

基于飞轮储能的并网风电功率综合调控策略

刘世林¹, 文劲宇², 高文根¹, 江 明¹

(1. 安徽工程大学 检测技术与节能装置安徽省重点实验室, 安徽 芜湖 241004;

2. 华中科技大学 强电磁工程与新技术国家重点实验室, 湖北 武汉 430074)

摘要: 为了使储能系统在抑制风电功率波动的同时能够响应电网频率的变化, 提出一种基于飞轮储能(FESS)的风电功率综合调控策略。在分析同步发电机电网频率响应过程的基础上, 设计了飞轮储能的功率控制器结构, 并对其参数进行配置。在 MATLAB/Simulink 环境下进行了数字仿真研究, 结果表明, 所提出的控制策略能够使风电出力具有类似于同步发电机的惯量响应特性, 同时使飞轮储能可以在功率控制和频率控制 2 种工作模式下灵活切换, 从而有效改善风电功率的并网特性。

关键词: 风电; 功率波动; 飞轮储能; 功率控制; 频率控制; 虚拟惯量

中图分类号: TM 712; TM 734; TM 614 **文献标识码:** A **DOI:** 10.16081/j.issn.1006-6047.2015.12.005

0 引言

风电功率具有强波动性和不确定性, 且在现有风机控制策略下几乎不响应电网频率的变化。因此, 在高渗透率风电接入情况下, 为了实现电力系统的有功实时平衡, 保证供电的充裕性、可靠性和电能质量, 往往需要大量的旋转备用, 从而影响了电网运行的经济性^[1-2]。同时, 大规模风电并网导致电网惯量降低的问题也正在引起高度关注^[3], 风机制造厂家已在开发风机的惯量控制模块, 以响应电网频率的动态变化。如何减小风电功率波动, 且使其具有类似于常规机组的电网频率响应能力, 以增强风电功率的电网友好性, 是风电可持续、大规模发展的重要课题。

当前, 在风电机组功率调控方面已有较多研究, 大致可归纳为 2 种途径, 其一是风电机组本身的控制^[4-5], 其二是利用储能技术^[6-7]。第一种途径的实现方法主要包括风机转子动能控制、备用功率控制和联合控制(即将前 2 种方法联合应用)3 种。该方法几乎不需要额外的硬件投入, 可以减少投资成本, 但是存在控制器设计复杂、风能利用率降低、风机机械疲劳增加等不足^[8]。同时, 这类方法宜于在风机设计制造时实现, 对于已投运的机组改造成本则会很高, 可操作性较差。

快速储能装置以电力电子作为能量转换接口,

具有快速的功率响应能力, 能够实现功率的双向调节。利用储能对并网风电功率进行调控, 能够获得相对更好的功率特性和经济性, 储能技术的快速发展为增强风电功率可控性提供了一条有效途径^[9]。目前, 利用储能提高风电功率特性方面的研究, 多集中在抑制风电功率波动方面^[10-11], 而在参与电网一次调频^[6], 尤其是风电虚拟惯量控制方面的研究尚少。

飞轮储能 FESS(Flywheel Energy Storage System)相对于其他储能方式而言, 具有无污染、长寿命、效率高、易于安装与维护等优点, 近年来在电力系统领域得到广泛研究和应用^[12-14]。例如, 文献[15]研究了将 FESS 与风电机组并联运行, 设计了相应的功率控制策略, 以抑制风电功率的波动, 并通过实验对控制策略的有效性进行验证; 文献[16-17]提出了 FESS 辅助的风电机组功率和频率综合控制策略, 研究在利用 FESS 抑制风电功率波动的同时, 能够响应电网的一次调频需求。但是, 上述文献均未讨论利用储能进行风电虚拟惯量控制问题。

本文提出一种新型的利用 FESS 改善并网风电功率特性的综合控制策略, 使 FESS 在抑制风电功率波动的同时, 可以响应电网频率的变化, 虚拟出类似于常规机组的惯量响应特性, 并可以灵活切换到频率控制模式下, 参与电网的一次调频, 从而有效减小风电并网对电网频率稳定的负面影响。

