

风电参与电力系统调频控制策略综述

刘洪波,彭晓宇,张 崇,张书钰

(东北电力大学 现代电力系统仿真控制与绿色电能新技术教育部重点实验室,吉林 吉林 132012)

摘要:随着可再生能源的大规模开发,以风能为代表的可再生能源大量并入电网,且渗透率不断提高。一方面,由于惯性时间常数较小的风电机组替代了传统发电机组,系统的总体惯量减少;另一方面,由于风能本身所具有的间歇性、随机性,系统的频率特性发生改变,调频能力随之减弱。风电参与调频是解决风电上网约束的有效手段之一。为此,对风电参与调频领域的研究进行综述,首先以双馈风电机组和永磁直驱风电机组这2类最常用的变速风电机组调频控制策略为例,综述风电机组转子超速控制、桨距角控制、虚拟惯量综合控制、虚拟同步发电机控制,储能与风电调频以及多控制策略联合的原理、优缺点和发展趋势等;然后针对风电场参与系统调频的若干问题进行分析;最后对本领域未来可研究的问题进行展望。

关键词:风电机组;风电场;调频;转子超速控制;桨距角控制;虚拟惯量综合控制;虚拟同步发电机控制;储能
中图分类号:TM 614 **文献标志码:**A **DOI:**10.16081/j.epae.202107029

0 引言

随着社会的不断发展,人民的生产生活与能源之间的关系变得更加密不可分,如今日益严重的能源危机使得大力开发利用可再生能源迫在眉睫。近年来,可再生能源发电技术被广泛重视,根据《国家能源局2021年一季度网上新闻发布会文字实录》^[1],截至2020年底,全国可再生能源发电装机容量为 9.34×10^8 kW,占全部电力装机的42.4%。而风力发电是可再生能源发电中最具竞争力、发展最快的发电技术,目前其突出特点在于成本较低并且技术成熟,可以大规模开发利用^[2]。2017年,世界风电公司排名第一的丹麦维斯塔斯集团曾宣布,将联合澳大利亚可再生能源公司Windlab建设世界首个公用事业级风光储综合利用并网项目^[3];2019年,针对“三北”高风速地区,世界风电公司排名第二的我国金风科技公司率先推出应对平价上网的智能风电机组^[4]。截至2020年底,全国风电装机为 2.81×10^8 kW,风电发电量为 4.665×10^{11} kW·h,占全部发电量的6.3%。虽然风电具有其独特优势,但风力发电也会对电网产生一些“副作用”,由于风力发电机的输出功率与风速等气候条件变化强相关,因此具有间歇性和随机性^[5],由电网中风电渗透率增大所引发的动态频率问题广受关注^[6]。

本文以风电行业中最常用的双馈风力发电机DFIG(Doubly-Fed Induction Generator)和永磁直驱风力发电机PMSG(Permanent Magnetic Synchronous Generator)这2类变速风力发电机机型为例进行风

电参与系统调频控制策略的研究。风电机组通过电力电子装置与电网相连,发电机转速与电网频率解耦,当电网频率变化时,风电机组无法响应频率变化^[7-8]。若大规模风电场并入电网,则本地常规机组被风机取代后会导致系统的机械转动惯量降低,调频能力缺失,使得整个系统的频率稳定性随之降低^[9]。此外,风电机组在控制灵活性、响应速度等方面都优于常规火电机组,但风电机组通常运行于最大功率点跟踪MPPT(Maximum Power Point Tracking)模式,风电机组无法提供额外的有功功率快速响应和支撑系统频率变化。

为充分利用风力资源为人类服务,同时不破坏系统的稳定运行,有必要对风电参与系统调频的控制策略进行详细的研究。本文首先梳理了风电参与系统调频所存在的关键问题,其次针对问题分别从风电机组转子超速控制、桨距角控制、虚拟惯量综合控制、虚拟同步发电机VSG(Virtual Synchronous Generator)控制以及储能系统与风电机组协调控制这4个方面详细分析各种风电调频技术的原理、适用范围、优势、不足和各技术的发展趋势,并基于上述控制分析各控制策略的组合方式;然后分析在风电场层面风电参与系统调频所关心的问题;最后对风电参与电力系统调频未来可关注的问题进行了展望。

