

DOI: 10.7667/PSPC170002

高风电渗透率下的电力系统调频研究综述

李军徽¹, 冯喜超², 严干贵¹, 葛延峰³, 李大路³, 傅予³

(1. 东北电力大学, 吉林 吉林 132012; 2. 国网辽宁省电力有限公司沈阳供电局, 辽宁 沈阳 110811;
3. 国网辽宁省电力有限公司, 辽宁 沈阳 110006)

摘要: 受环境危机及能源危机影响, 全球风电发展迅速, 风能发电在一次能源发电中所占比例越来越高。大规模风电接入对电力系统的频率稳定构成了严重威胁。首先介绍部分风电发达国家对风电机组参与电力系统有功功率控制及调频的要求。接着对大规模风电并网对电力系统频率稳定的影响进行分析。从风电机组为电力系统提供惯性支撑、一次调频及综合提供惯性支撑和一次调频三方面进行调研总结。最后对应用大规模储能技术及需求侧管理技术提高高风电渗透率电力系统频率稳定性方法进行综述分析。

关键词: 风电功率; 惯性响应; 一次调频; 储能技术

Survey on frequency regulation technology in high wind penetration power system

LI Junhui¹, FENG Xichao², YAN Gangui¹, GE Yanfeng³, LI Dalu³, FU Yu³

(1. Northeast Electric Power Dianli University, Jilin 132012, China; 2. Shenyang Power Supply Bureau, State Grid Liaoning Electric Power Company Limited, Shenyang 110811, China; 3. State Grid Liaoning Electric Power Company Limited, Shenyang 110006, China)

Abstract: Wind power generation develops rapidly encountered in global environmental and energy crisis, and the proportion of wind power generation is becoming higher and higher in primary energy generation. Large-scale wind power integration poses severe threat to power system frequency stability. Firstly, the requirements for active power and control and frequency regulation when wind turbines integrated in power system in several developed countries are introduced. Secondly, the influence of large-scale wind power integration on power system frequency stability is analyzed. Survey and summary are carried out in three aspects, including inertial support, primary frequency regulation and comprehensively supporting inertial support, and primary frequency regulation provided by wind turbines for power system. Finally, the methods of improving frequency stability of power system with high wind power permeability are reviewed and analyzed, by applying large-scale energy storage technique and demand side management technology.

This work is supported by National Basic Research Program of China (973 Program) (No. 2013CB228201).

Key words: wind power; inertia response; primary frequency regulation; energy storage technology

0 引言

近年来, 在全球范围内煤和石油等化石能源正日趋枯竭, 气候变暖等环境问题日趋严重。在此背景下以风能和太阳能为代表的绿色可再生一次能源越来越受到人类的重视, 并得到了快速的发展, 其

中风力发电技术发展最为迅速^[1]。全球风电累计装机容量从2005年底的59.1 GW增长到2015年末的432.4 GW, 十年间以平均每年23%的速度飞速增长。

其中部分欧美国家风力发电起步较早, 并且相关技术较为成熟, 因此目前发展程度较高。例如, 截止到2015年底, 丹麦累计风电装机容量为5.06 GW, 风电全年发电量占全国总消费电量的42.1%; 西班牙风电累计装机容量24.02 GW, 风电全年发电量占全国总消费电量的22.3%; 德国风电累计装机容量44.95 GW, 风电全年发电量占全国总消费电量的10%^[2]。

但是风电渗透率的不断增高, 给传统电力系统

基金项目: 国家重点基础研究发展计划(973计划)(2013CB228201); 国家电网公司科技项目“超大容量电池储能电站并网运行关键技术及应用”; 2017年吉林省发改委产业创新专项项目(2017C017-2); 吉林省教育厅“十三五”科学技术研究项目(吉教科合字[2016]第88号)

的安全稳定运行带来了前所未有的挑战。当前主流风力发电机组变速风力发电机组 (Variable Speed Wind Turbine, VSWT) 与传统火电机组不同, 变速风力发电机组转速与电力系统频率解耦, 不具备惯性响应及辅助调频能力, 大规模风电接入替代了部分传统电源, 减小了整个电力系统的惯性, 削弱了电力系统的频率调节能力, 严重威胁了电力系统的安全稳定运行。为此, 世界上许多国家和地区的电力系统调度部门意识到了风电机组参与电力系统的惯性响应对电力系统频率稳定的重要性, 并对并网风电机组的电力系统惯性响应及参与系统频率调节的能力做出了明确的要求^[3]。与此同时, 国内外有很多学者对风电机组参与电力系统频率调节进行了大量的研究。

本文首先介绍了世界各国的电力公司对风电机组参与调频或者有功功率控制的要求, 然后, 从大规模风电并网对电力系统频率的影响、风电机组参与电力系统调频的方法和利用储能等新方法改善高风电渗透率下的电力系统的频率调节特性等方面进行综述。

