高渗透率风电并网下的电力系统调频技术综述

张 峰[1]，孟高军[1]，孙玉坤[1]，刘海涛[1]，李建林[2]

（1. 江苏省配电网智能技术与装备协同创新中心，江苏 南京 210000；
2. 中国电力科学研究院有限公司，北京 100192）

摘要：随着电力系统中风电比例不断提高，大规模风电并网对传统电力系统的有功功率平衡造成冲击，导致系统频率偏差，给电力系统安全带来严峻的威胁，维持电力系统频率稳定的需求日益迫切。针对风电并网背景下的电力系统一次调频方法，首先分析了大规模风电并网对电力系统传统一次调频手段的影响。随后在此基础上，研究阐述了风电机组转子动能控制、功率备用控制以及新兴附加储能系统控制参与电力系统一次调频的控制方法、基本原理及其特点。最后对未来风储联合参与高渗透风电背景下的电力系统一次调频所要研究的内容进行了展望。

关键词：风电；一次调频；转子动能控制；功率备用控制；储能系统

Review on power system frequency modulation technology under high permeability wind power grid connection

ZHANG Feng[1], MENG Gaojun[1], SUN Yukun[1], LIU Haitao[1], LI Jianlin[2]

(1. Jiangsu Collaborative Innovation Center for Smart Distribution Network, Nanjing 210000, China;
2. China Electric Power Research Institute, Beijing 100192, China)

Abstract: With the increasing proportion of wind power in power system, large-scale wind power grid connection has an impact on the active power balance of traditional power system, resulting in system frequency deviation, which poses a serious threat to the security of power system. The need to maintain the frequency stability of power system is becoming more and more urgent. Aiming at the primary frequency modulation method of power system under the background of wind power grid connection, the influence of large-scale wind power grid connection on the traditional primary frequency modulation method of power system is analyzed. Then, on this basis, the control methods, basic principles and characteristics of wind turbine rotor dynamic energy control, power standby control and new additional energy storage system control participating in primary frequency modulation of power system are studied and expounded. Finally, the research contents of primary frequency modulation of power system under the background of combined participation of wind storage in high permeability wind power are prospected.

Key words: wind power; primary FM; rotor dynamic energy control; power standby control; energy storage system

0 引言

随着化石能源的急剧消耗与环境恶化的问题日益严重，人类社会的生存与发展面临严峻的挑战。以风能和太阳能为代表的新能源的大规模开发利用，成为实现人类社会可持续发展

国家自然科学基金(51877101)；江苏省教育厅面上重大项目(18KJA470002)

的有效手段。“清洁替代”与“电能替代”是当前世界能源发展的重要趋势。风电技术以其技术发展成熟、可大规模开发利用等优点成为当前发展最为迅速的新能源发电技术。进入“十二五”以来，中国已经成为了世界上风电发展最快的国家，年均增速达到了34%。在全球范围内风力发电已经成为新能源开发的主要形式。

然而，受天气与季节的影响，风电输出功率具有间歇性与波动性。大规模风电机组的并网，给传统电力系统的安全稳定运行带来了严峻的挑战。风电机组输出功率的不确定性导致机组与电力系统中负荷之间动态有功平衡遭到破坏，引起系统频率偏差，从而引发电力系统频率稳定性问题，影响设备的正常运行，甚至造成大面积停电，导致整个系统的崩溃。

保证电力系统频率稳定是电力系统安全稳定运行的基本要求。与传统火电机组不同，目前应用最为广泛的变速恒频风电机组不具备响应系统频率变化的能力，无法参与系统频率调整。给风电大规模并网带来了困难，阻碍了风力发电技术的发展。随着储能技术的进步，利用大规模储能系统辅助风电机组参与电力系统一次调频受到广泛的关注。储能系统具有响应速度快、控制准确度高和爬坡率高等优点，能够有效实现对风电输出功率的快速追踪控制。通过与改进型风电机组的配合，能有效地实现高风电渗透下电力系统频率调节，提高电力系统的稳定性。

综合上述分析，本文首先介绍了电力系频率变动机理以及风电大规模并网对电力系统一次调频造成的影响。随后在此基础上，分析研究了当前改进型风电机组参与电网频率响应与一次频率调整的控制方式以及储能如何辅助风电机组参与一次调频的控制策略，对目前存在的风储调频控制策略的基本原理及其优缺点进行了阐述与分析。最后基于当前研究现状，对风储联合参与电力系统一次调频的研究方向进行了展望。