1 基于 FESS 的风电功率综合调控系统结构

由于受到储能成本的约束, 在满足风电功率调控目标的前提下, 尽可能地减小容量配置对于储能技术的规模化应用具有重要意义。考虑到风电场出力相对于单台风机出力具有“平滑效应”, 本文将 FESS 配置于风电场出口交流母线处, 从而一定程度

收稿日期: 2014-11-27; 修回日期: 2015-09-28

基金项目: 安徽省自然科学基金资助项目(1508085MA74); 安徽省科技攻关计划项目(1301022045); 安徽工程大学博士科研启动基金资助项目(S031502001)

Project supported by the Natural Science Foundation of Anhui Province(1508085MA74), the Key Technology Research and Development Program of Anhui Province(1301022045) and Doctoral Foundation of Anhui Polytechnic University(S031502001)

上减小所需的储能容量。基于 FESS 的风电功率综合调控系统结构如图 1 所示。

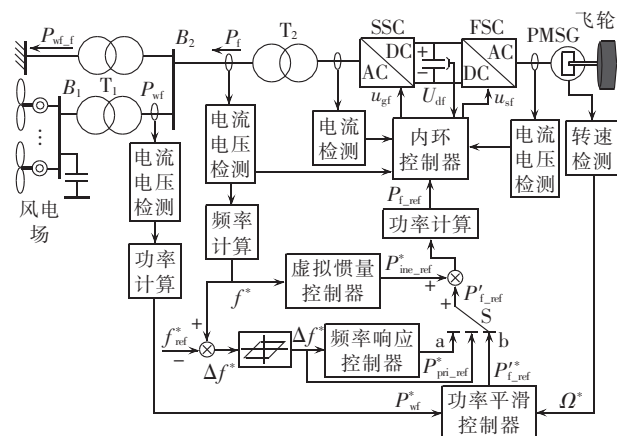


图 1 基于 FESS 的风电功率综合调控系统结构

Fig.1 Structure of comprehensive wind power control system based on FESS

在图 1 所示模型中, FESS 通过 AC/DC/AC 双向功率变换器(由系统侧变换器(SSC)和飞轮侧变换器(FSC)构成)和升压变压器 T_2 接在风电场出口交流母线 B_2 处, 多台风机通过汇流母线 B_1 和升压变压器 T_1 也接在母线 B_2 处, 两者并联后经过二次升压接入大电网。其中, FESS 采用基于永磁同步电机的 FESS 等效模型^[18], 而风电场则由 DFIG 风电机组构成。由于 FESS 和 DFIG 风电机组的数学模型已有很多文献述及, 本文不再赘述, 仅对其控制系统模型进行讨论。

2 FESS 控制系统设计

2.1 总体控制目标及工作原理

对于配置有 FESS 的风电场而言, 可以将两者看作一个整体电源(WF-FESS)向电网馈电。如前所述, 为了提高风电功率的可控性, FESS 对风电功率调控的目标是: 在抑制风电功率波动的同时, WF-FESS 对电网频率的响应特性与常规同步发电机类似, 从而虚拟出风电的惯量特性和一次调频响应过程, 提高风电的负荷跟踪能力。

如图 1 所示, FESS 的控制系统主要由虚拟惯量控制、频率响应控制和功率平滑控制 3 个模块组成。虚拟惯量控制模块以电网频率信号作为输入, 通过控制器设计使 WF-FESS 对外表现出类似于同步发电机惯量的频率响应特性, 从而增大整个电力系统的惯量, 使电力系统在负荷波动引起频率变化时, 频率的变化速度变慢, 有利于电网频率稳定。功率平滑控制和频率响应控制 2 种工作模式可以互相切换, 其取决于选择开关 S 的位置。一般情况下, 电网频率能够维持在规定的频率上下限范围内, 此时控制系统工作于功率平滑控制模式(选择开关 S 处