1 风电机组参与电力系统频率调节的要求

部分国家风力发电发展较早且风电在其电力系统的总渗透率已经有较高的水平, 为保证电力系统运行的安全稳定, 这些国家对风电场的频率调节能力做出了一些具体要求。

(1) 德国的 EON 公司要求包括风电场在内的装机容量大于 100 MW 的所有发电厂必须具备一次调频能力, 并要求一次调频容量不小于额定容量的 $\pm 2\%$, 机组频率下垂特性常数必须可调, 在系统频率达到准稳态频率偏差 ± 200 mHz 时, 一次调频功率必须在 30 s 内达到最大值, 并能够持续输出至少 15 min, 同时要求在上一次调频过后的 15 min 后能够再参与一次调频^[4]。

(2) 在南非电力系统要求并网的风电场配备频率响应系统, 频率响应系统应该具备如图 1 所示的频率响应能力。风电场能够设定 0~0.5 Hz 的频率偏差响应死区, 具体应用中根据电力系统标准适当进行调整; 风电场能够以可输出最大功率的 95% 及以上的功率进行持续输出; 当系统频率超过 50.5 Hz 时, 要求风电场能够至少以 1% 额定功率/s 的斜率降低风电场的功率输出; 当系统频率小于正常值且靠近正常值时, 风电场频率响应系统应按照图 1 中 AB 段曲线调节其功率输出, 但系统频率高于正常值时, 风电场频率响应系统按照 CDE 段曲线调节有功功率输出^[5]。

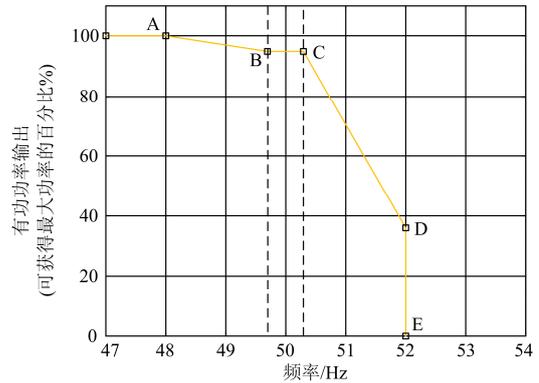


图 1 功率-频率控制曲线

Fig. 1 Power-frequency control curve

(3) 加拿大魁北克水电公司要求容量大于 10 MW 的风电场必须配备频率调节系统用于系统发生频率偏差时的风电场有功功率控制, 频率控制系统使风电场具备类似于传统同步机组的惯性 3.5 s 时间常数(H), 并保证在电力系统遇到频率波动时, 风电场能持续 10 s 以上, 以不低于额定功率 5% 的功率进行频率调节^[6]。

此外, 丹麦、芬兰、冰岛、挪威和瑞典的联合电力系统要求风电场具有有功功率调节能力^[7]。

随着我国风电装机容量的迅速增长, 在部分风能富集地区风电渗透率已经具有较高水平, 为此要求风电场应具备参与电力系统调频和备用的能力, 当风电场有功功率在总额定出力的 20% 以上时, 对于场内有功出力超过额定容量的 20% 的所有风电机组, 能够实现有功功率的连续平滑调节, 并参与系统有功功率控制^[8]。

2 大规模风电功率并网对电力系统的频率响应特性的影响

自然界中风能是一种具有随机性和波动性的资源, 风电功率与风能具有强相关性, 风速的随机性变化导致风电功率具有很强的不确定性^[9-10], 而电力系统的频率稳定是建立在系统中的同步发电机组的输入功率与输出功率相同的基础上的, 大规模的风电功率接入, 导致电力系统功率平衡受到挑战, 对电力系统的频率稳定造成了一定程度的威胁。

文献[11-14]从频率偏差和电力系统频率指标角度来研究风电功率波动对电力系统频率的影响。文献[11]在电力系统只有火电和风电的假设条件下, 对火电厂建立频率响应的传递函数, 基于该传递函数研究风电功率波动对电力系统频率偏差的影响, 仿真发现某一频率的约占各火电厂总容量 5% 的最大风电功率波动能引起电力系统 1% 的频率波动(额

定频率 60 Hz)。文献[12]讨论了发电系统的一次调频和二次调频,分析加入风力发电后风-火互补发电的区域频率控制,仿真结果数据验证了风-火互补发电的区域频率控制的可行性。文献[13]研究大规模风电功率波动对电力系统 CPS 考核指标的影响,针对风电功率波动这一因素对 ACE 计算公式进行了修正,以提高电力系统频率稳定性。文献[14]推导了含不同比例风电的系统总功率波动模型,并以此为基础描述了电力系统最大频率偏差、一/二次频率调整速度等指标,仿真说明高风电比例接入对系统一/二次频率调整速度影响不大,但是风电功率的接入增加了电力系统的二次调频备用需求。