1 电力系统频率变动机理与风电对一次调频影响分析

1.1 电力系统频率变动机理

电力系统频率稳定是电力系统安全运行的基本要求，在我国，电力系统频率的波动范围为0.2～0.5 Hz，当系统频率偏差超过0.5 Hz时，会给电力系统的安全带来严重威胁。电力系统的频率变动是系统内负荷和发电机组共同作用的结果，电力系统频率稳定的实质为发电机与负荷之间的有功功率动态平衡问题。忽略系统阻尼，汽轮机转子运动方程表达式为

$$J\frac{\mathrm{d}\Omega}{\mathrm{d}t}=M_{\mathrm{t}}-M_{\mathrm{e}}=\Delta M=\frac{\Delta P}{\Omega} \tag{1}$$

式中，M_{e}为同步发电机的电磁阻转矩；M_{t}为汽轮机的蒸汽驱动转矩；ΔM为不平衡转矩；J为汽轮机转子的转动惯量；Ω为转子机械角速度；ΔP为发电机与负荷之间的不平衡功率。

由式（1）可知，当系统有功功率平衡时，$\mathrm{d}\Omega/\mathrm{d}t=0$，发电机转速维持稳定。当系统产生不平衡功率，即$\Delta P$不为0时，发电机转速发生变化。发电机转速与电力系统频率之间的关系为

$$f=\frac{np}{60} \tag{2}$$

结合式（1）可知，电力系统中不平衡功率的产生导致发电机转速发生了变化，从而导致系统频率变化，系统频率变化的加剧又导致发电机转速继续下降，如此陷入恶性循环，若不及时进行调频，最后会造成整个系统的频率崩坏，甚至导致整个系统的崩溃。

1.2 风电并网对一次调频的影响

风电发电因为风力与风电机组的特性，传统的电力系统一次调频手段已经无法满足响应频率变化需求。根据贝茨理论，风电机组的输出机械功率为

$$P_{\mathrm{m}}=C_{\mathrm{p}}(\lambda,\beta)\times\frac{1}{2}\rho Av^{3} \tag{3}$$

式中，P_m为涡轮机的机械功率输出；$C_p(\lambda,\beta)$为涡轮机的性能系数，是关于叶尖速比λ和桨叶角β的方程，用于表示风力涡轮机将风能转换为机械能的效率；ρ为空气密度；A为涡轮机叶片扫过的面积；v为风速。

该公式含义代表捕捉风能的能力，风能转化为涡轮机的机械能。由式（3）可知，风力组输出机械功率与风速呈三次方关系，因此风力机输出功率的不确定性比风速的不确定性更大，风力发电机的电能输出具有很大的不确定性，电力系统中会产生随机性、波动性较高的不平衡功率，使得电力系统频率波动加剧。由于传统火电机组的响应速度慢、控制准确度低，使得传统机组的调频手段无法满足高渗透风电背景下的电力系统调频需求。

并且当前风力发电技术的主流机型——变速恒频风电机组的机械功率与系统电磁功率完全解耦，转子转速与系统频率完全解耦，导致其无法响应系统频率变化。此外，变速恒频风电机组采用最大功率点追踪控制（Max Power Point Track，MPPT），风电机组一直处于最大功率点处运行，将所捕获的风能全部转化为电能输出，没有功率备用，无法提供一次频率调整服务，使得风电并网下的电力系统频率调控更为复杂。

2 高渗透风电背景下电力系统调频控制策略

综合上述分析，由于风能和机组自身运行特性的影响，当大规模风电并网后，会对电力系统频率稳定性造成严重的影响。为了解决这一问题，国内外众多学者对此展开了深入的研究，如何通过改进风机机组的运行策略，使风电机组也具有传统火电机组的应对频率变化能力成为当前研究的重点。与此同时，随着储能技术的发展，储能电池利用效率的不断提高和成本的不断下降，储能系统应用于高渗透率风电背景下的电力系统调频也受到了广泛的关注。

2.1 风电机组调频技术

2.1.1 转子动能控制

转子动能控制的原理是在风电机组有功功率控制系统引入附加功率控制环节，使得风电机组能像传统电机等旋转元件一样，在系统频率变化时提供巨大的转动动能，释放被风电机组变频器隐藏的转子动能，抑制系统频率变化。

