与相邻系统间交换的功率; P_A 为总功率缺额。在稳定状态,功率平衡方程为:

$$P_A = P_C + P_D + P_C - P_L \quad (2)$$

假设风力发电机功率参考 P_{ref} 和实际输出功率 P_D 之间不存在动态交换,则有:

$$P_D = P_{D,ref} - P_D^0 \quad (3)$$

式(3)中: P_D^0 是频率变化之前的输出功率。

则总功率缺额与频率偏差及频率偏差变化率之间的关系可表示为:

$$2H \frac{d\Delta f}{dt} = P_A - D\Delta f = P_C + P_D + P_C - P_L - D\Delta f \quad (4)$$

$$(2H + K_f) \frac{d\Delta f}{dt} = P_C + P_D^0 + P_C - P_L - (D + K_{Ef}) \Delta f \quad (5)$$

式(4,5)中: H 为系统的惯量时间常数; D 为系统阻尼。

根据式(5)可知,系统附加频率控制,将改变双馈风电机组的等效惯性,系统等效惯性由 H 变为 $H + K_f/2$,增加的等效惯性值由 K_f 决定。因此,控制频率偏差比例参数 K_f 在一定范围内变化即可改变系统的等效惯性, $K_f > 0$ 时提高系统惯性, $K_f < 0$ 时降低系统惯性。

3 仿真分析

3.1 调频特性比较

选 4 机 2 区域系统作为研究对象,基于 PSCAD 平台搭建仿真模型,对风机一次调频特性进行仿真分析。

(1) 比较同步电机、定速风电机组及双馈风电机组的一次调频特性;

(2) 分别对转子动能控制、备用功率控制、普通联合控制及模糊联合控制进行仿真分析,比较各控制策略的调频特性。

仿真所使用的系统为 4 机 2 区域系统。仿真所用系统包括同步电机 4 台,容量分别为 150 MW;风电场 1 个,采用集中式并网方式接入系统,接入点位于区域 1 同步电机 G2 母线侧。如图 3 所示。风电场总输出容量为 120 MW;总负荷为 720 MW。

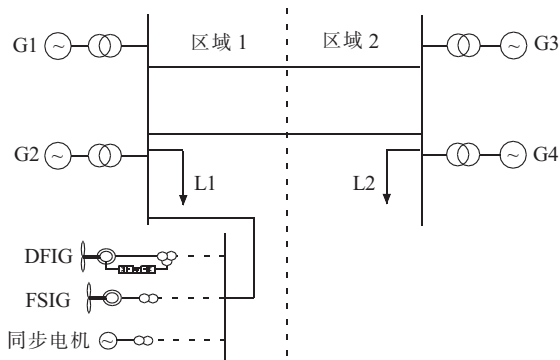


图 3 仿真系统

系统在 5 s 时,同步电机 G2 由于失步故障退出运行,分析此时系统频率变化情况。仿真区域风速均采用额定风速,分别对以下 3 种情况进行仿真分析:

(1) 120 MW 风电场由一台相同容量的同步电机代替;

(2) 风电场由定速风电机组组成;

(3) 风电场由双馈风电机组组成。

在 PSCAD 中搭建 4 机 2 区域系统仿真模型,并分别搭建定速风电机组定速风电机组仿真模型、变速风电机组双馈风电机组仿真模型以及同步发电机组仿真模型,如图 3 所示。3 种不同类型机组的系统频率变化曲线如图 4 所示。

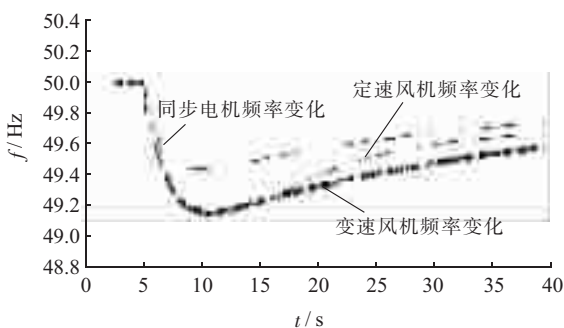


图 4 不同电机的频率变化规律

由图 4 可知,仿真分析结果证明在系统发生有功缺失故障时,双馈风电机组由于解耦控制,失去了对频率的快速有效响应,无法参与一次调频,相比常规同步电机和定速风电机组,频率跌落最严重。