1 风电调频关键问题及相关频率事故简析

1.1 系统惯量降低及一次调频能力减弱

传统发电机组响应系统频率变化的方式主要有以下2种:惯性响应与一次调频。惯性响应是机组对系统频率突然变化所做出的自然反应,利用涡轮和发电机的旋转动能,保持电力需求和机械输出之间的平衡,使得机组速度稳定在新的同步速度。目

收稿日期:2020-12-07;修回日期:2021-05-28

基金项目:国家重点研发计划项目(2017YFB0902000)

Project supported by the National Key Research and Development Program of China(2017YFB0902000)

前的电力市场环境下,电网中风电机组的规模化接入将会代替一部分传统发电机组,风电机组经变流器并网,使得系统惯量水平降低,并且其有功出力无法主动响应频率变化,以至于对频率稳定造成恶性影响^[10]。因此,尽管风力发电机自身具有惯量,存在旋转质量,能够储存动能,但由于风电机组的电力电子接口使电网频率屏蔽因电力电子设备快速响应而产生的任何变化,所以它们无法对频率变化做出自然反应^[11]。2018年12月29日,全国电网运行与控制标准化技术委员会针对国家标准《并网电源一次调频技术规定及试验导则》征求意见,其中包含风电场站一次调频上升时间不大于15 s,调节时间不大于20 s的规定。2020年7月1日施行的国家标准《电力系统安全稳定导则》^[12]中要求风电场应该具有一次调频能力并且一次调频的优先级应高于自动发电控制。

无论是南澳的“9·28”大停电事故^[13]还是英国的“8·9”大停电事故^[14-15],均是由于电网中风电等新能源的占比较高,尤其是南澳的风、光伏发电占比接近于50%,导致系统的惯量短缺,而火电机组缺少足够调频时间,诱发了后续的一系列故障。

1.2 系统有功备用需求增加

由于风电的随机性和波动性,系统对于机组调节能力及备用容量的要求逐渐提高,若要消纳大规模风电和降低电网运行风险,维持系统具有足够的旋转备用是重要途径之一^[16-17]。加拿大魁北克电网要求额定容量为10 MW以上的风电场在频率偏差较大时提供辅助调频服务,如快速提供持续10 s至少5%的备用容量^[18]。

为应对随机负载变化,传统电网利用同步发电机提供电力储备,然而近年来,随着电网中风电渗透率的不断提高以及风电出力的波动,要求风电机组应具备类似于同步发电机组的功率储备能力,快速响应由扰动和故障所引起的功率不平衡和频率变化。当DFIG运行于MPPT模式时,其没有功率备用,无法向上调节功率。若风电机组响应系统频率变化,势必要在有功备用上限与下限之间做好均衡,储备功率使其具有双向调频能力^[19]。

若系统的备用容量不足,系统将不能承受任何的“风吹草动”,可能重演“台湾8·15大停电”的悲剧。2017年8月15日,台湾发生史上最大规模的停电事故,导致电网瞬时损失约 4.2×10^6 kW的供电,被“无预警”停电民众约690万户。此次事故表面上是人为误操作所致,实际却是由于电力供应紧张。这是因为适用于台湾电网系统规模的旋转备用率应大于7%,而当年8月台湾电网的旋转备用率小于3%,远不符合电力系统安全稳定运行的要求^[20]。

针对上述风电参与系统调频所存在的关键问

题,学者们展开了丰富的研究。下面将简要分析与总结在风电机组与风电场层面学者们所研究的控制策略。

2 风电机组调频控制策略

目前,风电机组主要采用的调频方式有2种。一种是针对风电机组本身的控制方式,另一种是风电与储能系统相结合的方式,具体如图1所示。

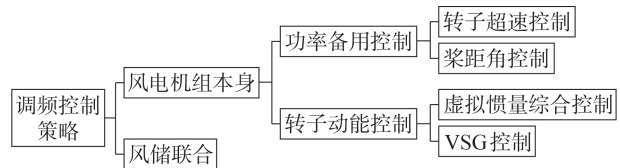


图1 风电调频控制方式

Fig.1 Frequency regulation control mode of wind power

2.1 转子超速控制

通常将转子超速控制与桨距角控制统称为功率备用控制。针对风电机组运行于MPPT模式无备用容量的问题,转子超速控制令转子转速高于额定转速时运行于非MPPT曲线的另一次优点,MPPT曲线右移,从而使机组保留一部分的有功备用,以实现减载,因此也可称为超速减载方式。

