

DOI: 10.7667/PSPC161762

## 风电参与电力系统调频综述

赵嘉兴<sup>1</sup>, 高伟<sup>1</sup>, 上官明霞<sup>1</sup>, 查效兵<sup>2</sup>, 岳帅<sup>2</sup>, 刘燕华<sup>2</sup>

(1. 国网山西省电力公司科信部, 山西 太原 030001;

2. 新能源电力系统国家重点实验室(华北电力大学), 北京 102206)

**摘要:** 目前风电并网运行渗透率逐步增大, 利用风电参与电网频率调整, 增强系统运行的稳定性已经成为国内外研究的热点问题。综述了风电参与系统频率调整的控制策略研究进展, 对比研究了虚拟惯性控制、下垂控制、转子转速控制、桨距角控制、附加储能系统等不同控制策略, 明确了各种控制策略的原理、优缺点以及适用范围。分析了风电场内不同风机之间的协调控制算法以及风机与其他常规机组之间的协调配合控制。阐述了智能算法、虚拟同步发电机技术给风电调频带来的新思路以及电压源型高压直流输电技术的应用给风电调频带来的挑战。最后, 展望了未来研究的重点内容: 源荷双侧的高度不确定性对风电调频的影响; 风电调频算法参数整定的依据; 风电参与系统调频容量的评估方法。

**关键词:** 风力发电; 频率调整; 控制策略; 智能算法; 虚拟同步发电机技术; 电压源型高压直流输电技术

### Review on frequency regulation technology of power grid by wind farm

ZHAO Jiaying<sup>1</sup>, GAO Wei<sup>1</sup>, SHANGGUAN Mingxia<sup>1</sup>, ZHA Xiaobing<sup>2</sup>, YUE Shuai<sup>2</sup>, LIU Yanhua<sup>2</sup>

(1. Division of State Grid Shanxi Electric Power Company, Taiyuan 030001, China; 2. State Key Laboratory of Alternate Electrical Power System with Renewable Energy Sources (North China Electric Power University), Beijing 102206, China)

**Abstract:** At present, the penetration of wind power integration operation increases gradually. Using wind power to participate power grid frequency regulation and strengthen system operation stability is the research hot topic at home and abroad. This paper reviews the technology development for wind farm participating into power grid frequency regulation and contrastively analyzes different control strategies such as virtual inertia control, droop control, rotor speed control, pitch control and additional energy storage systems. The principle, pros and cons, and applicable range of various control strategies are stated. The coordination control algorithm among different wind turbines in a wind farm and the coordination control between wind turbines and other conventional generators are analyzed. The new thoughts brought by the application of intelligence algorithm and Virtual Synchronous Generator technology (VSG) and the challenges resulted from the application of Voltage Source Converter Based High Voltage Direct Current transmission (VSC-HVDC) in wind power frequency control are studied. Finally, this paper comes up with some key issues to be researched in the future: the impacts of source charge bilateral uncertainty on wind power frequency regulation, the parameters setting basis of wind power frequency modulation algorithms, and frequency regulation capacity evaluation method of wind power in systems.

**Key words:** wind power generation; frequency regulation; control strategy; artificial intelligence; VSG; VSC-HVDC

## 0 引言

为了应对全球日趋严重的环境问题, 清洁无污染、可再生的风能发电越来越受到各国的重视。截止到2015年底世界风电总装机容量已经达到432.419 GW, 全球风电新增装机容量为63.013 GW, 并网风电容量不断增加, 电网中风电渗透率不断提

高, 给电力系统安全稳定运行带来了新的挑战。利用变频器控制的风电机组通常与系统频率完全解耦, 风电机组转子动能被变频器控制完全“隐藏”, 不具备响应系统频率变化的能力, 无法参与系统频率调整<sup>[1-2]</sup>; 此外, 为追求风能的最大化利用, 风电机组通常在最大功率点(Maximum Power Point, MPP)运行, 不提供有功备用, 无法在系统频率变化时提供类似传统机组的调频服务, 这将使得系统在机组脱网、线路故障、负荷突变等扰动下的频率偏差增大, 频率变化率增加, 系统调度控制更为复杂。

**基金项目:** 能源基金会(美国)风电优先调度的经济技术问题及社会价值评价(G-1403-20188)

为了提高风电机组对电力系统频率变化的响应能力，维持系统频率稳定，国内外最新发布的一些电网导则均明确提出并网风电场需要能够参与系统调频，提供和常规发电厂一样的旋转备用、惯性响应<sup>[3-6]</sup>。目前常用风力发电机主要分为鼠笼式恒速风力发电机组和变速恒频风力发电机组。鼠笼式恒速机组，与电网紧密耦合，能够自动为电力系统提供惯性响应支持<sup>[7]</sup>。目前应用最为广泛的风电机组是变速恒频风电机组。变速恒频风电机组需要采用附加控制方式才能响应系统频率变化，具体实现的方法主要有：利用风电机组自身有功功率控制和附加储能系统控制。其中利用风电机组自身有功功率控制又分为转子动能控制(Kinetic Energy Control, KEC)和功率备用控制(Power Reserve Control, PRC)。转子动能控制采用的方法有虚拟惯性控制<sup>[9-14]</sup>、下垂控制<sup>[15-18]</sup>和综合惯性控制<sup>[19-24]</sup>；功率备用控制采用桨距角控制<sup>[27-30]</sup>、转子转速控制<sup>[31-32]</sup>以及二者协调控制<sup>[33]</sup>的控制方法；附加储能系统<sup>[34-44]</sup>根据储能方式的不同分为：飞轮，蓄电池，超导、超级电容器和燃料电池储能系统。为了实现在风电场内不同机组之间以及风电场与系统内其他发电厂之间的协调控制，智能算法、虚拟同步发电机技术逐渐应用于电力系统。近年来，海上风电的迅速发展，电压源型高压直流输电技术得以应用，给风电参与电力系统调频带来了新的问题。

本文综述了风电参与系统调频过程中的控制策略，明确了各种控制策略的原理、优缺点以及适用范围；分析了风电场内各机组之间的协调控制、风机与其他常规机组之间的协调配合控制，智能算法、虚拟同步发电机技术给风电调频带来的新思路，以及电压源型高压直流输电技术的应用给风电调频带来的挑战。同时给出了今后需要重点研究的问题。

## 1 风电参与系统调频控制策略

### 1.1 转子动能控制

转子动能控制的原理是在风电机组的有功功率控制系统中增加一个频率控制环节，实现风机转子中蕴含的旋转动能与电磁功率的相互转换，让该旋转动能参与系统的频率调整，维持系统频率稳定<sup>[8]</sup>。转子动能控制的具体实现方法主要有虚拟惯性控制、下垂控制以及综合惯性控制。

#### 1.1.1 虚拟惯性控制

虚拟惯性控制也被称为惯量控制或者惯性控制，它的原理是在风机有功控制部分加入附加控制环节，产生和常规发电机组一样的惯性效应<sup>[9]</sup>。虚拟惯性控制法所获得的额外有功参考信号  $\Delta P$  可以

通过一个与系统频率变化率的正比关系来得到

$$\Delta P = -K_f \frac{df}{dt} \tag{1}$$

式中： $K_f$  为比例系数； $f$  为频率； $t$  为时间。当系统受到扰动时，虚拟惯性控制可以提供快速的有功输出响应，具体控制实现可参考图 1 所示。