3.2 辅助调频控制效果

针对双馈风电机组,采用辅助频率控制器,分析使用辅助频率控制策略前后系统频率变化曲线的差别,详细结果如图 5 所示。

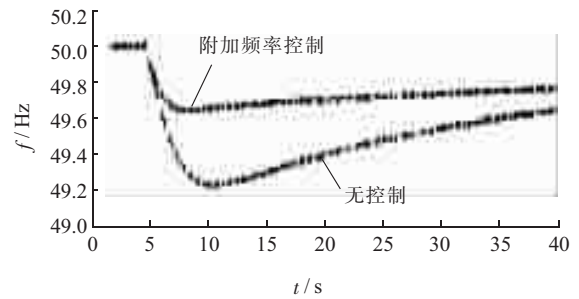


图 5 不同控制策略下频率变化曲线

由图 5 可知,采用辅助频率控制策略后,双馈风电机组能够参与系统一次调频,当系统发生频率偏移时,可释放储存在叶片中的转子动能来提供频率支撑,因此相比未使用该控制策略,其频率控制曲线明显改善,最低频率由 49.2 Hz 提高到 49.62 Hz,大于低频减载阈值 49.5 Hz,无需采取低频减载措施即可稳定运行。

4 结束语

基于 PSCAD/EMTDC 平台分别建立常规火电机组模型、定速风电机组模型以及变速风电机组模型,针对 3 种不同类型电源接入情况下,仿真分析了变速风电机组与常规火电机组和定速风电机组调频特性差异。仿真结果表明:在系统发生有功缺失故障时,变速风电机组由于解耦控制,失去了对频率的快速有效响应,无法参与一次调频,相比常规同步电机和定速风电机组,频率跌落最严重,且稳态频率最低。同时设置了一次调频辅助频率控制器,实验结果验证了其有效性。对于未来,风机一次调频还需要在以下几个方面展开深入研究:

(1) 研究变速风机与常规发电机的协调调频控制策略;

(2) 现有的变速风电机组的调频研究多集中在双馈风电机组,研究适用于直驱永磁同步风电机组的调频控制策略;

(3) 研究基于轻型直流输电并网的一次调频控制技术。

参考文献:

- [1] 雷亚洲. 与风电并网相关的研究课题[J]. 电力系统自动化, 2003, 27(8): 84-89.
- [2] 关宏亮, 迟永宁, 王伟胜, 等. 双馈风电机组频率控制的仿真研