于 b 位置), FESS 主要用于抑制风电功率波动; 而当电网频率越限时, 控制系统切换到一次调频控制模式(选择开关 S 处于 a 位置), 从而使 FESS 响应电网频率的变化, 参与一次调频过程, 帮助电网频率恢复。当频率恢复到允许的范围后, FESS 重新切换到平滑功率控制模式下工作, 在抑制风电功率波动的同时, 调整 FESS 荷电状态, 使其尽可能保持在合适的荷电状态下。

2.2 虚拟惯量控制器设计

为了使 WF-FESS 具有与相同容量同步发电机类似的频率响应特性, 首先对同步发电机的惯量响应过程进行分析。

对于同步发电机, 在转速 ω 下, 存储在转子中的动能 E_k 可表示为:

$$E_k = \frac{1}{2} J \omega^2 \quad (1)$$

如果 ω 变化, 那么释放的功率 ΔP_k 可以表示为:

$$\Delta P_k = \frac{dE_k}{dt} = \frac{1}{2} J \times 2\omega \frac{d\omega}{dt} = J\omega \frac{d\omega}{dt} \quad (2)$$

其中, J 为转子的机械转动惯量。在电力系统分析中, 惯性常数可表示为^[19]:

$$H = \frac{J\omega_s^2}{2S_{base}} \quad (3)$$

其中, ω_s 为同步角速度; S_{base} 为发电机的额定容量。

将式(3)代入式(2), 则有:

$$\frac{\Delta P_k}{S_{base}} = 2H \frac{\omega}{\omega_s} \frac{d(\omega/\omega_s)}{dt} \quad (4)$$

上式用标么值可表示为:

$$\Delta P_k^* = 2H\omega^* \frac{d\omega^*}{dt} = 2Hf^* \frac{df^*}{dt} \quad (5)$$

其中, ΔP_k^* 、 ω^* 、 f^* 分别为发电机的功率、转速和频率的标么值。式(5)表示同步发电机转子存储的动能参与电力系统频率调整的功率响应过程。

根据上述分析, 设计的虚拟惯量控制器结构如图 2 所示。控制器以电网频率 f^* 为输入, 以用于惯量响应的 FESS 功率指令值 $P_{ine_ref}^*$ 为输出, 包括 2 个控制环节, 第 1 环节按式(5)设计, 用于实现模拟同步发电机转动惯量响应; 第 2 环节是一个比例-微分相位补偿环节, 为了补偿由 FESS 的功率响应过程引起的相位滞后。

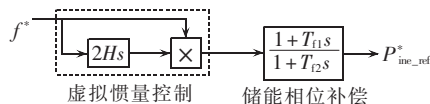


图 2 虚拟惯量控制器

Fig.2 Controller of virtual inertia

该控制器中, 参数 H 可取与同步发电机一致的 5~10 s, 本文取 10 s; 相位补偿环节的时间常数 T_{11} 、 T_{12} 可用留数法或优化算法求取。但是, 由于 FESS 的

响应速度很快,时间常数 T_{n1} 、 T_{n2} 相对于 H 很小,一般情况下可以不考虑相位滞后的影响。

2.3 一次调频控制器设计

当电力系统中有功功率不平衡时,会导致频率偏离额定值。为了使频率恢复到正常允许偏差范围内,发电机组的调速器会动作,调整原动机的机械功率,从而改变发电机的出力,使系统有功供需重新达到平衡。调速器的这种响应特性可以用调差特性表示(标幺值形式):

$$\Delta P_G^* = -K_G^* \Delta f \tag{6}$$

其中, ΔP_G^* 为电网频率变化时发电机一次调频功率的参考值; K_G^* 为功/频静态特性系数; Δf 为频率变化量;负号表示调频功率的变化方向和频率变化方向相反。