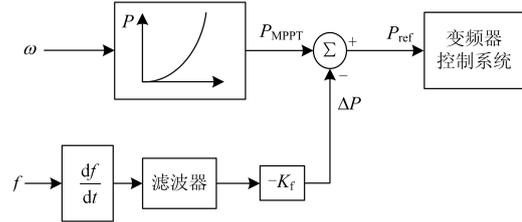


图 1 虚拟惯性控制框图

Fig. 1 Control method of emulating inertia control

针对风机系统没有直接耦合电网频率，文献[10]研究了风电机组虚拟惯性与系统频率变化之间的关系，通过检测系统频率变化来调节风功率跟踪曲线，释放风电机组“隐藏”动能参与系统频率调整。在频率恢复过程中，风电机组转速会恢复到最大风功率跟踪情况，发电机转子加速吸收有功功率容易导致系统发生二次频率跌落<sup>[11]</sup>，针对此问题文献[12]以调频过程风电机组中转子转速跌落幅值为输入信号，经过整定生成二次跌落控制信号，直接叠加在风机有功控制信号上，抑制了系统频率二次跌落，提升了双馈风电机组的调频能力；文献[13]考虑机组间调频能力差异，引入转子动能评估因子来实现各机组的协调控制，避免了系统频率的二次跌落。固定参数的虚拟惯性控制策略不能充分发挥风电机组的调频能力，文献[14]通过设置可改变虚拟惯性控制参数最优化控制器，改善了系统的频率响应。

虚拟惯性控制主要用于阻止电力系统暂态过程中频率的快速变化；风机在电网频率下降时提供暂态的有功功率支撑后，转子转速将恢复到正常运行状态，若风速不变，则转子在整个过程中释放与吸收的动能相同，并没有对系统频率响应提供能量，故持续时间短、易发生频率的二次跌落。

#### 1.1.2 下垂控制

下垂控制(也称为比例控制、斜率控制)的基本原理为模拟同步发电机一次调频的功—频静态特性曲线，将一个正比于频率偏差的有功功率变化值  $\Delta P$  加入到原有的有功功率参考值上以适时地调节风电机的有功出力<sup>[15]</sup>，如式(2)所示。

$$\Delta P = -\frac{1}{R} \Delta f \tag{2}$$

式中， $R$  是一个常数，DFIG 风电机组下垂控制的基本控制框图如图 2 所示。

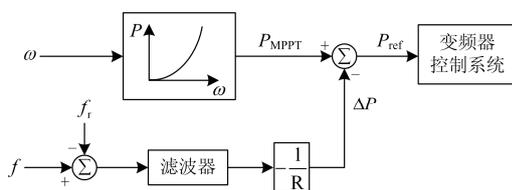


图2 下垂控制框图

Fig. 2 Control method of droop control

由于风速具有波动性和随机性，采用固定系数  $R$  的下垂控制策略不能够充分发挥风机的调频能力。针对这一问题文献[16-17]提出根据风电机组运行工况采用可变下垂系数的控制方法，前者采用低、中、高风速区采取不同的方式整定下垂控制参数，后者将变下垂控制策略结合减载控制，较好地协调了不同风速情况下其参与系统调频能力的差异性，提高了系统的频率响应能力。为消除一次调频死区所带来的频率概率非正态分布现象，文献[18]将下垂控制引入一次调频的数字式电液调节系统(DEH)控制中，代替传统的发电机组设置死区，防止一次调频频繁动作，保证了电力系统一次调频的稳定性。从图2中可以看到下垂控制的附加控制信号与频率偏差有关，因此其能在频率最低点附近进行较强支撑，能够减小系统频率偏差。

### 1.1.3 综合惯性控制

考虑到虚拟惯性控制主要用于阻止电力系统暂态过程中频率的快速变化，下垂控制主要用于减小系统频率偏差，文献[19-20]同时将系统频率偏差以及变化率引入风电机组有功功率控制环，提出了综合惯性控制方法，改善了风电机组对系统频率变化的响应特性。该方法的额外有参考值可表示为

$$\Delta P = -K_{df} \frac{df}{dt} - K_{pr} \Delta f \quad (3)$$

式中： $K_{df}$ 、 $K_{pr}$  分别为虚拟惯性控制系数和下垂控制系数，其控制框图如图3所示。

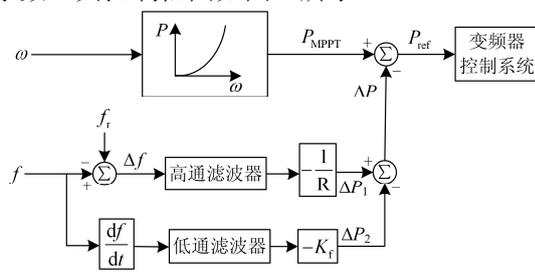


图3 综合惯性控制框图

Fig. 3 Control method of integrated inertial control

文献[21]在综合惯性控制的基础上设计了一种变参数控制方法，能够在高风速时释放更多的动能，提升了频率跌落的最低点，改善系统的频率响应。

由于风机转子中存储的能量有限，对于严重的负荷变化，虚拟惯性控制、下垂控制和综合惯性控制都无法提供足够的有功支撑<sup>[22]</sup>，同时附加控制环的引入也使风电机组转速与系统频率之间产生新的耦合关系，这种耦合关系将会给系统的小干扰稳定带来新的影响<sup>[23]</sup>。针对扰动过大引起系统易失稳的问题，文献[24]提出一种在频率跌落时关闭部分用电设备，待频率恢复后重新打开这些设备的控制方法，该方法能够克服风电机组的失稳问题，为电力系统调频提供支持。

变速风机转子转速存在极值约束，在系统频率下降而风速较低时，难以通过降低转子转速增加机组功率输出；在系统频率升高而风速较高时，难以通过提高转子转速以降低机组输出功率，因此调节能力有限。此外该控制方法在应用中，控制参数的设定复杂，受外部影响较大，如何科学整定控制参数依然有待研究。

## 1.2 功率备用控制

功率备用控制通过控制风电机组使其减载运行，从而预留一定的功率备用并以此来支持系统调频，此时风电机组工作在次优功率跟踪点上<sup>[25]</sup>。其方法有两大类：桨距角控制和转子转速控制<sup>[26]</sup>。如图4所示，通过桨距角控制或者转子转速控制使风机出力小于最大值，从而留出一定的备用容量。

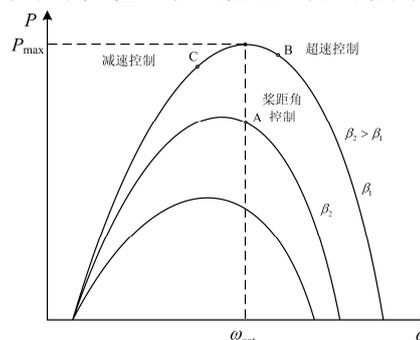


图4 由桨距角控制和变速控制风力减载运行

Fig. 4 Deloading running by pitch angle control or variable speed control

### 1.2.1 桨距角控制

桨距角控制的思想是通过增大桨距角来控制风电机组的有功输出低于其额定值，并将这一部分多余的能量作为此刻风电机组的功率备用<sup>[27]</sup>。在风况一定的情况下，桨距角越大，机组留有的有功备用也就越大。如图4所示，当桨距角从  $\beta_1$  增大为  $\beta_2$  时，风机输出的最大功率明显变小，当系统频率降低的时候，减小桨距角，增加风电机组的出力，支持系统的频率响应。文献[28]利用桨距角控制，在高风速时保证合适的电力储备，提供了一次调频备用容