电力系统频率与电力系统中同步发电机的转速正相关,每台同步发电机都有自身的惯性,当电力系统发生频率波动时,同步发电机会自动向电力系统吸收或者释放能量,以减小频率的波动量。当系统具有相同不平衡功率时,系统的惯性时间常数 H 越大,则系统的频率变化率越小,系统的频率就越稳定。但是当前主流的双馈感应风电机组的转速与电力系统频率解耦不能响应电力系统的频率变化,惯性时间常数 H 相当于零,大规模风电的接入替代了部分传统电源,等同于减小了电力系统的整体惯性,减弱了电力系统的频率响应能力^[15]。

研究系统频率响应能力的一种典型方法就是通过分析电力系统的频率变化率(Rate of Change of Frequency, ROCOF)、频率最低点等技术指标的变化情况,确定系统的频率响应能力。文献[16]研究不同负荷状态和不同风电渗透率下的电力系统的频率响应系数及 ROCOF 的变化情况,表明随着风电渗透率的增加,电力系统的频率响应系数(β , MW/0.1 Hz)在不断减小,而 ROCOF 的变化趋势则与之相反,说明电力系统的频率稳定性在逐渐减弱。文献[17]从 ROCOF 和频率最低点两个技术指标来衡量风电接入规模对 $N-1$ 故障电力系统的频率影响,仿真分析 $N-1$ 故障时电力系统中不同电源比例对频率指标的影响。文献[18]通过研究 ERCOT 电力系统发生典型故障时的频率波动来分析风电接入对系统惯性响应能力的影响,说明随着风电渗透率逐渐增加,系统的惯性响应能力在逐渐减弱。文献[17-18]研究结果表明风电的快速发展在不增加电力系统的调频压力。

同时,在很多国家和地区电源结构更为复杂,如澳大利亚和中国的甘肃地区不仅存在风电而且光伏发电也在发展,光伏的发展使得风电功率接入电力系统对系统频率响应能力的影响更为突出。文献

[19-20]以具有高风电和光伏渗透的澳大利亚南部某低惯性电力系统为背景,结合光伏发电单元的低频切机阈值,仿真研究了系统的频率响应能力,说明孤岛系统中高风电渗透率及光伏的低频切机设置给系统的频率稳定带来很大威胁,甚至可能导致系统的频率振荡;文献[21]分析了一天的不同时段光伏及风电对电力系统惯性的影响特性,结果表明夜晚负荷低谷时风电功率的接入使系统的频率波动量增大;文献[22]总结了近年来美国加州及美国西部因风电和太阳能接入引起的系统的频率响应能力的变化,分析了机组组合、调速器延迟及风电场参与调频对电力系统频率响应的影响,分析结果说明,在系统备用不足情况下风电场参与电力系统调频十分有助于电力系统的频率稳定。

为此,在全球风电快速发展的大背景下,特别在风能资源富集地区,电力系统的风电功率渗透率必然会逐渐增大,为提高电力系统的频率稳定性,风力发电机组具备频率响应能力的重要性将日益凸显出来。如何使风电机组有效地参与电力系统的频率调节过程,在近些年来一直都是一个研究热点,并已取得很多成果。

3 风电机组参与电力系统频率响应的控制策略

风力发电机组可以分为定速风电机组和变速风电机组两个大类,其中定速风电机组与传统火电机组相类似,转子转速与电力系统频率直接耦合,能够对电力系统频率波动做出响应,但是定速风电机组主要用于小容量的风力发电,随着风电机组的容量越来越大,变速风电机组已经成为当前的主流风电机组,典型变速风电机组的转子转速与电力系统频率解耦^[23]。变速风电机组的等效惯性时间常数为零,不能积极响应电力系统频率的波动,要实现变速风电机组参与调频,必须研究对风电机组进行辅助控制。变速风电机组参与电力系统调频的研究集中在风电机组为电力系统提供惯性支撑的研究、风电机组为电力系统提供一次调频的研究、风电机组为电力系统综合提供惯性响应和一次调频的研究。

3.1 惯性支撑

大规模风电功率的接入替代了部分传统电源,减小了整个电力系统的惯性,电力系统的频率稳定将受到严重威胁,为此风电机组能够为电力系统提供类似于传统火电机组的惯性支撑,具有重要的理论与实际意义。

文献[24-26]分析高风电渗透率电力系统中风电机组为电力系统提供惯性支撑的能力, 结果说明在电力系统 $N-1$ 故障中风电机组虚拟惯性能够有效降低电力系统频率变化速率和电力系统频率最低点, 从而保障电力系统频率稳定; 文献[27-28]提出通过切换 DFIG 风电机组功率跟踪曲线, 在系统频率发生突变的时候为系统提供虚拟惯性, 仿真说明在风速不变的情况下, 风电机组的频率响应能力甚至优于等容量的同步发电机组。