为了模拟同步发电机的一次调频特性,设计的频率响应控制器如图 3 所示。该控制器由死区环节、高通滤波环节和比例环节构成,其输入为电网频率变化量 Δf^* (根据系统频率期望值 f_{ref}^* 和实时反馈值 f^* 求取得到),输出为用于一次调频响应的 FESS 功率指令值 $P_{pri_ref}^*$ 。死区环节可以根据电网频率偏差的程度,激活或退出 FESS 的频率响应模式,本文设置为 ± 0.2 Hz;高通滤波器环节通过设置合适的时间常数 T_H ,能够阻断频率偏差的稳态信号,使得一次频率调整过程仅仅响应动态频率偏差信号,而对稳态频率差信号失效;比例环节 K_G^* 则为了模拟同步发电机一次调频的下垂控制过程,使电网中的多台并联工作发电机能够按合适的比例参与频率控制。

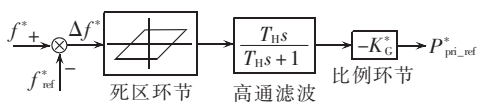


图 3 一次频率控制器
Fig.3 Controller of primary frequency

2.4 功率平滑控制器设计

为了抑制风电功率波动,同时维持 FESS 的荷电状态在允许的范围内,本文采用模糊推理的方法确定 FESS 的输出功率参考值。模糊推理的输入为风电功率 P_{wf}^* 和飞轮转速 Ω^* ,输出为 FESS 工作于平滑功率模式时的功率指令值 $P_{f_ref}^*$,其原理如图 4 所示。具体设计过程可参考文献[20],限于篇幅,此处不再赘述。

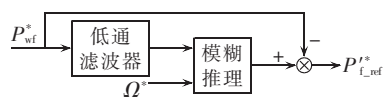


图 4 模糊推理原理图
Fig.4 Schematic diagram of fuzzy reasoning

3 仿真分析

3.1 仿真系统模型

为了验证本文所提出综合控制策略的有效性,在 MATLAB/Simulink 环境下建立了含 DFIG 风电接入的简单电力系统模型,如图 5 所示。

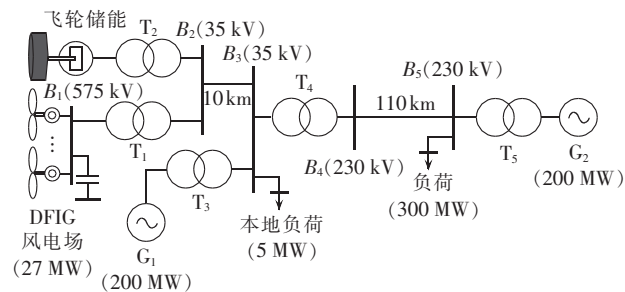


图 5 仿真系统模型
Fig.5 Power system model for simulation

该模型中风电场的机端电压为 575 V,经升压变压器 T_1 升至 25 kV,与飞轮储能系统相并联,再经过 10 km 低压输电后与同步发电机 G_1 并联,在经过 T_4 升至 230 kV 后,经过 110 km 输电线路给恒功率负荷供电;负荷侧也有一同步发电机 G_2 。风电场由 18 台额定容量为 1.5 MW 的 DFIG 风机构成,2 台同步发电机组的额定功率均为 200 MW, FESS 的功率为 20 MW、容量为 5 MW·h,本地负荷为 5 MW,负荷的初始容量为 300 MW,其他参数如图 5 中标注所示。

3.2 虚拟惯量控制仿真

为了观察风电场转动惯量对电网频率稳定的影响,将对没有 FESS、FESS 分别工作于功率平滑控制模式和虚拟惯量控制模式 3 种情况下,风电场对电网频率变化响应的情况进行考察。首先使图 5 所示仿真系统工作于风速为 12 m/s 的稳态下,然后在 5 s 时刻,使原有负荷增加 10 MW 作为扰动,从而观察系统中相关状态的响应情况。