量, 主动参与系统调频, 其控制方式如图 5 所示。

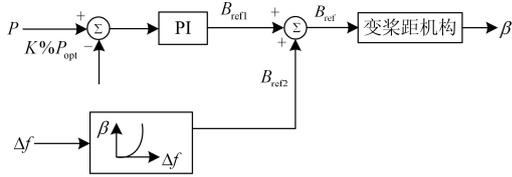


图 5 桨距角控制

Fig. 5 Control method of pitch angle control

理论上说, 桨距角控制适用于全风速工况, 然而由于有机械部分的参与, 桨距角调节速率, 一般为 10 deg/s; 此外风电机组变桨系统频繁的动作减短了风机使用寿命, 增加了风机检修费用。针对此问题文献[17]使用下垂控制弥补桨距角控制响应速度慢的缺陷, 提出了减载控制结合下垂控制的综合控制策略, 改善了风机系统的频率响应特性。文献[29]提出了一种在线的桨距角控制方法, 该方法根据系统实时减载命令控制桨距角, 对于风机运行的复杂工况适应性较强。文献[30]利用根轨迹法分析不同渗透率下系统频率响应特性, 整定出合适的桨距角减载控制参数, 快速灵活的控制风机的出力, 进一步改善了系统的频率响应。相对于转子动能控制, 桨距角控制调节范围大, 能够减小稳态频率偏差; 但是响应速度慢, 受风速波动影响较大, 且会降低机组寿命。

### 1.2.2 转子转速控制

转子转速控制可以通过增大或减小风机转速实现, 但是通过降低转速(即左移 MPPT 曲线)来减小风电机组的有功出力, 易引起小干扰稳定性问题<sup>[24]</sup>, 所以转子转速控制一般是采用超速控制的方式。如图 6 所示, 通过增加转速, MPPT 曲线发生右移, 工作点由 A 点变成 B 点, 减小了出力, 留出了一定的备用容量, 当系统频率下降的时候, 风机减速, MPPT 曲线左移, 工作点变成了 C 点, 输出功率增大, 抑制系统频率降低<sup>[31]</sup>。文献[32]对比了中低速工况下, 恒动量法和恒功率备用对转子超速运行的控制效果, 仿真结果表明恒动量法在控制过程中发电损失较小, 而恒功率备用具有优良的频率调节效果。

超速控制响应速度快, 能够提供一次频率备用, 但受制于转子转速幅值, 超速控制一般只适用于中低速的工况下, 同时风机长期低于额定功率运行, 降低了风电场效益。

### 1.2.3 桨距角与超速协调控制

针对超速控制和变桨控制不同工况下有一定的局限性, 文献[33]提出一种综合超速控制与桨距

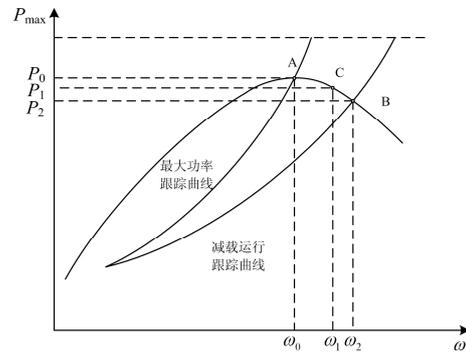


图 6 超速控制原理图

Fig. 6 Control method of over-speeding control

角控制的协调控制方法, 该方法在中低速时使用超速控制, 高速时使用桨距角控制, 充分发挥了超速法响应速度快和变桨法调节范围广的优势。其调频控制策略框图如图 7 所示。

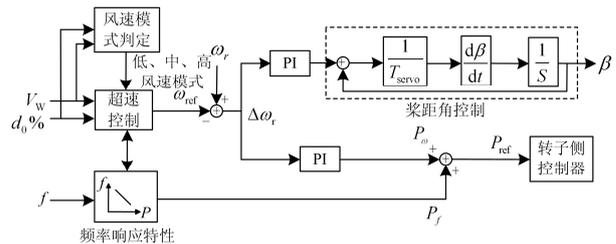


图 7 桨距角与超速协调控制策略框图

Fig. 7 Coordination control of pitch angle control and over-speeding control

### 1.3 附加储能系统的频率控制

储能系统具有快速吐纳能量的能力, 不仅可以有效抑制风电的随机波动, 而且能够辅助风电参与系统调频。储能系统参与风电调频的原理是在系统频率降低的时候, 储能系统快速释放能量支撑系统频率; 在系统频率上升时, 吸收能量抑制系统频率的上升<sup>[34]</sup>。储能系统参与风机系统调频框架如图 8 所示, 风机与储能系统分别经过电力电子元件、变压器与电网相连接。

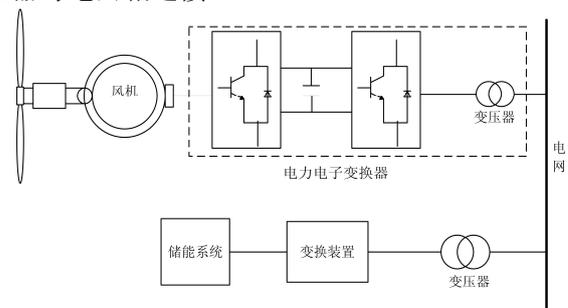


图 8 储能系统参与风机系统调频框架图

Fig. 8 Frequency regulation control with energy storage systems

机械储能、电气储能、电化学储能、热储能和化学储能是目前常用的四大类储能系统,如图9所示<sup>[35-37]</sup>。抽水蓄能、压缩空气储能和飞轮储能是采用机械储能形式;超级电容器储能和超导储能采用电气储能形式;电化学储能主要包括各种蓄电池,例如铅酸电池、锂离子电池和钠硫电池等;化学储能主要是燃料电池。在上述储能形式中,飞轮、超级电容器、超导、蓄电池和燃料电池逐步开始运用于风电调频,其基本特点如表1所示。随着电力电子设备的迅速发展,大容量的变流器不断涌现,储能技术的不断成熟,储能系统辅助风电系统参与系统调频可以很容易的实现。

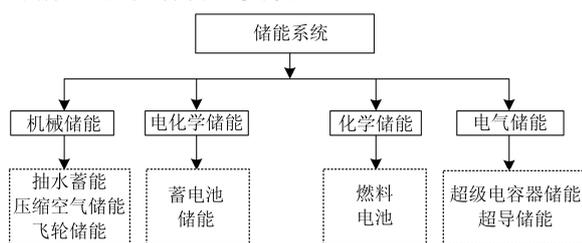


图9 储能系统的分类

Fig. 9 Classification of energy storage systems

表1 储能系统在风电调频中的研究现状

Table 1 Energy storage system applied to wind power frequency regulation

储能方式	主要优缺点	目前研究阶段
飞轮储能	寿命长、效率高;低能量密度、噪声大	美国纽约 20 MW示范工程
超导储能	效率高,响应快;能量密度较低,成本高	美国威斯康辛州 MW级示范工程
超级电容器	响应快,效率高;能量密度较低,成本高	德国MW级示范工程
蓄电池储能	一般为高功率,高效率;成本高	中、美、日等国家 均有MW级示范工程
燃料电池	能量大、时间长;效率低	印度K.V.Vidyanandan 实验室研究

储能系统能够快速吸收和释放能量,可及时响应系统频率的变化,提供频率支持。文献[38]提出了飞轮辅助的电力系统功率—频率控制,经过仿真验证,证明了储能系统参与系统调频的有效性。与传统调频方式相比,储能系统参与调频具有高效性。文献[39]发现配置10 MW/3.66 MWh储能电池能够达到36 MW火电机组一样的调频效果,指出储能系统具有良好的调频能力。文献[40]提出了一种在低需求情况下,飞轮短期存储能量;高需求下,燃料电池长期储能的附加储能系统参与的风电调频,这样充分发挥了储能系统的作用,进一步改善了风电机组的频率响应。为了弥补风机调频能力的不足,

文献[41]将快速灵活的超导储能系统,并入风机系统,解决了转子转速恢复的时频率二次跌落问题。超级电容器不含运动部件,可靠性高,易于维护,用于调频的优势很明显<sup>[42]</sup>。文献[43]将超级电容能量管理与变流器控制相结合,利用超级电容的储能特性,有效地平滑了系统的功率波动,增强了风电场系统频率的稳定性。