（1）虚拟惯性控制

虚拟惯性控制是在风电机组的有功功率控制环节上加入附加功率控制环节，将系统频率实时变化率作为控制环节的输入，通过改变转子侧变流器电流参考值改变转子转速，虚拟出同传统火电机组一样的惯性效应，抑制系统频率的变化。

$$\Delta P = K_{ine}\frac{\mathrm{d}f}{\mathrm{d}t} \tag{4}$$

式中，ΔP为加入虚拟惯性环节后所获得的参考有功功率；K_{ine}为虚拟惯性系数，为负值。

虚拟惯性控制的主要作用为在系统频率变化初始阶段，抑制频率的快速变化。风电机组虚拟惯性控制如图1所示。

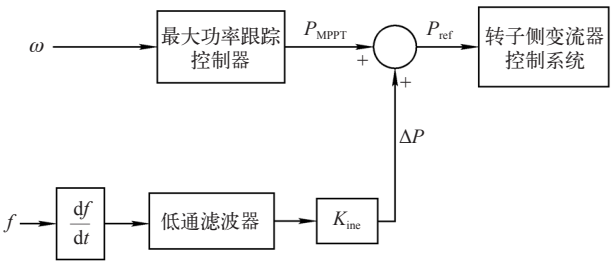

图1 风电机组虚拟惯性控制

Fig. 1 Virtual inertial control of wind turbine

国内外针对风电机组频率响应控制策略的研究开始较早，在2002年，文献[1]就提出了利用风力机转子中蕴藏的旋转惯量抑制系统频率变化的思路。文献[2]研究了风电机组的虚拟惯性控制的响应特性，证明了虚拟惯性控制可以使风电机组具有频率响应能力，能显著地提高风电并网背景下的电力系统频率稳定性。文献[3]提出了一种变虚拟惯性系数控制策略，可根

据频率变化率的变化与机组运行状态，对控制系数进行自适应调节，实现对机组可变出力的控制。

（2）虚拟下垂控制

虚拟下垂控制是在风电机组的有功功率控制环节上加入附加功率控制环节，将频率偏差Δf作为控制环节的输入，通过下垂控制系数得到转子提供动能转化的参考功率ΔP表达式为

$$\Delta P=K\Delta f \tag{5}$$

式中，K为虚拟下垂系数，为负值。与虚拟惯性控制相比，下垂控制的输出参考功率ΔP与频率偏差Δf有关，能在频率最低点附近进行较强支撑，减小系统频率偏差，但是响应速度低于虚拟惯性控制。风电机组虚拟下垂控制如图2所示。

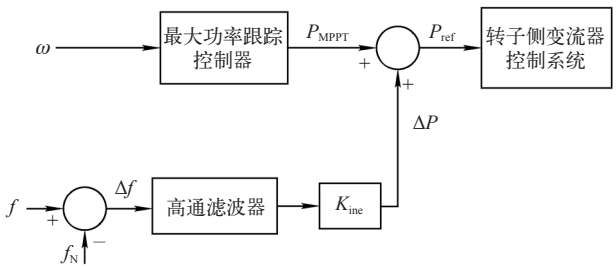

图2 风电机组虚拟下垂控制

Fig. 2 Virtual droop control of wind turbine

风电机组的调频能力与风速大小密切相关，不同风速下的风电机组下垂控制系数的大小对其调频能力的影响很大，固定的下垂系数在风速不确定性较大时动态响应能力不足，直接影响风电机组的调频能力。因此，当前对于风电机组虚拟下垂控制策略的控制主要集中在系数优化方面。文献[4]提出了根据不同状况下的风速变化，风电机组的虚拟自适应下垂控制策略，对虚拟下垂系数进行自适应调整，有效地提高了风电机组参与系统一次调频的动态响应能力。

为了更好地实现风电机组在系统频率波动时抑制波动和减小频率差的能力，在利用转子动能参与电力系统调频时，可以将虚拟惯性控制环节与虚拟下垂控制环节共同引入风电机组有功功率控制系统中，形成转子动能综合控制策略。

$$P=K\Delta f+K_{ine}\frac{\mathrm{d}f}{\mathrm{d}t} \tag{6}$$

（3）阶跃控制

虚拟下垂控制和虚拟惯性控制的原理都是模拟同步发电机组频率响应特性。变速恒频风电机组转子通过大量电力电子器件与电网相连，对电力电子器件下达指令，可以在短时间内快速改变转子侧变流器参考电流，迅速增加或减少输出功率，使风电机组转速发生变化，瞬时响应系统频率也发生变化，基于该原理提出了一种风电机组参与系统频率响应的阶跃控制。