图 6(a)是系统频率分别 在无 FESS、功率平滑控制模式和虚拟惯量控制 3 种情况下的响应曲线,从图中可以看出,在有虚拟惯量控制情况下,系统频率变化有明显改善,最低频率由 48.785 Hz 提高到 48.921 Hz,有效改善了频率的稳定性。同时,仿真结果也表明了功率平滑控制对于改善电网频率的效果并不明显。虚拟惯量控制和功率平滑控制过程中,对应的 FESS 功率响应如图 6(b)所示。图 6 (c)是同步发电机 G_1 的出力情况,从图中可以看出,在负荷扰动过程中,FESS 参与频率响应可以一定程度上减小同步发电机的出力调整幅度和调整时间。

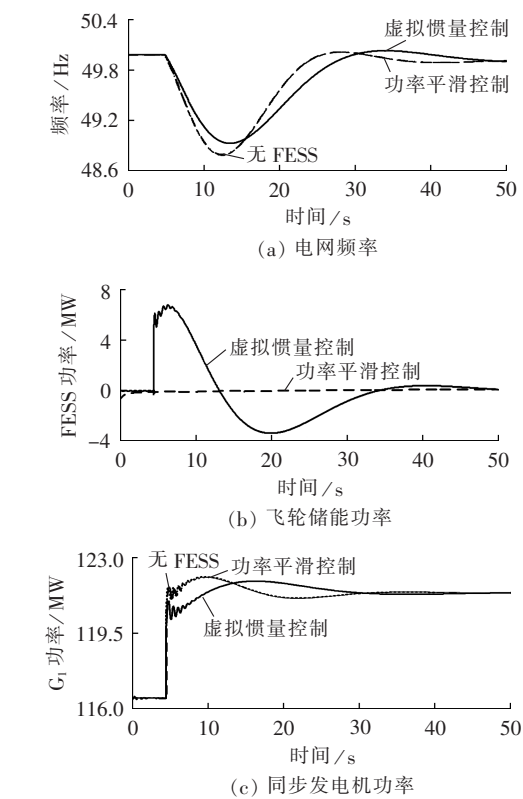


图 6 虚拟惯量控制仿真结果

Fig.6 Simulative results of virtual inertia control

3.3 平滑功率控制模式仿真

为了验证所设计的功率平滑控制器的运行效果,使 FESS 工作于功率平滑控制模式下,并且假设风电场中的各台风机都同时受到图 7 所示风速的驱动(不考虑风机空间位置对出力的影响)。从图 7 可以看出,风速在 6.2~16.2 m/s 范围内大幅度波动,从而导致风电场出力波动剧烈(如图 8(a)中虚线所示)。

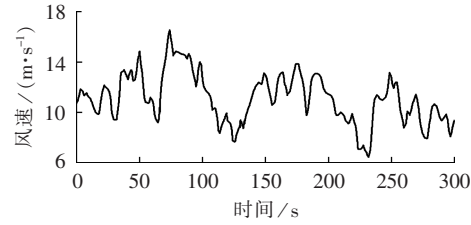


图 7 风速曲线

Fig.7 Curve of wind speed

如图 8(a)所示,实线为加入 FESS 后风电场和 FESS 的联合功率,可以看出 FESS 在功率控制模式下,能够明显改善馈入电网的功率波动。FESS 参与功率调控过程中,其功率和转速变换情况分别如图 8(b)、(c)所示。由图可以看出,由于采用本文设计的模糊控制器,飞轮的功率和转速一直保持在额定工作范围内。图 8(d)是系统的频率变化情况,从图中可以看出,虽然由于 FESS 的功率平滑作用,一