风电机组输出的机械功率 P_m 为:

$$P_m = \frac{1}{2} \rho S C_p(\lambda, \beta) v^3 \quad (1)$$

式中: ρ 为空气密度; S 为叶片扫过的面积; $C_p(\lambda, \beta)$ 为风机的风能利用系数,它是关于叶尖速比 λ 与桨距角 β 的函数,其中 λ 为风力机叶片的尖端速度与风速的比值,其表达式如式(2)所示^[21]; v 为风速。

$$\lambda = \frac{\omega_r r}{v} \quad (2)$$

式中: ω_r 为风电机组转子转速; r 为风力机半径。则由式(1)和式(2)可知,在一定的风速下,气象条件变化不大时,风机输出的机械功率仅由 C_p 决定,某风电机组的 $C_p(\lambda, \beta)$ 曲线如图2所示。

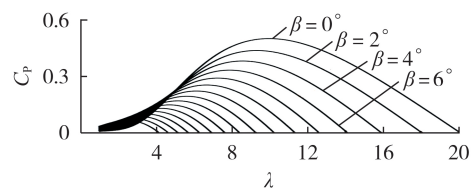


图2 $C_p(\lambda, \beta)$ 特性曲线

Fig.2 Characteristic curves of $C_p(\lambda, \beta)$

由图2和式(2)可以看出:如果 β 保持不变,就存在一个最大的 λ 值使得风机获得最佳风能利用系数 C_{popt} 进而得到最优功率;若 v 发生变化,只需调节 ω_r 使 λ 保持不变,就能获得在不同风速下的风机

MPPT 曲线^[22]。如果采用 MPPT 运行,当系统发生正频差事件时风机可以做出响应,但发生负频差事件时,由于难以提供额外的功率则无法参与调频,所以必将进行减载备用^[23]。当采用转子超速运行进行减载即采用次优功率跟踪方式时,定义 P_{del} 为有功功率的减载比例,其表达式为^[24]:

$$P_{\text{del}} = \frac{P_{\text{opt}} - P_{\text{de}}}{P_{\text{de}}} \times 100 \% \quad (3)$$

式中: P_{de} 、 P_{opt} 分别为对应转子转速下的次优功率和最优功率。

由于转子转速存在极限,因此文献[23,25]采用转子转速控制时只考虑了中低风速下的情况。文献[23]采用转子转速控制策略,研究了 DFIG 在长周期持续频率扰动情况下的调频能力和效果,同时也验证了若要预留功率获得可向上调频功率则会压缩可向下调频功率。文献[25]提出的变减载率超速控制方法既减少了超速控制成本,又改善了微电网频率动态偏差。

在云南的老青山、云台山等不同地区,处于多个复杂山地地形的风电场、几百台不同机型机组长期现场运行实践表明超速控制对机组安全运行和提高发电量意义重大^[26],因此,采用合理的转速控制和超速参数设置至关重要。转子超速控制虽然不适用于高风速,但是在大多数时间内都可以应用,并且它不需要转动机械构件,所以响应频率变化速度快。为避免风机遭到损坏,当风速超过阈值时,需与其他控制方式协同以保证机组正常运行。

2.2 桨距角控制

由 2.1 节可知, $C_p(\lambda, \beta)$ 为关于叶尖速比 λ 与桨距角 β 的函数,当 β 不变时,通过改变转子转速进而可改变叶尖速比进行超速减载控制。同样地,当 λ 保持不变时,可以通过改变 β 的大小使风机吸收的机械功率增大或减小。由图 2 可以看出,对于同一 λ , β 值越大则吸收的能量越小,风机运行将偏离 MPPT 曲线,实现减载备用。

将风电机组运行区域^[27-28]分为五部分,关注的风速通常有以下 3 个:切入风速 v_{in} 、额定风速 v_e 和切出风速 v_{out} 。①启动区。 $v \in [0, v_{\text{in}})$, 风机与系统断开。② C_p 恒定区。 $v \in [v_{\text{in}}, v_e)$, 机组随风速变化采用低于额定转速的变速运行,此时的桨距角保持在 0° 。③转速恒定区。风速未达到额定风速,发电机已达到额定转速,通过转速控制使机组始终保持在额定转速附近,无需调节桨距角。④功率恒定区。 $v \in [v_e, v_{\text{out}})$, 随着风速的增加,需引入桨距角控制使输出功率不超过额定功率。⑤保护区。 $v \in [v_{\text{out}}, +\infty)$, 桨距角调整为 90° , 风电系统不工作。正常情况下,桨距角控制的转速目标为额定转速^[29],并且桨距角控制调节