储能系统辅助风电调频需要增加额外的设备,这必然与风场运行的经济性相矛盾。为减小风场运行的成本,需要在进行经济性评估的基础上配置合适大小的储能系统。储能系统的容量取决于调频需求,受风场规模和频率支持能力影响很大。文献[44]量化分析大规模风电并网对电网频率的影响,为储能参与系统调频的经济性评估提供了基础。文献[45]对风电功率预测误差进行分析,采用成本与效益分析法优化了风电场的储能装置配容量。文献[46]采用雨流计数法估算了参与调频储能系统的寿命,利用净现值法构建了储能系统参与调频的经济评估模型,得到了一定条件下的储能系统容量配置方案。目前的方法都是建立在一定近似的基础之上,并不能够完全定量的评估实际调频过程中储能系统的效益,无法为储能系统的配置提供统一的原则,储能系统配置容量的问题亟待解决。

储能系统不仅能够快速响应功率变化,跟踪系统频率的变化,而且能够实现功率的双向调节,有效地改善电力系统的频率响应特性。研究设计出合理、自适应性强的附加储能系统的协调控制策略成为风电参与系统频率控制亟待解决的问题。

## 2 面向风电场的频率协调控制

电力系统中往往存在着上百甚至数千台风电机组,所以对于电力系统而言,不仅要考虑风电场内部机组之间的协调控制,还需考虑风电场与其他类型发电机组之间的配合。针对风电的随机性、间歇性和不可预测性,智能算法能够处理模糊信息的优势而被广泛应用于风电调频。近年来海上风电的迅速发展,VSC-HVDC技术大量应用到风电并网系统又给风电调频带来了新的问题。为使风机模拟出同步发电机的调频特性,虚拟同步发电机技术得到了广泛关注。

### 2.1 风场内部机组的协调策略

为了充分发挥每台风电机组的调频能力,需要考虑风电场内部风电机组的协同控制。文献[47]将自动发电控制引入风电场内部,实现了不同机组之间有功功率和无功功率的优化分配。文献[48]基于风速整定风电场内各台风机备用功率的分配系数,

根据工况动态分配风电场备用功率，为风电场参与系统调频提供支持。文献[49]在文献[48]的基础上采用有功功率优化分配策略，根据不同风机的备用功率容量分配风电场调频总功率，充分发挥每台风机的调频能力，但是风场降额运行，不利于风场运行的经济性。文献[17]提出的可变下垂控制，依据不同风速自动调整风机控制环节的下垂控制系数，提高了风电场各风机对风速变化的适应性。

针对风机同时进入或退出调频易导致系统频率剧烈变化的问题，文献[50]使用时序控制策略控制风机有序进入或退出调频，克服了以上缺陷，如图10所示。针对固定参数的惯性控制策略不能满足多机并网的调频需求，文献[13]考虑机组间调频能力差异，引入转子动能评估因子和变流器容量限制因子实现各风机机组的协调控制，充分发挥各风机的调频能力，但是针对更大风电渗透率的系统，有待进一步验证。根据风电场内各台风机的运行状态协调分配调频功率，依然是未来研究的重点。

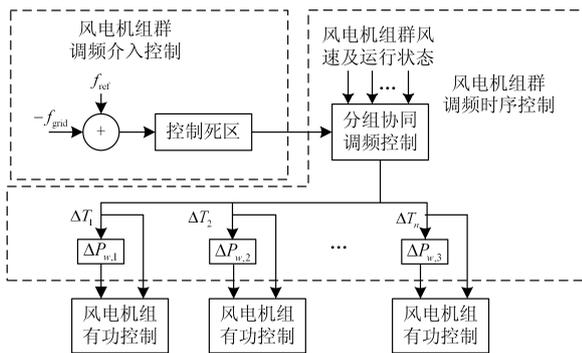


图 10 风电场参与系统调频控制策略  
Fig. 10 Frequency regulation strategy with wind farms

### 2.2 风电场与系统传统常规发电机组之间

风电场并入电力系统，需要考虑风电场与系统传统常规发电机组之间的相互配合，目前在这方面的研究还比较少。为充分发挥各发电厂的调频能力，文献[51]利用风电与火电等常规发电机组之间的通信系统，将风电的调频控制功率信号值引入常规发电机组的调速器控制，改善了系统的频率控制效果。文献[52]分析了火力发电的一次调频和二次调频，将风电作为辅助，支援火电进行频率调节。文献[53]利用风电有功功率的快速响应能力对系统频率进行短时的支撑，解决了水轮机频差响应速度较慢的问题。文献[54]提出一种惯性控制结合功率备用控制的变系数控制策略，用于含有风电、光伏、柴油等发电机的混合系统的频率调整，根据风速改变控制参数，限制了频率波动，及时响应负荷扰动。风电与其它能源形式协调调频的研究刚刚开展，其中的

相互影响机理尚未明确，有待深入研究。

### 2.3 智能算法

风电系统是由大量的发电机、变流器、变压器、线路等组合成的动态系统，其本质上是非线性的动态大系统。风电的随机性、间歇性和不可预测性，使得风电系统难以用精确的模型表达；风机运行的工况具有很大的模糊性。这些都使得难以精确地控制风电机组参与系统调频。风电参与系统调频是一种复杂、多参数、多约束的非线性优化问题。

智能算法能够弥补传统数学方法的不足，在求解复杂的非线性问题时优势很明显。智能算法是一类模仿自然界的规律来求解实际问题的算法，自20世纪60年代被提出后，发展迅速，现在已经广泛应用于工程实际。目前应用于风电调频的智能算法主要有神经网络(ANN)，粒子群算法(PSO)，遗传算法(GA)，模糊理论(FST)等，其原理和特点见表2。

表 2 智能算法在风电调频中的研究现状

Table 2 Research status of intelligent algorithm in wind

power frequency regulation			
智能算法	原理	特点	应用现状
ANN	模拟人脑的神经网络	适合处理不确定信息	频率偏差评估 <sup>[55]</sup> 风功率预测 <sup>[58]</sup>
GA	基于生物进化理论	具有自组织、自适应和自学习性	协调控制 <sup>[57]</sup> 备用容量优化 <sup>[59]</sup>
PSO	源于对鸟群捕食的行为研究	简单容易实现，参数设定简单	参数优化 <sup>[56,60]</sup> 储能配置 <sup>[61]</sup>
FST	基于模糊集合论	非线性控制方法，工作范围宽，适用范围广	协调控制 <sup>[57]</sup> 参数整定 <sup>[62,64]</sup>

文献[55]将风电场作为一个整体，采用神经网络算法对风电并网系统在干扰下的频率偏移进行评估，对系统频率波动情况进行判断，为制定调频策略提供了依据。针对含有火电、风电以及光伏发电的混合机组，文献[56]利用粒子群算法优化了风火光混合发电机组的参数，加快了系统的响应速度。文章[57]研究了系统反馈与遗传算法交叉概率的模糊关系，将遗传算法与控制经验相结合，设计出一种改进的负荷频率控制器辅助风场参与系统调频，提高了系统频率调整的速度与精度。

智能算法具有协作能力、学习能力和处理非线性问题的优点，可以很好地处理控制参数整定，功率预测，机组之间、电场之间地协调控制等问题。选择合适智能算法，能够很好地解决风电调频的相关问题。未来智能算法将会更广泛地运用于风场参与系统调频的控制过程中。

### 2.4 基于电压源型高压直流输电的风电调频技术

近年来海上风电的迅速发展，VSC-HVDC 技术

大量应用到风电并网系统, 给风电调频带来了新的问题。VSC-HVDC 是一种新型直流输电技术, 其运用了全控型开关器件、电压源型换流器、脉冲宽度调制等技术<sup>[65-66]</sup>。基于大功率的电力电子器件, VSC-HVDC 输电容量大、可控性好、环境友好, 被广泛用于风电并网中<sup>[67]</sup>, 并网结构如图 11 所示。