由于风能固有的波动特性, 风电机组的惯性响应具有很强的不确定性, 文献[29]计算适宜风速下的风电机组可用动能并通过控制叶尖速比在频率跌落时为电力系统提供短时有功支撑, 仿真分析表明, 该方法能够抵消风电并网对电力系统频率响应的不利影响; 文献[30]对比分析了两种风电场提供虚拟惯性的方法, 提出通过高斯分布来模拟风电功率波动以实现评估变化风速的风电场可用的虚拟惯性容量; 文献[31]基于 SOP(Step Over-Production)方法提出一种改进型的虚拟惯性控制方案, 以实现最优能量传递并解决风电机组的变化的运行点的问题, 仿真表明, 该方案能够限制电力系统频率跌落, 同时减弱电力系统频率恢复后的动态波动。

综上, 风电场的虚拟惯性能在系统频率跌落时自发提供有功支撑, 稳定系统频率, 是风电场参与电力系统调频的一种有效手段。

3.2 一次调频

变速风电机组在适当控制下不但能够为电力系统提供惯性支撑, 而且与传统机组相比, 风电机组具有更快的响应速度, 是在系统发生功率波动时为系统提供一次调频服务的一个较好的选择对象, 在风电渗透率不断提高的背景下, 应用风电机组参与电力系统一次调频将成为一种必要的选择。

文献[32]对比分析为电力系统提供一次备用的风电机组比例弃风法(Proportional Curtailment Strategy, PCS)和常量弃风法(Constant Curtailment Strategy, CCS)的效率, 得到两种策略的效果基本相同的结论, 分析可得, 两种方法相结合风电利用效率提高 2%; 基于图 2 所示控制原理, 文献[33-34]应用转速与桨距角联合控制实现 DFIG 风电机组的减载运行, 使 DFIG 风电机组在不同风速下参与电力系统一次调频, 在风电机组为 1.5 MW、同步发电机组为 8 MW 仿真条件下, 说明 DFIG 风电机组可有效提升系统的频率稳定性; 针对一般控制策略中风电机组退出调频存在的电力系统频率二次跌落问题, 文献[35]提出风电机组参与电力系统调频的时序协调控制策略, 在风电机组退出调频时实行有

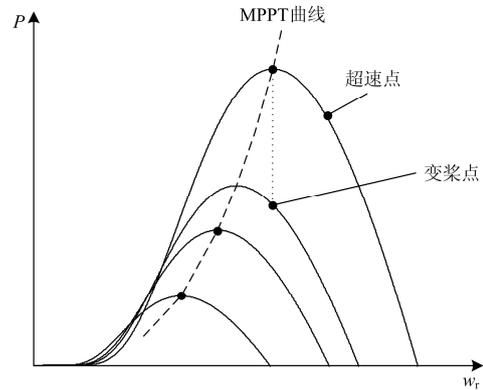


图 2 风电机组转速与桨距角控制原理图

Fig. 2 Schematic diagram of rotating speed and pitch angle control of wind turbine

序分散化的策略, 降低了风电机组退出调频时对电力系统频率带来的二次冲击。

综上, 风电机组参与电力系统的一次调频的实现方法主要是通过不同的方法进行弃风, 以保证一定的有功备用容量, 如何实现提供相同的备用容量, 尽量减小弃风电量, 从而提高风电场的经济效益是一项值得研究的内容。

3.3 惯性支撑与一次调频相结合

高风电渗透率电力系统中风电机组的惯性响应控制能够减小系统的频率跌落速度及幅值, 一次调频控制能够加速系统频率的恢复, 与单独应用一种控制策略相比, 两者的有机结合进一步提高了系统的频率响应能力。

文献[36-38]分析风电机组惯性响应和下垂控制相结合的方法对高风电渗透率电力系统频率响应能力的影响, 说明两种控制方法的结合在系统频率跌落或者稳态时提供显著的频率支撑, 并能够改善电力系统的风电接纳能力。文献[39]利用变桨技术提出可整定风电机组静调差系数的频率控制策略, 并与虚拟惯性相结合, 实现风电机组对系统频率的综合控制, 仿真表明, 利用所提控制方法能够提高系统在小扰动和静态条件下的频率稳定性。文献[40]提出应用风电机组转动惯量来替代部分为电力系统提供一次调频备用的减载运行需求, 与普通减载运行方法相比, 该方法的风电利用率提高了 1.16%到 2.79%。文献[41-42]综合应用惯性响应控制、转速控制和桨距角控制实现风电机组参与电力系统频率调节, 仿真分析表明, 所提控制策略提高了风电机组的频率响应能力, 有效减弱了电力系统的频率振荡。