范围很广,可实现全风速段的控制。

桨距角控制在频率调节过程中的基本结构如图 3 所示^[30],桨距角 β 与电网频率 f 呈正相关。对于桨距角控制器,传统控制器采用比例-积分-微分(PID)控制技术,数年来研究颇多的改进方法是将模糊控制算法与 PID 控制相结合^[31-32],目前,文献[33-35]还提出了将自适应模糊控制算法与 PID 控制相结合,使得控制系统适应性更强,可靠性、精度更高,更灵活。未来,将有望继续开发新的算法技术改进控制方法,进而提高系统性能。

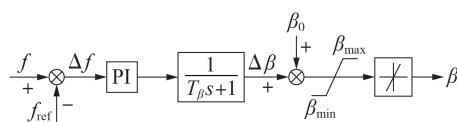


图 3 桨距角控制基本框图

Fig.3 Basic block diagram of pitch angle control

采用桨距角控制捕捉风能效率高,尤其在风速较高时风能利用率较高且输出功率平稳。由于执行机构为机械部件,所以响应速度较慢。当风速由低风速迅速变化到高风速时,变桨控制系统性能会下降,综合负功率误差形成的负桨距角需要正功率误差经过很长时间才能抵消^[36]。因为机械部件对频率突变无法及时做出响应,所以大多将桨距角控制用于额定风速以上的情况^[37]。文献[38]采用桨距角或转速控制改造了陕北某风电场一次调频功能,测试结果发现机组频繁参与一次调频会增大机组振动,加剧机组变桨系统磨损。因此若单独使用桨距角控制实现全风速段的频率调节,会致使桨距频繁变化,加剧机组机械磨损,增加维护成本且缩短使用寿命。综上,桨距角控制最好与其他控制方式相结合。

功率备用控制的 2 种控制方式均运行于非 MPPT 模式,必定使风电场经济性稍差。为保证机组能响应电网发生的正负频差事件,目前只针对风电机组本身实施控制时,采用减载运行是无可厚非的。减载为系统留有部分备用可以有效避免切机的情况,且能实时响应系统频率变化,保障电网频率稳定性^[39]。值得注意的是,风电机组备用功率越大,在频率响应的过程中输出功率可能就越大,但风电机组的转速易达到极限^[40],因此在实际应用中,需根据实际需求权衡备用容量。

2.3 虚拟惯量综合控制

随着系统中风电渗透率的持续增加,有必要深入研究如何改善风电机组“零惯量”特性。虚拟惯量控制通过模拟同步发电机的惯量特性,将电网频率变化率引入控制环节,若电网频率跌落,则增大 DFIG 有功参考值,将转子动能释放出来调节频率^[41]。通常 DFIG 转子转速在 0.8~1.2 p.u. 范围内,所以采用

虚拟惯量控制的转子动能可得到充分利用^[42]。

通常将惯量控制和下垂控制统称为虚拟惯量综合控制,因目前大多应用二者的结合,因此本文只综述虚拟惯量综合控制相关内容。传统虚拟惯量综合控制在MPPT基础上附加有功增量 ΔP ,系统频率突变时,风力机输入的机械功率不突变,而发电机输出的电磁功率因 ΔP 改变,因此转子转速发生变化的同时释放或吸收动能,频率变化被抑制^[43]。 ΔP 的计算公式如下:

$$\Delta P = - \left(K_P \Delta f + K_D \frac{df}{dt} \right) \quad (4)$$

式中: K_P 为比例系数; Δf 为系统频率变化量; K_D 为微分系数。可通过改变 K_P 与 K_D 的值来改变 ΔP 的大小,进而影响机组惯性支撑能力和调频后转速恢复时间。目前,较多采用的是基于功率跟踪优化的虚拟惯量综合控制,它根据 Δf 切换功率跟踪曲线来快速调节机组有功,调节后的有功及系数分别如式(5)和式(6)所示^[44-45]。

$$P_{VIC}^* = \begin{cases} k_{VIC} \omega_r^3 & \omega_0 \leq \omega_r < \omega_1 \\ \frac{P_{max} - k_{VIC} \omega_1^3}{\omega_{max} - \omega_1} (\omega_r - \omega_{max}) + P_{max} & \omega_1 \leq \omega_r < \omega_{max} \\ P_{max} & \omega_r \geq \omega_{max} \end{cases} \quad (5)$$

$$k_{VIC} = \frac{\omega_{r0}^3}{(\omega_{r0} + 2\pi a \Delta f)^3} k_{opt} \quad (6)$$