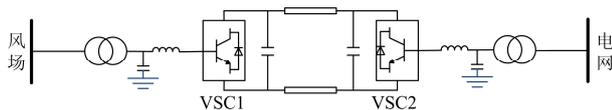


图 11 VSC-HVDC 并网结构图

Fig. 11 Structure of grid connection by VSC-HVDC

两端变流站均采用相同的 VSC 结构, 中间采用直流输电线路连接海上风电场和陆地交流电网。VSC-HVDC 的控制是通过控制两端的变流站来实现的。其控制原理<sup>[68]</sup>如下, 风场与变流器之间传输的功率  $P$ 、 $Q$  分别为

$$P = -\frac{UU_c}{X} \sin \delta \quad (4)$$

$$Q = \frac{U(U - U_c \cos \delta)}{X} \quad (5)$$

式中:  $U$  为风场输出交流母线电压的基频分量;  $U_c$  为变流器输出电压基频分量;  $\delta$  为  $U_c$  与  $U$  之间的相角差;  $X$  为变压器和变流器的等效阻抗。如式(4)所示有功功率主要与  $\delta$  有关: 当  $\delta < 0^\circ$  时, 变流器吸收有功功率; 当  $\delta > 0^\circ$  时, 变流器发出有功功率。如式(5)所示无功功率主要与变流器电压的大小有关: 当  $U - U_c \cos \delta > 0$  时, 变流器吸收无功功率; 当  $U - U_c \cos \delta < 0$  时, 变流器释放无功功率。故可以通过控制  $\delta$  的大小来控制有功功率的大小和方向, 通过控制  $U_c$  的大小来控制无功功率的大小和方向。

VSC-HVDC 的运行方式分为两种: 风机集中控制并网和风机分散控制并网<sup>[69]</sup>。风机集中控制并网方式如图 12 所示, 各风力发电机经变压器同时并入公共交流母线上。该方式所含元件少, 结构简单, 集中控制各风电机组的有功功率和无功功率, 但不利于各机组的转速控制。

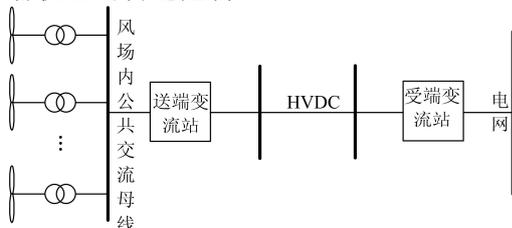


图 12 基于 VSC-HVDC 的风机集中控制并网

Fig. 12 Structure of centralized grid connection with wind power by VSC-HVDC

如图 13 所示, 风电机组和送端变流器串联后同时并联于直流母线, 构成多端直流输电系统(Multi Terminal DC System, MTDC)<sup>[70]</sup>。风机经分散控制并网虽然所含元件较多, 结构较复杂, 但是易于控制每台风机的转速。送端的变流器可以独立控制相应的风力发电机, 以便获取最大风能, 提高风能的利用率。

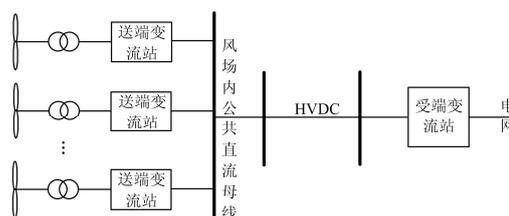


图 13 基于 VSC-HVDC 的风机分散控制并网

Fig. 13 Structure of dispersive grid connection with wind power by VSC-HVDC

VSC-HVDC 输电方式电气耦合很弱, HVDC 系统隔离了两端设备。“背靠背”变流站并网使得风机转速不再受电网频率的制约, 同时风电对网侧的扰动不敏感, 这样牺牲了风场对系统频率的支援能力。

针对此问题, 文献[71]对风电系统的惯性进行预测, 利用二次调频控制器, 提高系统阻尼, 减少负荷扰动时频率下降, 改善系统频率响应; 文献[72]利用 VSC-HVDC 交流侧的电压相角与电压源型整流器的移相角之间关系, 让交流侧的功率随直流侧进行调整, 支撑系统频率。在运行中 VSC-HVDC 连接的风电系统调频动作不协调引发频率振荡的问题, 文献[73]通过合理设置频率限制器和一次调频的动作死区, 避免了风电系统的频率振荡。文献[74]对 VSC-HVDC 连接的海上风电场的 DFIG, 采用简化控制方法来调节桨距角, 能够抑制频率和电压的波动, 但其在大型风电场中的应用效果尚不明确。文献[75]将直流侧电压作为通信信号对换流器进行控制, 让风电系统参与一次调频, 提供惯性响应, 减小了负荷变动时的频率偏差; 文献[76-77]在文献[75]的基础上提出一种协调控制方案, 利用高压直流输电直流侧的电容吸收或者释放能量弥补风电系统调频能力的不足, 提供频率支持, 改善频率响应特性, 但由于电容存储的能量有限, 只能对频率提供短暂的支持。

VSC-HVDC 虽然是海上风电输送方式的首选, 但是实际应用中海上风电参与系统频率策略的效果还有待验证。与风机集中式并网相比, 多端直流输电系统能够面向每台风机进行控制, 频率调整更为灵活。VSC-HVDC 采用不同的运行方式下, 风机组

之间的相互影响作用机制也不一样, 风机之间的协调控制策略也有待进一步研究。

### 2.5 虚拟同步发电机技术

为使风机模拟出同步发电机的调频特性, 虚拟同步发电机技术得到了广泛关注。虚拟同步发电机基本思想就是采用适当的控制算法对风电系统并网的变流器进行控制, 使风机具有与同步发电机相似的频率和电压控制特性, 以提高风电系统的频率响应能力<sup>[78]</sup>。VSG 的控制方法主要有电流控制型, 电压控制型和同步逆变器, 其特点和原理如表 3 所示。电压控制型和同步逆变器控制方法可以改善风电系统的频率响应特性。

表 3 VSG 的控制方法及特点

Table 3 Control method and characteristics of VSGs

控制方法	电流控制型	电压控制型	同步逆变器
原理	模拟同步发电机的摇摆方程	从频率控制和电压控制两个方面模拟同步发电机的转子惯量与无功-电压特性	模拟同步发电机的机电暂态和电磁暂态特性
特点	等效于电流源, 难以为用户提供电压和频率支撑	具有功率控制和调频调压双重功能	模型更加精确, 动态响应特性更好

文献[79]将储能电池配于置风电场交流侧, 采取基于同步发电机模型的控制策略控制储能系统的逆变器, 使风电场具有同步发电机一样的有功输出和频率特性, 平滑了风电场输出功率和频率特性, 其结构如图 14 所示。文献[80]利用风电机组逆变器与同步发电机原理结构的相似性, 模拟同步发电机的惯性响应特性和频率响应特性, 取得了较好的频率控制效果。文献[81]模拟了同步发电机的向量关系, 转子运动方程, 主要的频率调节特性和无功功率调节的延迟特性, 提高系统的惯性响应。在文献[81]基础上, 文献[82]提出一种增强的 VSG 控制, 基于状态空间分析调整虚拟同步电抗, 增加系统阻尼以获得合适的暂态有功响应, 提供惯性支持。文献[83]提出一种实时控制 VSG 的参数, 追踪稳态频率, 该方法使风电系统能够依据系统负荷的变化提供合适的惯性响应, 在系统频率调节过程中作用效果明显。

虚拟同步发电机技术, 可以很好地模拟同步机组系统的惯性特性, 给风机并网和风电参与系统调频提供了新的思路。然而虚拟同步发电机技术实现风电调频中还存在诸多的问题: VSG 中常存在有功功率与无功功率的耦合问题, 无功控制和有功控制之间的相互影响有待研究; VSG 能否具有实际中同