阶跃控制示意图如图3所示。当t_1时刻系统频率下降时，通过阶跃控制，电力电力器件接收控制信号，改变转子侧参考电流大小，使得发电机组转速迅速下降，释放旋转动能响应系统频率变化；到t_2时，因旋转惯量有限，为防止发电机组转速继续降低，引发频率二次跌落，风电机组退出调频，同时吸收一部分机械能使转速回归。

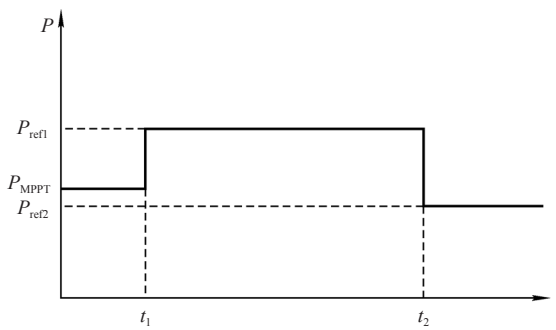

图3 阶跃控制示意图

Fig. 3 Schematic diagram of step control

通过上述分析可知，虚拟惯性控制、虚拟下垂控制以及阶跃控制都是在风电机组有功功率系统中加入附加环节，将风电机组的旋转动能转化为电磁功率输出，可以短暂地响应系统频率变化。

尽管通过转子动能控制可以使得风电机组快速响应系统频率发生的变化，然而风电机组转子动能控制目前还存在以下问题：①转子动

能有限，只能在短时间内提供功率支撑，转子转速变化超过一定范围可能会使得转速无法恢复，引发系统频率的崩溃；②在转子转速可恢复范围内，风电机组频率响应环节退出调频后，需要吸收或释放一部分机械能使得转子转速恢复正常，若风电机组退出调频的时机把握不当，容易使系统频率出现二次跌落或升高；③当系统频率出现波动时，受当前风速影响，风电机组在MPPT控制下转子的转速过低或过高，可能无法响应系统频率变化。

2.1.2 功率备用控制

风电机组的转子动能控制利用其转子蕴藏动能能在短时间内响应频率变化，但是参与系统一次调频能力不足，因此国内外专家学者提出一种功率备用控制，使风电机组运行于次优运行点，留取一部分功率备用，用于系统一次调频。其具体控制方法如下。

（1）超速减载控制

超速减载控制是转子转速控制的一种。转子转速控制的基本原理如图4所示。

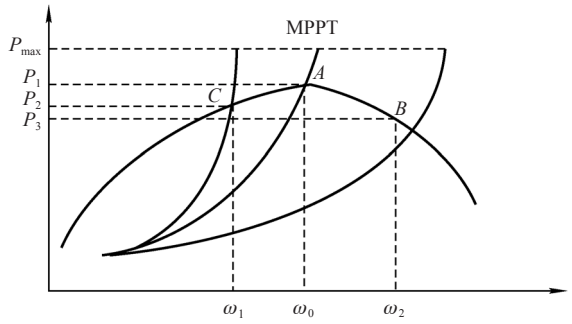

图4 超速减载控制原理

Fig. 4 Schematic diagram of overspeed load shedding control

当风电机组采取MPPT曲线控制时，对应工作点A，此状态下，风能被最大效率转换为电能，风电机组有功功率出力最大，没有多余容量参与系统一次调频。当风电机组的控制曲线左移或者右移时，风电机组的有功出力降低，保留了一部分功率容量。当系统频率降低时，通过改变风电机组的控制运行曲线，即可将这部分功率用于系统一次调频，维持系统稳定。

超速减载控制改变风电机组的运行曲线是通过增加风机转速大小实现的，属于转子转速控制的一种。因为通过降低转速（即左移控制运行曲线）来减小风电机组的有功出力，易引起小干扰稳定性问题，所以转子转速控制一般采用超速减载控制的方式。