式中: k_{VIC} 为功率跟踪优化曲线的比例系数,其取值大小与频率变化前风力机角速度 ω_{r0} 、 Δf 和转速调节系数 a 有关; k_{opt} 为MPPT曲线的比例系数; P_{VIC}^* 为功率跟踪优化下的有功参考; P_{max} 为输出有功功率限幅值; ω_0 为切入电角速度; ω_1 为进入转速恒定区的初始电角速度; ω_{max} 为电角速度限幅值。风电机组虚拟惯量综合控制框图如图4所示,高通滤波器只允许频率的暂态分量通过,低通滤波器用于避免频率测量时噪声的干扰^[40]。

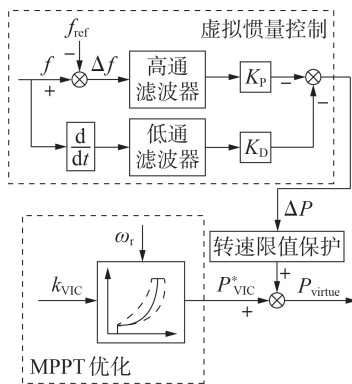


图4 风电机组虚拟惯量综合控制框图

Fig.4 Block diagram of combined virtual inertia control for wind turbine

目前,专家学者们在虚拟惯量综合控制方面已展开了丰富的研究。文献[46]提出采用一种虚拟电容控制策略来提供更多的虚拟惯性,PMSG利用转子动能提供快速的功率支撑,类似于同步机惯性响应。文献[47]利用有限转子动能,提出基于选择函数的虚拟惯量综合控制方法,从而增加系统等效转动惯量和改善系统频率动态响应特性。同桨距角控制相似,学者们将模糊控制引入虚拟惯量控制^[48-49],文献[48]同时将DFIG旋转质量块和连接在变换器之间的超级电容器作为虚拟惯量源,采用自适应模糊控制策略迅速提供有功支持且频率误差减小后快速恢复到MPPT状态。文献[49]整定了惯性控制参数并验证了在不同的风电渗透率下所提出的模糊自适应虚拟惯量控制鲁棒性较好。

文献[50]依托丽江电网实际数据模型验证了虚拟惯量综合控制的可行性,虚拟惯量综合控制能够在系统频率变化时迅速做出响应,提供有功支撑后转速恢复到正常运行状态。但转子转速不能保持长时间升速或降速,转子在惯性响应之后的转速恢复过程中会释放或吸收部分能量,致使系统频率二次升高或降低,因此需要严格限制机组的惯性响应持续时间,一般设置为10s^[51]。针对此问题,学者从调频动态交互全过程出发,研究采用一定的控制措施来抑制频率二次跌落^[52]。虽然转子转速可在一定范围内变化,但毕竟提供的有功功率有限,因此还需与其他控制方式相结合。此外,在虚拟惯量综合控制方法中有多个控制参数,尚需研究如何根据实际需求科学整定控制参数。

2.4 VSG控制

自2007年首次提出虚拟同步机概念以来^[53],学者们对其展开了丰富的研究,它类似于同步机,可作为VSG或虚拟同步电动机VSM(Virtual Synchronous Motor)运行,VSG主要面向电源侧应用,VSM面向负荷侧。2016年,国家电网公司在张北开展风光储虚拟同步机示范工程建设^[54];2020年7月21日发布的国家标准《虚拟同步机 第1部分:总则》^[55]提出:虚拟同步机调频死区绝对值宜在0.033~0.1 Hz范围内,风电虚拟同步机调频启动时间应不大于500 ms,响应时间不大于5 s,调节时间不大于10 s。