步机一样的并网特性; 控制参数的不同对 VSG 的性能影响较大, 需要根据风场和电网两侧的工况来整定参数, 已达到优化 VSG 的调频性能; VSG 并网会增强两侧的耦合, 这会加大系统稳定控制的复杂程度。

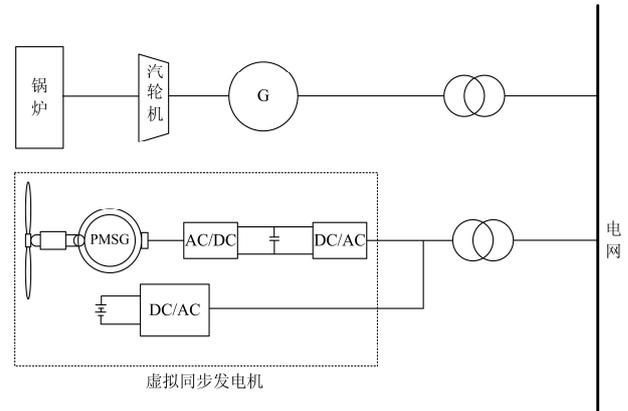


图 14 虚拟同步发电机等效系统

Fig. 14 Equivalent virtual synchronous generator system

### 3 风力发电调频技术的研究展望

目前国内外对风电参与调频的方法研究不断深入, 取得了一定成果, 但依然存在较多问题急待研究。

1) 虽然目前在风电参与系统调频方面有很多研究成果, 但不同类型能源形式调频时的相互作用机理尚不明确, 尤其是再考虑柔性负荷的作用下, 源荷双侧的高度不确定性对于风电调频的影响情况依然需要深入研究。

2) 风电调频算法的参数设定依然缺乏科学依据。目前的算法一般借鉴通用的控制算法, 其参数设定中虽然考虑了风速等因素, 但大多数参数设定依然缺乏明确的标准, 未能充分对应风电运行实际。

3) 风电参与系统调频容量的评估方法急待研究。功率备用控制需要风机减载运行, 附加储能系统需要额外的投资, 风电参与系统调频与风场的经济运行之间矛盾尚未有统一的定论。风电参与系统频率调整, 不仅需要安装控制设备, 研究高效的算法, 也需要电网调度依据运行实际需求科学评估参与频率调整的风电的容量, 以制定科学的运行方案。

### 4 结束语

风电的迅速发展可以缓解全球能源危机、减轻环境污染, 与此同时大量风电并入电力系统, 减小系统惯性, 给电力系统的频率稳定性带来了挑战。目前风电参与系统调频的控制策略有很多, 但各种控制策略都有着自身的一些缺陷, 并不能完全满足风电参与系统调频的要求。同时, 各种策略的研究

都是基于理论和仿真的层面,并未运用到实际的电力系统中,需要在综合考虑风电运行的复杂工况基础上展开更符合实际的电力系统运行场景的仿真和实验,才能确定各算法的实用效果。智能算法,虚拟同步发电机技术的快速发展,运用到风电参与系统调频的过程中,将会改善系统的频率响应特性。海上风电中的 VSC-HVDC 去耦连接风场与电网、信号传输延迟,风电场不能够及时响应陆地电网的频率变化,加大了风电参与系统调频的难度,需要进一步深入研究。相信随着风电调频技术的快速发展,电力系统的风电接纳能力会大大提高,能源与环境问题将会得到相对完善的解决。

### 参考文献

- [1] LEE K S, KIM M K. A study on frequency control and active power control of wind turbine generation system for PMSG[J]. Transactions of the Korean Institute of Electrical Engineers, 2014, 63(5): 597-607.
- [2] 刘新宇, 姚致清, 陈铁军. 变速恒频双馈风力发电机结构分散化并网控制[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(4): 97-104.  
LIU Xinyu, YAO Zhiqing, CHEN Tiejun. Cutting-in control of the doubly-fed variable speed and pitch wind-power generator based on structure decentralized control[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(4): 97-104.
- [3] EON Netz GmbH. Grid connection regulations for high and extra high voltage[R]. Bayreuth: EON Netz GmbH, 2006.
- [4] BEVRANI H, GHOSH A, LEDWICH G. Renewable energy sources and frequency regulation: survey and new perspectives[J]. IET Renewable Power Generation, 2010, 4(5): 438-457.
- [5] 风电场接入电力系统技术规定: GB/T 19963—2011[S]. 北京: 中国标准出版社, 2011.
- [6] DIAZ-GONZALEZ F, HAU M, SUMPER A, et al. Participation of wind power plants in system frequency control: Review of grid code requirements and control methods[J]. Renewable & Sustainable Energy Reviews, 2014, 34(29): 551-564.
- [7] GONZALEZ-LONGATT F M. Effects of the synthetic inertia from wind power on the total system inertia: simulation study[C] // International Symposium on Environment Friendly Energies and Applications, England, June 25-27, 2012: 389-395.
- [8] 彭喜云, 刘瑞叶. 变速恒频双馈风力发电机辅助系统调频的研究[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(11): 56-61.  
PENG Xiyun, LIU Ruiye. Research on the frequency regulation of adding system of VSCF double-fed wind generator[J]. Power System Protection and Control, 2011, 39(11): 56-61.
- [9] MORREN J, DE-HAAN S W H, KLING W L, et al. Wind turbines emulating inertia and supporting primary frequency control[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2006, 21(1): 433-434.
- [10] 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.
- [11] TARNOWSKI G C, KJAR P C, Sorensen P E, et al. Variable speed wind turbines capability for temporary over-production[C] // Power & Energy Society General Meeting, Canada, July 26-30, 2009: 1-7.
- [12] 焦平洋. 双馈风电机组参与微网调频的控制策略研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2015.  
JIAO Pingyang. Research on frequency strategy of doubly-fed induction generator in microgrid[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2015.
- [13] 陈宇航, 王刚, 侍乔明, 等. 一种新型风电场虚拟惯量协同控制策略[J]. 电力系统自动化, 2015, 39(5): 27-33.  
CHEN Yuhang, WANG Gang, SHI Qiaoming, et al. A new coordinated virtual inertia control strategy for wind farms[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(5): 27-33.
- [14] RIJCKE S D, TIELENS P, RAWN B, et al. Trading energy yield for frequency regulation: optimal control of kinetic energy in wind farms[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2015, 30(5): 2469-2478.
- [15] RAMTHARAN G, EKANAYAKE J B, JENKINS N. Frequency support from doubly fed induction generator wind turbines[J]. IET Renewable Power Generation, 2007, 1(1): 3-9.
- [16] 潘文霞, 全锐, 王飞. 基于双馈风电机组的变下垂系数控制策略[J]. 电力系统自动化, 2015, 39(11): 126-131.  
PAN Wenxia, QUAN Rui, WANG Fei. Droop control with variable coefficient based on doubly-fed power generator[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(11): 126-131.
- [17] 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.
- [18] 陶骞, 贺颖, 潘杨, 等. 电力系统频率分布特征及改进一次调频控制策略研究[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(17): 133-138.  
TAO Qian, HE Ying, PAN Yang, et al. Characteristics of power system frequency abnormal distribution and improved primary frequency modulation control strategy[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(17): 133-138.
- [19] 邹贤求, 吴政球, 陈波, 等. 变速恒频双馈风电机组频率控制策略的改进[J]. 电力系统及其自动化学报, 2011, 23(3): 63-68.  
ZOU Xianqiu, WU Zhengqiu, CHEN Bo, et al. Improved frequency control strategy for variable-speed constant-frequency doubly-fed induction generator wind turbines[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2011, 23(3): 63-68.
- [20] ELITANI S, ANNAKAGE U D, JOOS G. Short-term frequency support utilizing inertial response of DFIG wind turbines[C] // IEEE Power and Energy Society General Meeting, America, July 24-29, 2011: 1-8.
- [21] LEE J, MULJADI E, SORENSEN P, et al. Releasable kinetic energy-based inertial control of a DFIG wind power plant[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2015, 7(1): 1-10.
- [22] YOU R, BARAHONA B, CHAI J, et al. Frequency support capability of variable speed wind turbine based on electromagnetic coupler[J]. Renewable Energy, 2015, 74: 681-688.
- [23] 蒋文韬, 付立军, 王刚, 等. 直驱永磁风电机组虚拟惯量控制对系统小干扰稳定性影响分析[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(11): 33-40.  
JIANG Wentao, FU Lijun, WANG Gang, et al. Impact of direct-drive permanent magnet wind turbines virtual inertia control on power system small signal stability analysis[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(11): 33-40.
- [24] 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 Ying, WANG Chunling, 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.
- [25] SINGARAO V Y, RAO V S. Frequency responsive services by wind generation resources in United States[J]. Renewable & Sustainable Energy Reviews, 2016, 55: 1097-1108.
- [26] SUN Yuanzhang, ZHANG Zhaosui, LI Guojie. Review on frequency control of power systems with wind power penetration[C] // International Conference on Power System Technology, Hangzhou, October 24-28, 2010: 1-8.
- [27] MOUTIS P, LOUKARAKIS E, PAPATHANASIOU S, et al. Primary load-frequency control from pitch-controlled wind turbines[C] // PowerTech, Bucharest, June 28-July 2, 2009: 1-7.
- [28] ERLICH I, WILCH M. Primary frequency control by wind turbines[J]. Power & Energy Society General Meeting: IEEE, 2010: 1-8.
- [29] GHOSH S, KAMALASADAN S, SENROY N, et al. Doubly fed induction generator (DFIG)-based wind farm control framework for primary frequency and inertial response application[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2015, 1(7): 1723-1727.
- [30] WILCHES-BERNAL F, CHOW J H, SANCHEZ-GASCA J J. A Fundamental study of applying wind turbines for power system frequency control[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2015, 31(2): 1-10.
- [31] ALMEIDA R G D, CASTRONUOVO E D, LOPES J A P. Optimum generation control in wind parks when carrying out system operator requests[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2006, 21(2): 718-725.
- [32] TENINGE A, JECU C, ROYE D, et al. Contribution to frequency control through wind turbine inertial energy storage[J]. IET Renewable Power Generation, 2009, 3(3): 358-370.
- [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.  
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.
- [34] 李欣然, 黄际元, 陈远扬, 等. 大规模储能电源参与电网调频研究综述[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(7): 145-153.  
LI Xinran, HUANG Jiyuan, CHEN Yuanyang, et al. Review on large-scale involvement of energy storage in power grid fast frequency regulation[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(7): 145-153.
- [35] REN G, MA G, CONG N. Review of electrical energy storage system for vehicular applications[J]. Renewable & Sustainable Energy Reviews, 2015, 41: 225-236.
- [36] 毛发, 章学来, 丁磊, 等. 热管式相变储能系统蓄/放