综上, 风电场的惯性支撑和一次调频控制的结合为电力系统提供了连续的有功功率调节, 能够更好地稳定系统频率, 是风电场为电力系统提供调频

辅助服务的较好选择。

4 储能及需求侧管理技术参与高风电渗透率电力系统调频研究

由上文分析可知, 风电机组参与电力系统调频都是以在调频时段放弃最大功率跟踪为代价的, 同时, 由于风能固有的随机性和波动性, 由风电机组提供的电力系统的频率支撑的可靠性也很难得到保障, 在故障清除过后, 刚参加过电力系统调频的风电机组要尽快恢复到最佳转速, 要从系统中吸收部分有功, 这很容易造成系统频率的二次跌落, 因此风电机组的频率响应能力有待进一步加强^[43]。

大规模储能系统具有能量的时空平移能力, 常用的储能技术包括锂电池储能、超级电容器储能和飞轮储能等, 这些储能技术都具有性能稳定和响应速度快等优点, 可以协调风电机组来共同参与电力系统调频, 提高风电机组的频率响应能力^[44]。

文献[45-52]提出应用储能提高含大规模风电的电力系统的频率响应能力。文献[45]研究为 50 MW 的风电场配备储能系统从而为英国电力系统常规供电提供一次调频服务, 结合英国电力市场中有关常规供电和调频服务的运行要求及定价方法等规定, 以风-储联合系统的运行经济性最优为目标, 以整个系统功率平衡、风电机组和储能系统参与调频的控制方法及自身的运行限制为约束条件, 应用 GAMS 软件求取最优解, 最终确定储能系统的最优容量及功率。算例分析可以看到, 储能系统通过减小风电机组的调频备用压力减少了风电场弃风。文献[46]提出基于模糊控制策略的电池储能系统辅助 AGC 调频的方法, 以区域控制偏差及其变化率调节电池储能系统的输出功率, 改善电网的动态调频性能, 仿真表明, 电池储能系统能够迅速响应负荷扰动, 减小电网频率偏差, 提高电网 AGC 调频能力。文献[47-49]首先给出了电力系统频率响应的几个重要参数, 分析了孤岛电力系统的频率特性, 提出高风电和光伏渗透率引起的电力系统频率调节问题, 提出应用超级电容器储能来为系统提供快速反应的“虚拟惯性”, 从而阻止频率跌到低频减载阈值, 提高孤岛电力系统频率稳定性。文献[50]为风电场安装能量电容系统从而稳定含风电的电力系统的频率, 提出一种新型人工神经网络控制器以实现使用电容器参与电力系统频率控制, 仿真验证了不同风电渗透率和负荷波动情况下, 该方法在频率控制方面的有效性。文献[51]中为风电场配备钒液流电池储能系统, 文献提出不同控制方法来控制电力电子

装置以实现辅助电力系统调频、风电场故障支撑等服务。文献[52]假设在高风电渗透率电力系统中安装电池储能系统, 提出 SOC 状态反馈控制法, 应用电池储能系统参与电力系统频率控制。

需求侧管理也是一种协调风电机组进行调频的可行方法, 与风电机组参与电力系统调频调节电源有功处理不同, 需求侧管理是调节电力系统中的负荷需求, 从而动态调节电力系统中有功平衡。文献[53]分析了需求侧管理与风电机组虚拟惯性的结合对电力系统一次频率控制的影响, 进一步分析了两种辅助方法在面对系统频率偏差时所具有的备用容量和调频能力, 研究结果表明, 两种方法的结合能够有效提高系统频率的稳定性。文献[54]提出建立电解水氢气站为未来运输业提供清洁能源的同时, 应用大规模电解水操作对电力系统进行需求侧管理, 以实现电力系统的频率调节, 在风电渗透率为 25% 的条件下对所提策略进行仿真验证, 结果表明该方法能够有效提高电力系统的频率稳定性。文献[55]针对大规模风电接入下的电力系统频率稳定控制问题, 建立了大规模风电接入下的电力系统频率响应模型, 采用低压低频减载的需求侧响应控制方法, 为电力系统调频提供支持。文献[56]量化分析了动态需求控制效益, 具体为提出一种优化控制算法以控制制冷设备实现电力系统的一次调频, 仿真分析说明在高风电渗透率下的电力系统中, DD 的作用将更为明显, 为高风电渗透率电力系统的频率调节提供了一种可靠方法。

5 结论

本文首先列举部分风电发达国家对风电机组频率响应能力的基本要求, 然后分析大规模风电功率并网对电力系统频率稳定的影响, 说明风电功率的波动性及风电机组的频率解耦特性不利于电力系统的频率稳定。风电机组的惯性控制与一次调频控制相结合为电力系统提供了连续的有功功率调节, 增强了风电机组的频率响应能力, 但是不可避免地要进行一定的弃风。大规模储能技术及需求侧管理技术是提高高风电渗透率电力系统频率稳定性的有效方法, 随着储能技术成本的不断下降, 大规模储能技术参与电力系统调频的研究将越来越具有理论与实际应用价值。

参考文献

- [1] 赵晋泉, 唐洁, 罗卫华, 等. 一种含风电电力系统的日前发电计划和旋转备用决策模型[J]. 电力自动化设备, 2014, 34(5): 21-27.