- 究[J]. 电力系统自动化, 2007, 31(7): 61-65.
- [3] CHINCHILLA M, ARNALTES S and BURGOS J C. Control of Permanent Magnet Generators Applied to Variable-speed Wind-energy Systems Connected to the Grid [J]. IEEE Trans. Energy Convers., 2006, 21(1): 130-135.
- [4] 柳 伟, 顾 伟, 孙 蓉, 等. DFIG-SMES 互补系统一次调频控制 [J]. 电工技术学报, 2012, 27(9): 108-116.
- [5] 马竹梧, 柳 伟, 王功胜. 变频技术与装置应用若干问题的探讨 [J]. 电气应用, 2011, 30(24): 16-19.
- [6] RODRIGUEZ A J L, ARNALTE S, BURGOS J C. Automatic Generation Control of a Wind Farm with Variable Speed Wind Turbines [J]. IEEE Trans. Energy Convers. 2002, 17(2): 279-284.
- [7] LALOR G, MULLANE A, O'MALLEY M J. Frequency Control and Wind Turbine Technologies [J]. IEEE Trans. Power Syst. 2005(20): 1903-1913.
- [8] MAURICIO J M, MARANO A, GOMEZ E A, et al. Frequency Regulation Contribution Through Variable-speed Wind Energy Conversion Systems [J]. IEEE Trans. Power. Syst. 2009, 24(1): 173-180.
- [9] HOLDSWORTH L, EKANAYAKE J B, JENKINS N. Power System Frequency Response from Fixed Speed and Doubly Fed induction Generator-based Wind Turbines [J]. Wind Energy, 2004, 07(1): 21-35.
- [10] EKANAYAKE J, JENKINS N. Comparison of the Response of Doubly Fed and Fixed-Speed Induction Generator Wind Turbines to Changes in Network Frequency [J]. IEEE Trans. Energy Convers, 2004, 19(4): 800-802.
- [11] 曹 军, 王虹富, 邱家驹. 双馈恒频风电机组频率控制策略 [J]. 电力系统自动化, 2009, 33(13): 78-82.
- [12] KEUNG P K, LI P, BANAKAR H, et al. Kinetic Energy of Wind Turbine Generators for System Frequency Support [J]. IEEE Trans. Power Syst., 2009, 24(1): 279-287.
- [13] KAYIKCI M, MILANOVIC J. Dynamic Contribution of DFIG-based Wind Plants to System Frequency Disturbances [J]. IEEE Trans. Power Syst, 2009, 24(2): 859-867.
- [14] MORREN J, HAAN S W H, KLING W L, et al. Wind Turbines Emulating Inertia and Supporting Primary Frequency Control [J]. IEEE Trans. Power. Syst, 2006, 21(1): 433-434.

作者简介:

郭 炜(1978), 女, 河北保定人, 硕士研究生, 研究方向为电力系统稳定和微电网;

孔维君(1988), 女, 江苏淮安人, 硕士研究生, 研究方向为电力系统稳定和电力系统运行控制;

柳 伟(1985), 男, 江苏泰兴人, 博士研究生, 研究方向为可再生能源、微电网和电力系统运行控制。

Research on Primary Frequency Regulation Characteristic of Wind Turbine

GUO Wei¹, KONG Wei-jun², LIU Wei³

(1. Electric Power Economic and Technological Research Institute of Jiangsu Electric Power Corporation, Nanjing 210008, China; 2. Nanjing Power Supply Company, Nanjing 210009, China; 3. Southeast University, Nanjing 210096, China)

Abstract: The frequency control abilities of the Fixed Speed Induction Generator (FSIG), Variable Speed Induction Generator (VSIG) and the synchronous generator are compared and studied to achieve a more comprehensive analysis of frequency control characteristic of different kinds of wind turbines. Based on the above analysis, an auxiliary frequency controller is designed for variable speed wind turbine to improve the frequency control ability of variable speed induction generator. Simulation about the frequency control abilities of different generators is carried out on PSCAD/EMTDC platform, verifying the effectiveness of the auxiliary frequency controller.

Key words: FSIG; VSIG; synchronous generator; primary frequency control; auxiliary frequency controller

(上接第 30 页)

The Connection Mode and Operation of DC Power System Based on Li-ion Batteries in Transformer Substation

HUA Sheng¹, PAN Xiao-ming¹, KAN Jian-fei², YU Shi-qing²

(1. Suzhou Power Supply Company, Suzhou 215004, Jiangsu, China;

2. Nanjing Institute of Technology, Nanjing 211167, China)

Abstract: The traditional connection mode of DC power system in transformer substation is unsuitable when the backup power is based on LiFePO₄ batteries. The new connection mode of DC power system which separates power supply bus from batteries charge bus using an instant switch is proposed in this paper to resolve that problem. Besides, the operation of DC system under new connection mode is discussed. The data of experiment has proved that the new connection mode is feasible.

Key words: substation; LiFePO₄ batteries; DC system; connection mode