（2）变桨控制

变桨控制原理和示意图如图5、图6所示。在风电机组转子转速相同的情况下，桨距角不同，风电机组的输出功率也不同。在转子转速一定时，桨距角越大，风电机组的输出功率越小，因此可以在风速、转子转速一定时，适当增加桨距角的角度，使风电机组工作状态处于次优状态，可为一次调频提供一定的功率备用，增强电力系统的一次调频能力。

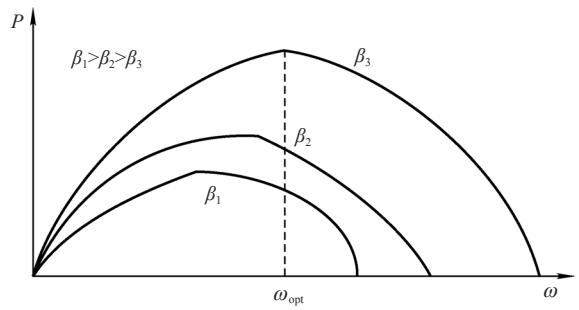

图5 变桨控制原理

Fig. 5 The principle of variable-pitch control

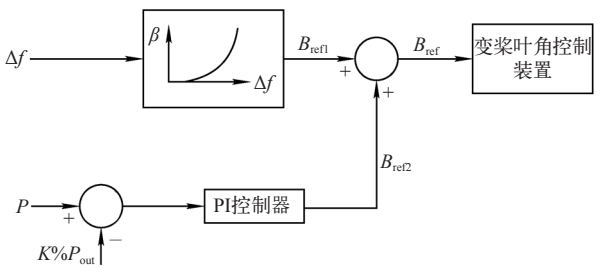

图6 变桨控制示意图

Fig. 6 Schematic diagram of variable-pitch control

功率备用控制为系统频率的调节提供了一定的容量，能有效应对系统频率变动产生的功率缺额问题，也能使系统内有功在短时间内恢复到一个新的平衡点，增强了系统的稳定性。当前国内外对于功率备用控制的研究大都集中在控制环节的设计与不同风速下控制模式的切换上，不同的风速下功率备用控制方式对系统调频有着显著的影响。为了提高不同风速下的

风电机组一次调频能力，文献[5]提出了一种中低风速下采用超速减载控制，高风速下采用变桨控制的综合控制方法，综合利用各自的优势，提高了不同风速区间的一次调频能力。文献[6]通过引入附加超速减载及桨距角协调控制环节，在中低风速下采用超速减载控制，多余的风能转化为功率热备用，在高风速时切换为变桨控制，有效地减少了桨距角的动作，延缓了机组的寿命。

超速减载控制与变桨控制都是通过改变风电机组的风能利用系数来使机组运行在次优运行状态，从而预留出多余的容量参与电力系统的一次调频。相较于转子动能控制，功率备用控制持续时间长，不仅能够及时响应抑制系统频率的变化，还可以对电力系统的频率进行调节，但是功率备用控制使得风电机组长期处于次最优运行状态，在一定程度上降低了风电场的发电效益。

2.2 储能电源辅助调频技术

储能系统具有响应速度快、控制准确度高、爬坡率高和运行方式灵活的优点，在高渗透率风电背景下的电网中配置一定量的储能系统，辅助风电机组参与电网一次调频，可以显著提高风电机组的调频能力，增强电力系统的频率稳定性。

储能系统通过电力电子器件与电网相连，不存在因电机损耗导致的调频死区问题，可以做到精确无差调节；通过PWM波控制电力电子开关，储能系统可以双向调节，灵活方便。

（1）储能类型的分类

储能系统按照能量转换形式分为机械储能、电化学储能、电气储能和热储能，如图7所示。

抽水蓄能是当前发展最为成熟、应用最为广泛的储能技术，但是受地理条件限制与技术成熟度影响，未来发展有限。超级电容、飞轮储能以及电池储能等新兴储能方式具有安装方便、控制灵活、响应速度快和爬坡率高的特点，在风电机组并网的电力系统中加入储能，可以实现对系统频率的快速跟踪，弥补风电机组参与电力调频能力的不足，提高系统稳定性。