定程度上减小了风电功率对电网的冲击,但仍然出现了电网频率越限(± 0.5 Hz)的情况。

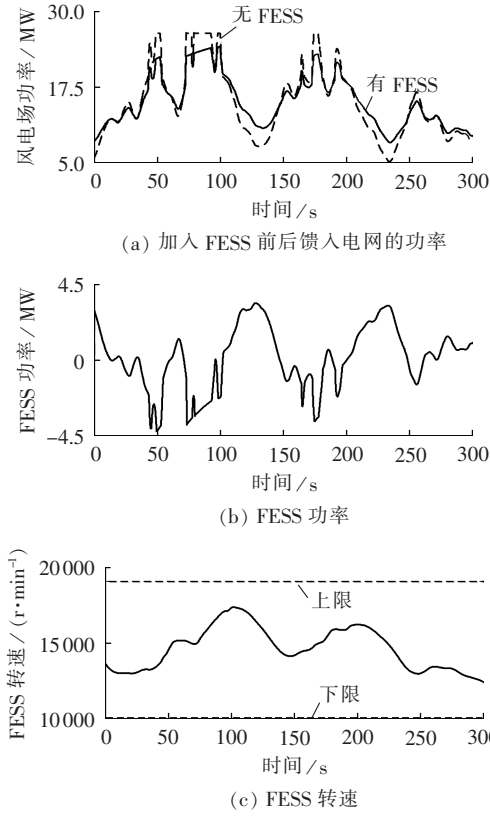


图 8 平滑功率控制模式下的仿真结果

Fig.8 Simulative results of power-smoothing control mode

3.4 综合功率控制

为改善电网的频率特性,应用本文提出的基于 FESS 的风电功率综合控制策略,对系统进行仿真分析。仿真中使风电场同样工作于图 7 所示的风速下,仿真结果如图 9 所示。图 9(a)是电网的频率变化曲线,从图中可以看出,采用功率综合控制策略后,功率平滑控制(M2)和频率控制(M1)2 种模式能够灵活切换,从而使电网频率被较好地限制在允许范围内。图 9(b)是风电场功率变化情况,图 9(c)是控制过程中 FESS 的功率,图 9(d)是对应的飞轮转速。

需要说明的是,从图 9(d)中可以看出,飞轮转速出现了一定程度的越限情况,原因是 FESS 工作在频率控制模式时,为了给电网提供足够的功率支撑,图

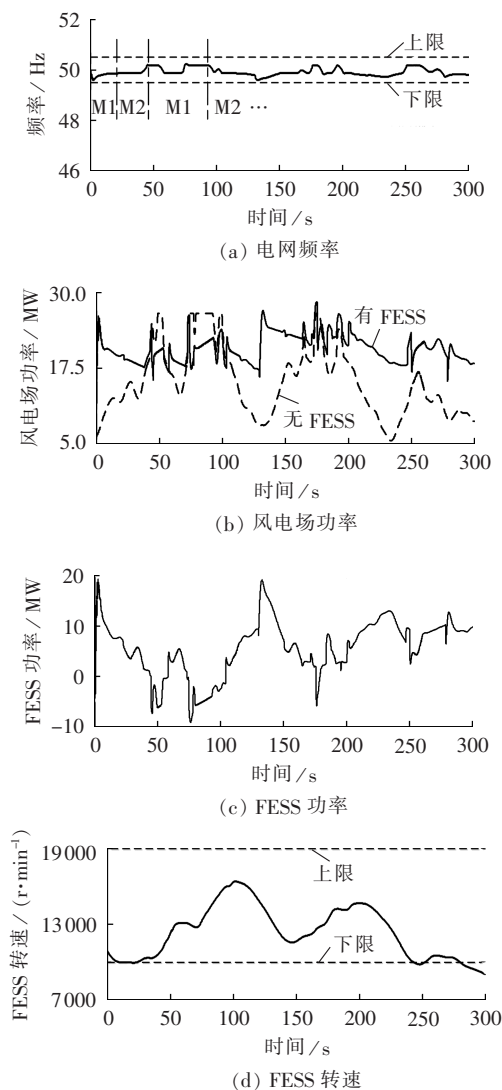


图 9 综合控制模式下的仿真结果

Fig.9 Simulative results of comprehensive control mode

4 所示的模糊推理模块不再发挥作用,从而使转速失去约束所致;而当切换至功率控制模式下,飞轮转速又会逐渐回到适当的范围内。当然,若出现极端情况(如大机组非计划故障退出),则须采用低频减载等措施以维持电网频率的稳定。