- 热性能试验[J]. 热力发电, 2016, 45(11): 48-53.  
MAO Fa, ZHANG Xuelai, DING Lei, et al. Experimental research on heat charging and discharging performance of heat pipe phase change energy storage system[J]. Thermal Power Generation, 2016, 45(11): 48-53.
- [37] 何青, 刘辉, 刘文毅. 风电-压缩空气储能系统火用和火用成本分析模型[J]. 热力发电, 2016, 45(2): 34-39.  
HE Qing, LIU Hui, LIU Wenyi. Exergy and exergy cost analysis model for wind-compressed air energy storage system[J]. Thermal Power Generation, 2016, 45(2): 34-39.
- [38] 刘世林, 文劲宇, 孙海顺. 适用于风电功率调控的复合储能系统及其控制策略[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(1): 95-102.  
LIU Shilin, WEN Jinyu, SUN Haishun. Hybrid energy storage system and its control strategies intended for wind power conditioning[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(1): 95-102.
- [39] CHENG Yunzhi, TABRIZI M, SAHNI M, et al. Dynamic available AGC based approach for enhancing utility scale energy storage performance[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2014, 5(2): 1070-1078.
- [40] VIDYANANDAN K V, SENROY N. Frequency regulation in a wind-diesel powered microgrid using flywheels and fuel cells[J]. IET Generation Transmission & Distribution, 2016, 10(3): 780-788.
- [41] MIAO Lu, WEN Jinyu, XIE Hailian, et al. Coordinated control strategy of wind turbine generator and energy storage equipment for frequency support[C] // Industry Applications Society Meeting, USA, October 18-22, 2015: 1-7.
- [42] 张川, 杨雷, 牛童阳, 等. 平抑风电出力波动储能技术比较及分析[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(7): 149-154.  
ZHANG Chuan, YANG Lei, NIU Tongyang, et al. Comparison and analysis of energy storage technology to balance fluctuation of wind power output[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(7): 149-154.
- [43] QU Liyan, WEI Qiao. Constant power control of DFIG wind turbines with supercapacitor energy storage[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2011, 47(1): 359-367.
- [44] 周婷婷, 李欣然, 姜学皎. 储能电源参与电网调频的需求评估方法[J]. 电力建设, 2016, 37(8): 65-71.  
ZHOU Tingting, LI Xinran, JIANG Xuejiao. Demands assessment method of energy storage power sources in grid frequency regulation[J]. Electric Power Construction, 2016, 37(8): 65-71.
- [45] 叶瑞丽, 郭志忠, 刘瑞叶, 等. 基于风电功率预测误差分析的风电场储能容量优化方法[J]. 电力系统自动化, 2014, 38(16): 28-34.  
YE Ruili, GUO Zhizhong, LIU Ruiye, et al. A wind energy storage capacity optimization method based on the analysis of wind power prediction error[J]. Automation of Electric Power Systems, 2014, 38(16): 28-34.
- [46] 黄际元. 储能电池参与电网调频的优化配置及控制策略研究[D]. 长沙: 湖南大学, 2015.  
HUANG Jiyuan. Study on optimal allocation and control strategy design of battery energy storage system for power grid frequency regulation[D]. Changsha: Hunan University, 2015.
- [47] RODRIGUEZ-AMENEDO J L, ARNALTE S, BURGOS J C. Automatic generation control of a wind farm with variable speed wind turbines[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2002, 17(2): 279-284.
- [48] CHANG-CHIEN L, HUNG C H, YIN Y C. Dynamic reserve allocation for system contingency by DFIG Wind farms[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2008, 23(2): 729-736.
- [49] CHANG-CHIEN L, YIN Y C. Strategies for operating wind power in a similar manner of conventional power plant[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2009, 24(4): 926-934.
- [50] 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, 2013, 37(9): 1-6.  
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, 2013, 37(9): 1-6.
- [51] MAURICIO J M, MARANO A, GOMEZ-EXPOSITO A, et al. Frequency regulation contribution through variable-speed wind energy conversion systems[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2009, 24(1): 173-180.
- [52] 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.
- [53] 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): 601-612.
- [54] ZHAO Jingjing, XUE Lü, HU Xiaoyang, et al. Coordinated microgrid frequency regulation based on DFIG variable coefficient using virtual inertia and primary frequency control[J]. IEEE Power & Energy Society, 2016, 31(3): 833-845.
- [55] 蒋望. 风电并网系统频率响应分析及控制策略研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2015.  
JIANG Wang. Research on frequency response and control strategy of wind farm integrated power systems[D]. Chongqing: Chongqing University, 2015.
- [56] DAS D C, ROY A K, SINHA N. PSO based frequency controller for wind-solar-diesel hybrid energy generation/energy storage system[C] // International Conference on Energy, Automation, and Signal, Santiago, December 28-30, 2011: 262-279.
- [57] 杨宇航, 杨秀媛, 张巧杰, 等. 模糊遗传算法在含风电负荷频率控制中的应用[J]. 电网技术, 2013, 38(增刊 1): 1-5.  
YANG Yuhang, YANG Xiuyuan, ZHANG Qiaojie, et al. Application of fuzzy genetic algorithm in load frequency control with wind farm[J]. Power System Technology, 2013, 38(S1): 1-5.
- [58] 肖迁, 李文华, 李志刚, 等. 基于改进的小波-BP 神经网络的风速和风电功率预测[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(15): 80-86.  
XIAO Qian, LI Wenhua, LI Zhigang, et al. Wind speed and power prediction based on improved wavelet-BP neural network[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(15): 80-86.
- [59] 檀晓林. 含大规模风电场的电力系统备用容量优化研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2014.  
TAN Xiaolin. Reserve capacity optimization of the power system with large-scale wind farm[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2014.
- [60] CHAINES, TRIPATHY M, SATPATHY S. NSGA-II based optimal control scheme of wind thermal power system for improvement of frequency regulation characteristics[J]. Ain Shams Engineering Journal, 2015, 23(3): 851-863.
- [61] 高孝天. 配合风电的电池储能系统控制策略研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2013.  
GAO Xiaotian. Research on the control strategies of battery energy storage system for wind power plant[D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2013.
- [62] 姚骏, 赵磊, 刘奥林, 等. 基于模糊比例-微分控制的永磁直驱风电机组频率调节[J]. 电网技术, 2014, 38(11): 3095-3102.  
YAO Jun, ZHAO Lei, LIU Aolin, et al. Fuzzy proportional plus-derivative control based frequency regulation of permanent magnet direct-drive wind power generation unit[J]. Power System Technology, 2014, 38(11): 3095-3102.
- [63] 刘奥林. 含飞轮储能单元的永磁直驱风电系统频率调节控制策略研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2014.  
LIU Aolin. Research on the frequency regulation control strategy for direct-driven permanent magnet wind power generation system with flywheel energy storage unit[D]. Chongqing: Chongqing University, 2014.
- [64] 曹红, 陈耀, 王冬, 等. 基于模糊转矩的永磁同步风力发电机输出功率的平滑控制策略研究[J]. 陕西电力, 2017, 45(3): 11-16.  
CAO Hong, CHEN Yao, WANG Dong, et al. Fuzzy torque based output power smoothing control strategies for direct drive permanent magnet synchronous wind turbine[J]. Shaanxi Electric Power, 2017, 45(3): 11-16.
- [65] KOROMPILI, WUQ, ZHAO H. Review of VSC HVDC connection for offshore wind power integration[J]. Renewable & Sustainable Energy Reviews, 2016, 59: 1405-1414.
- [66] 康晓蒙, 苏勋文, 付松涛, 等. 基于 VSC-HVDC 阻尼控制次同步振荡研究综述[J]. 陕西电力, 2016, 44(8): 1-5.  
KANG Xiaomeng, SU Xunwen, FU Songtao, et al. Review on damping control sub-synchronous oscillation based on VSC-HVDC[J]. Shaanxi Electric Power, 2016, 44(8): 1-5.
- [67] 汪璐, 邵如平, 王雅璐. 基于海上大型风电场 VSC-HVDC 系统电网侧控制器的设计[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(17): 107-112.  
WANG Lu, SHAO Ruping, WANG Yalu. Grid side controller design of VSC-HVDC system based on large offshore wind farm[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(17): 107-112.
- [68] ADAM G P, GOWAID I A, FINNEY S J, et al. Review of DC-DC converters for multi-terminal HVDC transmission networks[J]. IET Power Electronics, 2016, 9(2): 281-296.
- [69] 李响, 韩民晓, 许东. 直流串并联海上风电机组控制策略[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(3): 46-52.  
LI Xiang, HAN Minxiao, XU Dong. Control strategy of DC parallel-series offshore wind turbines[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(3): 46-52.
- [70] RAHMAN M H, XU Lie, YAO Liangzhong. Protection of large partitioned MTDC networks using DC-DC converters and circuit breakers[J]. Protection and Control of Modern