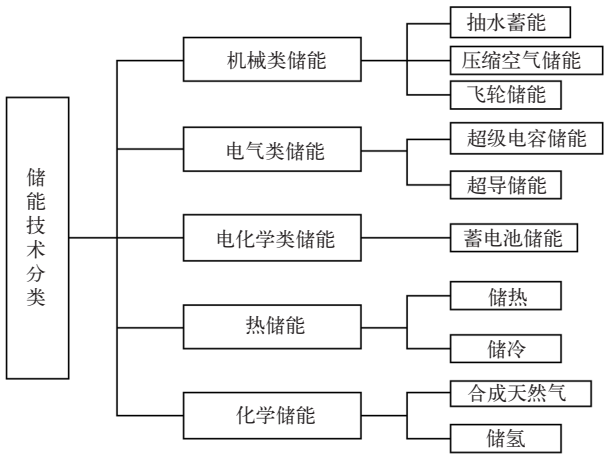

图7 储能系统类型

Fig. 7 Type of energy storage system

（2）储能系统频率响应模型

为了描述储能参与电力系统调频的功频特性，国内外研究人员根据电力系统调频特性，提出了包括理想模型、一阶模型、二阶模型和四阶模型在内的诸多储能系统频率响应模型。在目前的储能参与系统调频的研究中，为简化计算分析，一般采用文献[7]所提出的储能参与系统频率响应的一阶模型对储能系统的功频特性进行描述，其响应模型如图8所示。

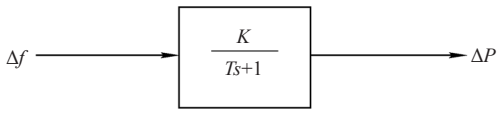

图8 储能系统的通用影响模型

Fig. 8 General impact model of energy storage system

图8中，储能系统频率响应模型的传递函数为一个增益环节与惯性环节，其中增益K表示频率偏差Δf与功率输出变化量ΔP之间的关系，T用于表示储能系统的延时。

（3）储能系统参与电力系统控制方式

储能系统通过电力电子器件直接与电网相连，理论上不存在调频死区，但是为了避免频繁充放电对储能系统寿命造成影响，一般制定与传统火电机组一样的调频死区：0.033 Hz。在该区间内，储能系统不动作。

储能系统的充放电过程都是由储能变流器

（Power Conversion System，PCS）主导，储能系统模拟传统调频机组的下垂特性参与一次调频，模拟机组的惯性响应过程实现系统频率变化的抑制。因此，虚拟下垂控制与虚拟惯性控制是储能系统参与系统调频的主要控制方式。

在储能系统辅助风电方面，文献[8]提出了风电场配置储能装置，实现风储联合系统调频控制，提高风电并网背景下的调频能力。文献[9]将超导储能系统作为附加功率环节，引入风电机组的有功功率控制系统，在转子动能控制环节退出调频时，提供转子转速恢复的能量，有效地避免了系统频率的二次跌落。一次调频针对波动幅度小、随机性大的负荷，超级电容储能系统循环寿命长，单位放电功率大，易于维护，用于电力系统频率响应与一次调频优势明显，因此文献[10]引入了超级电容器，将风电机组的转子动能和超级电容器同时作为虚拟惯性源，采用虚拟惯性控制有效地提高了对系统频率变化的响应能力，增强了风电并网下电力系统频率的稳定性。针对系统频率恢复过程中惯性控制阻碍系统频率变化的问题，文献[11]利用储能系统具有可灵活双向调节能力，提出一种正惯性控制与负惯性控制相结合的方法，在频率破坏初期抑制系统频率恶化，在频率恢复时加速频率恢复。

从现有的研究现状可知，储能系统在辅助风电机组参与电力系统一次调频中已经具备相应的应用能力。因此在控制层面，在计及储能循环寿命的情况下，设计研究出高效智能的附加储能系统的协调控制方案将是未来储能辅助风电机组参与电网调频亟需解决的问题。

3 风储联合一次调频的研究展望

当前国内外对风储联合参与电网一次调频展开了广泛的研究，并取得了一定的成果。但是仍然存在许多需要深入研究的问题。

风电机组在参与系统调频时自身的协调控制方案，需综合考虑风速、自身转子转速情况，综合转子动能控制、功率备用控制的优势，形成风电机组不同运行状态下的综合协调控制方案，确定转子转速控制的合适的切入和切除时机，避免转子的失速与超速对频率的二次影响。

储能系统在辅助风电机组参与一次调频时，需要综合风电站机组的运行状态，储能系统自身的荷电状态与电力系统的调频需求，协调与风电机组的频率方式，确定合适的动作时机，在充分考虑自身循环效率的情况下确定出力深度，在满足一次调频需求下，优化自身控制策略，维持储能系统的荷电状态。