4 结论

本文研究了利用 FESS 改善并网风电功率特性的控制方法,提出了一种风电功率综合控制策略,可以使 FESS 在平滑风电功率波动的同时能够响应电网频率的变化。在分析同步发电机惯量特性和电网频率响应过程的基础上,设计了由虚拟惯量控制、频率响应控制和功率平滑控制 3 个模块组成的 FESS 综合功率控制器。仿真研究表明,所提控制策略能够虚拟出风电系统的转动惯量,同时使 FESS 可以在平滑功率控制和频率响应控制 2 种工作模式下无缝灵活切换,从而取得了较好的功率调控效

果,一定程度上增强了风电的电网友好性。

参考文献:

- [1] 张丽英,叶廷路,辛耀中,等. 大规模风电接入电网的相关问题及措施[J]. 中国电机工程学报,2010,30(25):1-9.
ZHANG Liying, YE Tinglu, XIN Yaozhong, et al. Problems and measures of power grid accommodating large scale wind power [J]. Proceedings of the CSEE, 2010, 30(25): 1-9.
- [2] 刘世林,文劲宇,孙海顺,等. 风电并网中的储能技术研究进展[J]. 电力系统保护与控制,2013,41(23):145-153.
LIU Shilin, WEN Jinyu, SUN Haishun, et al. Progress on applications of energy storage technology in wind power integrated to the grid [J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(23): 145-153.
- [3] 李和明,张祥宇,王毅,等. 基于功率跟踪优化的双馈风力发电机组虚拟惯性控制技术[J]. 中国电机工程学报,2012,32(7):32-39.
LI Heming, ZHANG Xiangyu, WANG Yi, et al. Virtual inertia control of DFIG-based wind turbines based on the optimal power tracking [J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(7): 32-39.
- [4] MOKADEM M E, COURTECUISSE V, SAUDEMONT C, et al. Fuzzy logic supervisor-based primary frequency control experiments of a variable-speed wind generator [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2009, 24(1): 407-417.
- [5] 薛迎成,邵能灵,宋凯,等. 变速风力发电机提供调频备用容量研究[J]. 电力自动化设备,2010,30(8):75-80.
XUE Yingcheng, TAI Nengling, SONG Kai, et al. Variable speed wind turbines provide primary reserve for frequency control [J]. Electric Power Automatic Equipment, 2010, 30(8): 75-80.
- [6] 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):109-115.
LIU Wei, GU Wei, SUN Rong, et al. Primary frequency control of doubly fed induction generator-superconducting magnetic energy storage complementary system [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2012, 27(9): 109-115.
- [7] JIANG Q, GONG Y, WANG H. A battery energy storage system dual-layer control strategy for mitigating wind farm fluctuations [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2013, 28(3): 3263-3273.
- [8] ULLAH N R, THIRINGER T, KARLSSON D. Temporary primary frequency control support by variable speed wind turbines potential and applications [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2008, 23(2): 602-611.
- [9] 熊倩,廖勇,姚骏. 含飞轮储能单元的直驱永磁风力发电系统有功功率平滑控制[J]. 电力自动化设备,2013,33(5):97-105.
XIONG Qian, LIAO Yong, YAO Jun. Active power smoothing control of direct-driven permanent magnet synchronous wind power generation system with flywheel energy storage unit [J]. Electric Power Automatic Equipment, 2013, 33(5): 97-105.
- [10] 丁明,林根德,陈自年,等. 一种适用于混合储能系统的控制策略[J]. 中国电机工程学报,2012,32(7):1-7.
DING Ming, LIN Gende, CHEN Zinian, et al. A control strategy for hybrid energy storage systems [J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(7): 1-7.
- [11] 雷珏,欧阳曾恺,李征,等. 平抑风能波动的储能电池 SOC 与滤波协调控制策略[J]. 电力自动化设备,2015,35(7):126-131.
LEI Ting, OUYANG Zengkai, LI Zheng, et al. Coordinated control of battery SOC maintaining and filtering for wind power