- ZHAO Jinqun, TANG Jie, LUO Weihua, et al. Day-ahead generation scheduling and spinning reserve decision-making model for power grid containing wind power[J]. Electric Power Automation Equipment, 2014, 34(5): 21-27.
- [2] GWEC. Global wind states 2015 final[R]. 2016.
- [3] 刘波, 贺志佳, 金昊. 风力发电现状与发展趋势[J]. 东北电力大学学报, 2016, 36(2): 7-13.
- LIU Bo, HE Zhijia, JIN Hao. Wind power status and development trends[J]. Journal of Northeast Electric Power University, 2016, 36(2): 7-13.
- [4] E ON Netz GmbH. Grid connection regulations for high and extra high voltage[R]. Bayreuth: E ON Netz GmbH, 2006.
- [5] Eskom System Operations and Planning Division. Grid code requirements for wind energy facilities connected to distribution or transmission system in south Africa (version 4.4)[S]. 2012.
- [6] Hydro-Québec TransÉnergie. Transmission provider technical requirements for the connection of power plants to the Hydro-Québec transmission system[R]. Quebec: Hydro-Québec TransÉnergie, 2009.
- [7] Nordel. Nordic grid code (Nordic collection of rules)[R]. 2007.
- [8] 全国电力监管标准化技术委员会. 风电场接入电力系统技术规定: GBT_19963—2011[S]. 北京: 中国标准出版社, 2011.
- National Electricity Regulatory Standardization Technical Committee. Technical rule for connecting wind farm to power system: GBT_19963—2011[S]. Beijing: Standards Press of China, 2011.
- [9] SLOOTWEG J G, DE HAAN S W H, POLINDER H, et al. General model for representing variable speed wind turbines in power system dynamics simulations[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2003, 18(1): 144-151.
- [10] 宗晓英, 张志鹏, 黄大为. 风电并网系统的区间动态经济调度方法研究[J]. 东北电力大学学报, 2015, 35(5): 1-5.
- ZONG Xiaoying, ZHANG Zhipeng, HUANG Dawei, et al. Wind power grid system of interval dynamic economic dispatch method research[J]. Journal of Northeast Dianli University, 2015, 35(5): 1-5.
- [11] LUO C L, OOI B T. Frequency deviation of thermal power plants due to wind farms[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2006, 21(3): 708-711.
- [12] 姚亮, 陈峦, 郑彬, 等. 风-火互补发电系统区域频率控制的策略研究[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(11): 46-52.
- YAO Liang, CHEN Luan, ZHENG Bin, et al. Research on area frequency control strategy of wind-fire hybrid power generation system[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(11): 46-52.
- [13] 周霞, 胡朝阳, 杨卫东, 等. 大规模风电接入对华东电力系统 CPS 频率考核指标的影响[J]. 华东电力, 2011, 39(11): 1807-1810.
- ZHOU Xia, HU Chaoyang, YANG Weidong, et al. Impact of large-scale wind power integration on CPS frequency evaluation indexes for east China power grid[J]. East China Electric Power, 2011, 39(11): 1807-1810.
- [14] 丁立, 乔颖, 鲁宗相, 等. 高比例风电对电力系统调频指标影响的定量分析[J]. 电力系统自动化, 2014, 38(14): 1-8.
- DING Li, QIAO Ying, LU Zongxiang, et al. Impact on frequency regulation of power system from wind power with high penetration[J]. Automation of Electric Power Systems, 2014, 38(14): 1-8.
- [15] 张冠锋, 杨俊友, 孙峰, 等. 基于虚拟惯量和频率下垂控制的双馈风电机组一次调频策略[J]. 电工技术学报, 2017, 32(22): 225-232.
- ZHANG Guanfeng, YANG Junyou, SUN Feng, et al. Primary frequency regulation strategy of DFIG based on virtual inertia and frequency droop control[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2017, 32(22): 225-232.
- [16] AL-MASOOD N, YAN R F, SAHA T K, et al. Frequency response with significant wind power penetration: case study of a realistic power system[C] // PES General Meeting Conference & Exposition, 2014: IEEE, National Harbor, MD.
- [17] DOHERTY R, MULLANE A, NOLAN G, et al. An assessment of the impact of wind generation on system frequency control[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2010, 25(1): 452-460.
- [18] SHARMA S, HUANG S H, SARMA N D R. System inertial frequency response estimation and impact of renewable resources in ERCOT interconnection[C] // Power and Energy Society General Meeting, 2011: IEEE, San Diego, CA.
- [19] YAN R F, SAHA T K, MODI N, et al. The combined effects of high penetration of wind and PV on power system frequency response[J]. Applied Energy, 2015, 145(5): 320-330.
- [20] 李翠萍, 曹璞佳, 李军徽, 等. 大规模分布式光伏并网无功电压控制方法综述[J]. 东北电力大学学报, 2017, 37(2): 82-88.
- LI Cuiping, CAO Pujia, LI Junhui, et al. Review on reactive voltage control methods for large-scale distributed PV integrated grid[J]. Journal of Northeast