容量配置是储能系统加入风电场中的首要问题。由于风电机组的功率备用控制需要风电机组处于次优点运行，使得风电场效益降低，且储能系统的安装与维护需要额外的投资，风储联合参与电网调频与风电并网的经济运行存在着矛盾。因此研究风电参与系统一次调频，需要综合考虑地域、电网调度调频需求、经济性评估及技术性控制方案，科学评估配置参与频率调整的风电与附加储能系统的容量，以制定经济性最优的风电联合调频应用模式。

4 结束语

随着可再生能源的开发利用规模继续扩大，电力系统中风电的比例将不断升高，为了实现风电的高效利用，消除大规模风电并网对传统电网频率稳定造成的冲击，国内外学者对风电机组联合储能参与电网一次调频开展广泛的研究，提出了风电机组与储能系统参与调频的各种控制策略。但是各种控制策略都有其自身应用的不足，不能完全满足电网调频需要。在实际应用中，风电机组与储能配合在实际工程中的各种控制方案技术协调性问题与经济成本问题还有待考量，需要继续进行深入研究。相信未来随着高渗透风电背景下调频技术的快速发展，电力系统的频率稳定性问题将会得到有效的解决。

参 考 文 献

[1] 张志恒，王毅，李和明．基于虚拟惯量的双馈风

电机组惯性控制方式研究[J]．现代电力，2013，30(6)：47-50．
ZHANG Zhiheng，WANG Yi，LI Heming．Study on inertia control mode of doubly-fed induction generator based on virtual inertia [J]．Modern Electric Power，2013，30 (6)：47-50．

[2] HURRADO S，GOSTALES G，DE L A，et al．A new power stabilizationcontrol system based on making use of mechanical inertia of avariable-speed wind-turbine for stand-alone wind-diesel applications [C]．IEEE 2002 28th Annual Conference of the Industrial Electronics Society，Sevilla，Spain，2002：3326-3331．

[3] LICARI J ，JANAKA EKANAYAKE．Inertia response from full-power converter-based permanent magnet wind generators[J]．Journal of Modern Power Systems and Clean Energy，2013，1(1)：26-33．

[4] 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)：126-131，186．
PAN Wenxia，QUAN Rui，WANG Fei．A variable droop control strategy for double-fed induction generators[J]．of Electric Power System，2015，39 (11)：126-131，186．

[5] 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 of double-fed induction generators wind turbine based on coordinated overspeed control and pitch control[J]．Automation of Electric Power System，2011，35 (17)：20-25．

[6] 陈炜，吴军，刘涤尘，等．计及有功备用的双馈感应发电机组功率优化控制[J]．电力系统及其自动化学报，2018，30(7)：51-58．
CHEN Wei，WU Jun，LIU Dichen，et al．Power optimization control of double-fed induction generator considering active power reserve[J]．Proceedings of the CSU-EPSA，2018，30(7)：51-58．

[7] MU Yunfei，WU Jianzhong，EKANAYAKE J，et al．Primary frequency response from electric vehicles in the great Britain power system[J]．IEEE Transactions on Smart Grid，2013，4(2)：1142-1150．

[8] 严干贵，王昱博，钟诚，等．风储联合系统调频控制策略研究[J]．电力建设，2016，37(12)：55-60．
YAN Gangui，WANG Yubo，ZHONG Cheng，et al．Frequency control strategy for wind storage combined system[J]．Electric Power Construction，2016，37 (12)：55-60．

[9] 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．

[10] 周天沛，孙伟．高渗透率下变速风力机组虚拟惯性控制的研究 [J]．中国电机工程学报，2017(2)：486-495．
ZHOU Tianpei，SUN Wei．Study on virtual inertial control for DFIG-based wind farm with high penetration[J]．Proceedings of the CSEE，2017 (2)：486-495．

[11] 邓霞，孙威，肖海伟．储能电池参与一次调频的综合控制方法[J]．高电压技术，2018，44(4)：1157-1165．
DENG Xia，SUN Wei，XIAO Hawei．Integrated control strategy of battery energy storage system in primary frequency regulation[J]．High Voltage Engineering，2018，44 (4)：1157-1165．

作者简介

张 峰

张峰（1995－），男，南京工程学院硕士研究生，研究方向为储能参与电网调频技术。

(收稿日期：2018－06－22)EA