虚拟同步机技术常指通过模拟同步机电暂态特性,令变流器控制环节采用同步机电暂态方程,使得采用该技术并网运行装置具备同步机组并网的惯量、阻尼、有功调频等运行外特性的技术。虚拟同步机具有一条交流母线和一条直流母线,且具有同步机内部机理和外部特性的交直变流器,可通过在其直流母线配置储能系统来提供必要惯量^[56]。

大多数VSG控制策略的目标为给系统提供与同步机相似的频率响应特性,DFIG系统中常见的VSG控制策略有预留容量的改进MPPT控制、基于同步

机动能方程的虚拟惯量控制、基于直流电压的惯量支撑控制等^[57]。VSG 系统拓扑结构如图 5 所示^[58]。

根据图 5,计及同步机机械与电磁方程,若将

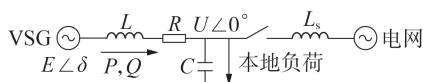


图 5 VSG 系统拓扑结构图

Fig.5 Topological structure of VSG system

VSG 模拟成传统同步机,则 VSG 的机械方程为:

$$J \frac{d\omega}{dt} = T_m - T_e - T_d = T_m - T_e - D(\omega - \omega') \quad (7)$$

式中: J 为同步机转动惯量; ω 为同步机机械角速度; T_m 、 T_e 和 T_d 分别为同步机机械、电磁和阻尼转矩; D 为阻尼系数; ω' 为电网同步角速度。 J 使得机组在频率动态变化过程中具有了惯性, J 越大,动态响应时间越长; D 使得其具有阻尼电网功率振荡的能力, D 越大,动态响应振荡幅值的衰减速度越快。

考虑 VSG 典型并网逆变器拓扑,则其电磁方程为:

$$L \frac{di_{abc}}{dt} = e_{abc} - u_{abc} - Ri_{abc} \quad (8)$$

式中: L 为同步机同步电感; e_{abc} 为 VSG 电势; u_{abc} 为同步机机端电压; R 为同步机同步电阻; i_{abc} 为 VSG 输出电流。

以 DFIG 为例,其 VSG 改造控制框图如图 6 所示^[59],通过在主控系统或变流器控制中加入 VSG 实现快速释放转子动能的作用。与虚拟惯量控制易发生的频率二次跌落问题不同的是,VSG 控制不过度提取风力机转子能量,能避免因转速过度降低而导致频率的二次跌落,并且当系统中风电渗透率提高时,VSG 控制提供的有功支撑效果更加显著,弥补了机组单独使用虚拟惯量控制的不足。文献[60]根据 H_2 和 H_∞ 范数定量地分析了同步机和虚拟同步机频率响应的特性,发现通过合理配置虚拟同步机的虚拟惯量与电气阻尼可以使其频率响应特性优于同步

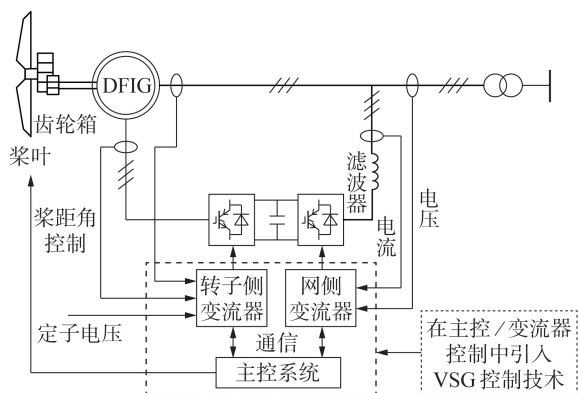


图 6 DFIG 的 VSG 改造控制框图

Fig.6 Improved control block diagram of VSG for DFIG

机。文献[61]总结了同步机转子惯量与阻尼系数对频率稳定性的影响,并结合力学原理证明了 VSG 的虚拟惯量可以实时变化。文献[62]提出了协调 VSG 转动惯量和阻尼系数的自适应控制策略:若 VSG 转子角速度变化率较大,则增大转动惯量;若角速度偏离量较大,则增大阻尼系数,从而抑制频率过快变化和发生过大偏移。

虚拟同步机技术能够为风能并网友好接入提供电网接口,VSG 控制通过模拟同步机转子惯性和阻尼特性,改善了逆变器运行特性,能够抑制频率的快速变化,在一定程度上抵御负载扰动。与传统电源相比,VSG 更加灵活,因其具有有功/无功解耦控制及四象限控制能力,转子运动方程参数都是虚拟量,因此不受物理特性约束,可实现动态调节。