- Electric Power University, 2017, 37(2): 82-88.
- [21] TIELENS P, VAN HERTEM D. Grid inertia and frequency control in power systems with high penetration of renewables[C] // Young Researchers Symposium in Electrical Power Engineering, Delft, The Netherlands, 2012.
- [22] MILLER N W, SHAO M, VENKATARAMAN S, et al. Frequency response of California and WECC under high wind and solar conditions[C] // Power and Energy Society General Meeting, 2012: IEEE, San Diego, CA.
- [23] 徐政. 风力发电的模拟与控制[M]. 北京: 机械工业出版社, 2010.
- [24] MURRELL W, RAN L, WANG J H. Modelling UK power system frequency response with increasing wind penetration[C] // 2014 IEEE Innovative Smart Grid Technologies - Asia (ISGT ASIA), Kuala Lumpur.
- [25] WU L, INFIELD D. Power system frequency management challenges – a new approach to assessing the potential of wind capacity to aid system frequency stability[J]. IET Renewable Power Generation, 2014, 26(1): 733-738.
- [26] RUTTLEDGE L, MILLER N W, O’SULLIVAN J. Frequency response of power systems with variable speed wind turbines[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2012, 3(4): 112-119.
- [27] VIDYANANDAN K V, SENROY N. Primary frequency regulation by deloaded wind turbines using variable droop[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2013, 28(2): 837-846.
- [28] 张波, 颜湘武, 黄毅斌, 等. 虚拟同步机多机并联稳定控制及其惯量匹配方法[J]. 电工技术学报, 2017, 32(10): 42-52.
- ZHANG Bo, YAN Xiangwu, HUANG Yibin, et al. Stability control and inertia matching method of multi-parallel virtual synchronous generators[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2017, 32(10): 42-52.
- [29] BAKRY A, ATTYA T, HARTKOPF T. Control and quantification of kinetic energy released by wind farms during power system frequency drops[J]. IET Renewable Power Generation, 2013, 7(3): 210-224.
- [30] WU L, INFIELD D G. Towards an assessment of power system frequency support from wind plant—modeling aggregate inertial response[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2013, 28(3): 2283-2291.
- [31] HAFIZ F, ABDENNOUR A. Optimal use of kinetic energy for the inertial support from variable speed wind turbines[J]. Renewable Energy, 2015, 80: 629-643.
- [32] WANG Y, BAYEM H, GIRALT-DEVANT M, et al. Methods for assessing available wind primary power reserve[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2015, 6(1): 272-280.
- [33] 张昭遂, 孙元章, 李国杰, 等. 超速与变桨协调的双馈风电机组频率控制[J]. 电力系统自动化, 2011, 35(17): 20-25, 43.
- ZHANG Zhaosui, SUN Yuanzhang, LI Guojie, et al. Frequency regulation by doubly fed induction generator wind turbines based on coordinated over speed control and pitch control[J]. Automation of Electric Power Systems, 2011, 35(17): 20-25, 43.
- [34] 吴子双, 于继来, 彭喜云. 高风速段次优功率追踪方式的风电调频方法[J]. 电工技术学报, 2013, 28(5): 112-119.
- WU Zishuang, YU Jilai, PENG Xiyun. DFIG’s frequency regulation method only for high wind speed with suboptimal power tracking[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2013, 28(5): 112-119.
- [35] 何成明, 王洪涛, 孙华东, 等. 变速风电机组调频特性分析及风电场时序协同控制策略[J]. 电力系统自动化, 2011, 37(9): 1-6, 59.
- HE Chengming, WANG Hongtao, SUN Huadong, et al. Analysis on frequency control characteristics of variable speed wind turbines and coordinated frequency control strategy of wind farm[J]. Automation of Electric Power Systems, 2011, 37(9): 1-6, 59.
- [36] MULJADI E, GEVORGIAN V, SINGH M, et al. Understanding inertial and frequency response of wind power plants[C] // Power Electronics and Machines in Wind Applications (PEMWA), Denver, 2012: IEEE.
- [37] WANG Y, DELILLE G, BAYEM H, et al. High wind power penetration in isolated power systems—assessment of wind inertial and primary frequency responses[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2013, 28(3): 2412-2420.
- [38] MARGARIS I D, PAPATHANASSIOU S A, NIKOS D. Frequency control in autonomous power systems with high wind power penetration[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2012, 3(2): 189-199.
- [39] 付媛, 王毅, 张祥宇, 等. 变速风电机组的惯性与一次调频特性分析及综合控制[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(27): 4706-4716.
- FU Yuan, WANG Yi, ZHANG Xiangyu, et al. Analysis and integrated control of inertia and primary frequency regulation for variable speed wind turbines[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(27): 4706-4716.
- [40] ŽERTEK A, VERBIČ G, PANTOŠ M. A novel strategy for variable-speed wind turbines’ participation in primary frequency control[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2012, 3(4): 791-799.