- Power Systems, 2016, 1: 9pp.  
DOI 10.1186/s41601-016-0030-0
- [71] 陈亦平, 程哲, 张昆, 等. 高压直流输电系统孤岛运行调频策略[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(4): 96-102.  
CHEN Yiping, CHENG Zhe, ZHANG Kun, et al. Frequency regulation strategy for islanding operation of HVDC[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(4): 96-102.
- [72] ØDEGARD J N. Laboratory demonstration of frequency support provision from VSC-HVDC-connected full converter wind turbines[D]. Trondheim: Norwegian University of Science and Technology, 2015.
- [73] CASTRO L M, ACHA E. On the provision of frequency regulation in low inertia AC grids using HVDC systems[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2016, 7(6): 2680-2690.
- [74] MEERE R, O'MALLEY M, KEANE A. VSC-HVDC link to support voltage and frequency fluctuations for variable speed wind turbines for grid connection[C] // IEEE PES International Conference and Exhibition on Innovative Smart Grid Technologies, Berlin, October 14-17, 2012: 1-5.
- [75] MORERIA C L, GOUVEIA J R, SOLVA B. Participation of multi-terminal HVDC grids in frequency regulation services[C] // International Conference on Compatibility and Power Electronics, Portugal, June 24-26, 2015: 202-209.
- [76] LIU Zhongzhi, CHEN Zhe. Contribution of VSC-HVDC to frequency regulation of power systems with offshore wind generation[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2015, 30(3): 918-926.
- [77] 张武其, 吕洋. 向弱电网供电的 VSC-HVDC 系统的模拟惯量控制策略研究[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(6): 104-110.  
ZHANG Wuqi, LÜ Yang. Emulation inertia control strategy for VSC-HVDC supplying weak network[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(6): 104-110.
- [78] ZHONG Q C, WEISS G. Synchronverters: inverters that mimic synchronous generators[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2011, 58(4): 1259-1267.
- [79] 王思耕, 葛宝明, 毕大强. 基于虚拟同步发电机的风电场并网控制研究[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(21): 49-54.  
WANG Sigeng, GE Baoming, BI Daqiang. Control strategies of grid-connected wind farm based on virtual synchronous generator[J]. Power System Protection and Control, 2011, 39(21): 49-54.
- [80] 侍乔明, 王刚, 付立军, 等. 基于虚拟同步发电机原理的模拟同步发电机设计方法[J]. 电网技术, 2015, 39(3): 783-790.  
SHI Qiaoming, WANG Gang, FU Lijun, et al. A design method of simulative synchronous generator based on virtual synchronous generator theory[J]. Power System Technology, 2015, 39(3): 783-790.
- [81] MENG Jianhui, SHI Xinchun, WANG Yi, et al. A virtual synchronous generator control strategy for distributed generation[C] // China International Conference on Electricity Distribution, Shenzhen, September 23-26, 2014: 495-498.
- [82] LIU J, MIURA Y, BEVRANI H, et al. Enhanced virtual synchronous generator control for parallel inverters in microgrids[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2017, 8(5): 2268-2277.
- [83] ALIPOOR J, MIURA Y, ISE T. Power system stabilization using virtual synchronous generator with alternating moment of inertia[J]. IEEE Journal of Emerging & Selected Topics in Power Electronics, 2015, 3(2): 451-458.

收稿日期: 2016-10-23; 修回日期: 2017-04-28

作者简介:

赵嘉兴(1970—), 男, 工程硕士, 高级工程师, 研究方向为风电参与电力系统调频; E-mail: 875261882@qq.com

高伟(1982—), 男, 工程硕士, 高级工程师, 研究方向为风电并网运行; E-mail: 916578561@qq.com

上官明霞(1981—), 女, 工程硕士, 高级工程师, 研究方向为储能与新能源并网。E-mail: 2569337513@qq.com

(编辑 张爱琴)