- fluctuation smoothing[J]. Electric Power Automatic Equipment, 2015,35(7):126-131.
- [12] WANG M H, CHEN H C. Transient stability control of multimachine power systems using flywheel energy injection[J]. IET Proceedings-Generation, Transmission and Distribution, 2005, 152(5):589-596.
- [13] 戴兴建, 邓占峰, 刘刚, 等. 大容量先进飞轮储能电源技术发展状况[J]. 电工技术学报, 2011, 26(7):133-140.
DAI Xingjian, DENG Zhanfeng, LIU Gang, et al. Review on advanced flywheel energy storage system with large scale[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2011, 26(7): 133-140.
- [14] LAZAREWICZ M L, ROJAS A. Grid frequency regulation by recycling electrical energy in flywheels[C]//IEEE Power Engineering Society 2004 General Meeting. [S.l.]:IEEE, 2004: 2038-2042.
- [15] GABRIEL O C, CHRISTOPHE S, ROBYNS B, et al. Control and performance evaluation of a flywheel energy-storage system associated to a variable-speed wind generator[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2006, 53(4):1074-1085.
- [16] SUVIRE G O, MERCADO P E. Combined control of a distribution static synchronous compensator/flywheel energy storage system for wind energy applications[J]. IET Generation Transmission Distribution, 2012, 6(6):483-492.
- [17] 孙春顺, 王耀南, 李欣然. 飞轮辅助的风力发电系统功率和频率综合控制[J]. 中国电机工程学报, 2008, 28(29):111-116.
SUN Chunshun, WANG Yaonan, LI Xinran. Synthesized power and frequency control of wind power generation system assisted through flywheels[J]. Proceedings of the CSEE, 2008, 28(29): 111-116.
- [18] MONICA C, SANTIAGO A, JUAN C B. Control of permanent-magnet generators applied to variable-speed wind-energy systems connected to the grid[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2006, 21(1):130-135.
- [19] KUNDUR P. Power system stability and control[M]. New York, USA: McGraw-Hill, 1994:128-133.
- [20] 刘世林, 孙海顺, 文劲宇, 等. 一种新颖的风力发电机与飞轮储能联合系统的并网运行控制[J]. 电工技术学报, 2012, 27(4):248-254.
LIU Shilin, SUN Haishun, WEN Jinyu, et al. Novel structure and operation control of a flywheel energy storage system associated to wind generator connected to power grid[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2012, 27(4): 248-254.

作者简介:



刘世林

刘世林(1978—),男,安徽六安人,副教授,博士,从事储能技术在电力系统中的应用、智能电网运行与控制研究(E-mail: ahlsl@126.com);

文劲宇(1970—),男,湖南长沙人,教授,博士研究生导师,博士,从事大电网大机组安全稳定控制、储能与新能源并网、微网与舰船电力系统研究。

FESS-based comprehensive control of grid-connecting wind power

LIU Shilin¹, WEN Jinyu², GAO Wengen¹, JIANG Ming¹

(1. Anhui Key Laboratory of Detection Technology and Energy Saving Devices,

Anhui Polytechnic University, Wuhu 241004, China;

2. State Key Laboratory of Advanced Electromagnetic Engineering and Technology,

Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China)

Abstract: A comprehensive control strategy based on FESS(Flywheel Energy Storage System) is presented to respond to the grid frequency variation while smooth the wind power fluctuation. The response process of synchronous generator to the grid frequency variation is analyzed, the structure of FESS power controller is designed and its parameters are configured. The results of digital simulation with MATLAB/Simulink show that, the proposed control strategy makes the wind power output possessing the inertia response character as the synchronous generator and allows the operating mode of FESS to be flexibly switched over between power control and frequency control, which improves the grid-connection performance of wind power.

Key words: wind power; wind power fluctuation; flywheel energy storage; power control; frequency control; virtual inertia