- [41] WANG-HANSEN M, JOSEFSSON R, MEHMEDOVIC H. Frequency controlling wind power modeling of control strategies[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2013, 4(4): 954-959.
- [42] ZHANG Z S, SUN Y Z, LIN J. Coordinated frequency regulation by doubly fed induction generator-based wind power plants[J]. IET Renewable Power Generation, 2012, 6(1): 38-47.
- [43] 江全元, 龚裕仲. 储能技术辅助风电并网控制的应用综述[J]. 电网技术, 2015, 39(12): 3360-3368.
JIANG Quanyuan, GONG Yuzhong. Review of wind power integration control with energy storage technology[J]. Power System Technology, 2015, 39(12): 3360-3368.
- [44] 唐西胜, 苗福丰, 齐智平, 等. 风力发电的调频技术研究综述[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(25): 4304-4314.
TANG Xisheng, MIAO Fufeng, QI Zhiping, et al. Survey on frequency control of wind power[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(25): 4304-4314.
- [45] JOHNSTON L, DÍAZ-GONZÁLEZ F, GOMIS-BELLMUNT O, et al. Methodology for the economic optimization of energy storage systems for frequency support in wind power plants[J]. Applied Energy, 2015, 137(1): 660-669.
- [46] 丁冬, 刘宗歧, 杨水丽, 等. 基于模糊控制的电池储能系统辅助 AGC 调频方法[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(8): 81-87.
DING Dong, LIU Zongqi, YANG Shuili, et al. Battery energy storage aid automatic generation control for load frequency control based on fuzzy control[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(8): 81-87.
- [47] DELILLE G, FRANÇOIS B, MALARANGE G. Dynamic frequency control support by energy storage to reduce the impact of wind and solar generation on isolated power system's inertia[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2012, 3(4): 931-939.
- [48] 李军徽, 蒋莲, 李翠萍, 等. 用于超级电容器储能系统变流器的控制策略设计[J]. 东北电力大学学报, 2017, 37(4): 32-38.
LI Junhui, JIANG Lian, LI Cuiping, et al. Control strategy designed for converter of super capacitor energy storage system[J]. Journal of Northeast Electric Power University, 2017, 37(4): 32-38.
- [49] 叶婧, 林涛, 张磊, 等. 考虑动态频率约束的含高渗透率光伏电源的孤立电网机组组合[J]. 电工技术学报, 2017, 32(13): 194-202.
YE Jing, LIN Tao, ZHANG Lei, et al. Isolated grid unit commitment with dynamic frequency constraint considering photovoltaic power plant[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2017, 32(13): 194-202.
- [50] MUYEEN S M, HASANIEN H M, TAMURA J. Reduction of frequency fluctuation for wind farm connected power systems by an adaptive artificial neural network controlled energy capacitor system[J]. IET Renewable Power Generation, 2012, 6(4): 225-234.
- [51] BANHAM-HALL D D, TAYLOR G A, SMITH C A, et al. Flow batteries for enhancing wind power integration[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2012, 27(3): 1690-1697.
- [52] DANG J, SEUSS J, SUNEJA L, et al. SoC feedback control for wind and ESS hybrid power system frequency regulation[J]. IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, 2014, 2(1): 79-86.
- [53] MOLINA-GARCÍA A, MUÑOZ-BENAVENTE I, HANSEN A D, et al. Demand-side contribution to primary frequency control with wind farm auxiliary control[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2014, 29(5): 2391-2399.
- [54] KIAEE M, CRUDEN A, INFELD D. Utilization of alkaline electrolysers to improve power system frequency stability with a high penetration of wind power[J]. IET Renewable Power Generation, 2014, 8(5): 529-536.
- [55] 包宇庆, 李扬, 王春宁, 等. 需求响应参与大规模风电接入下的电力系统频率调节研究[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(4): 32-37.
BAO Yuqing, LI Yang, WANG Chunning, et al. On demand response participating in the frequency control of the grid under high wind penetration[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(4): 32-37.
- [56] AUNEDI M, KOUNTOURIOTIS P A, CALDERON J E O. Economic and environmental benefits of dynamic demand in providing frequency regulation[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2013, 4(4): 2036-2048.

收稿日期: 2017-01-01; 修回日期: 2017-02-21

作者简介:

李军徽(1976—), 男, 通信作者, 博士, 副教授, 硕士生导师, 研究方向为新能源并网与控制、储能应用; E-mail: lijunhui@neepu.edu.cn

冯喜超(1989—), 男, 硕士, 助理工程师, 研究方向为储能技术在大规模风电中的应用; E-mail: 411157897@qq.com

严干贵(1971—), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 主要研究新能源发电联网运行分析与控制, 电力电子技术等。

(编辑 葛艳娜)