然而虚拟同步机技术仍存在问题值得关注,关于 VSG 控制系统化和标准化问题,目前没有一个系统的 VSG 控制适用于所有的电网运行条件,传统电力电子装置控制参数选择的标准化指南不适用于 VSG,需从控制参数标准化、接口标准化、管理标准化等方面进行进一步的研究^[63]。由于 VSG 应用的是电力电子器件控制,电力电子装置的过压和过流耐受能力弱,因此当电网发生故障时,需保证装置的安全运行。由于 VSG 与同步机具有相似的机电暂态特性,因此还存在着参数配置较为复杂、如何合理配置储能单元以及多逆变器耦合产生振荡等问题。

2.5 储能系统参与风电调频

《电力储能技术发展现状及趋势研判》^[64]报告显示:2010 年 12 月美国能源部发布的《电力系统对大规模储能技术应用需求》报告中,按照当今系统的技术需求特征将储能应用模式分为系统调频调峰、电能质量改善、辅助动态调节、可靠性服务等 17 项。储能的技术分类如图 7 所示,按照电能存储方式可将储能分为物理、电磁场和电化学储能 3 类。

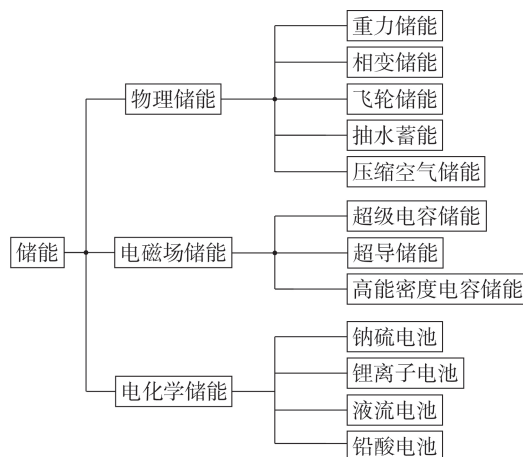


图 7 储能技术分类

Fig.7 Classification of energy storage technology

储能的工作原理包含电能存储和电能变换两部分。电能存储环节利用充放电控制器及能量存储本体实现不同类型能量的存储和释放;电能变换环节利用电力电子装置进行电能和接入系统之间的能量交换。当系统缺乏电能时,储能元件经电能变换环节输出电能至系统,同时减少电能存储环节能量;当系统电能多余时,通过电能变换环节存储电能,增加电能存储环节能量^[65]。储能系统与风电机组联合进行调频,二者分别经过电力电子元件、变压器与电网相连^[66]。

在储能与风电机组联合调频方面,文献[67]考虑运行成本最小化、净负荷变化和最大发电机停运等因素,验证了储能能充分响应一次频率,并且得出风能加入系统时运行成本会降低的结论。文献[68]提出了一种协调发电机与快速储能系统的荷电状态反馈下垂技术,有效地弥补了由于高风穿透引起的高频波动问题,且保证了连续的频率支持。通过模糊算法改进储能系统协调风电机组进行调频的研究颇多。文献[69]设计了模糊逻辑控制器,首先确定储能系统的额定功率和容量,令额定功率尽可能接近其理论最小值,弥补了风电场短时调频能力不足的问题。文献[70]提出基于模糊逻辑的储能与风电场联合调频,消除了风能卸载的不灵活性,使所需的存储容量最小且最佳利用了风电场和存储单元的能量。

储能系统能够快速响应功率、频率变化,而且能够双向调节功率,控制灵活,性能稳定,控制精度高。在技术可行性方面,储能比传统调频电源更高效^[71]。储能可以解决风机调频的盲区和备用容量缺失等问题,降低成本和风电机组折旧,同时可以提高能源互联网多能源间的配合度和综合利用效率,弱化制约关系。

文献[72]通过对比得出配置储能投资额可接受且仅需一次性投入的结论,并且所提出的风储协调控制策略减少了26%的储能容量配置,提高了经济性。但储能系统需要系统额外增加设备,若配置不当,反而损害经济性,并且还要考虑安全性与环境污

染问题。

目前储能系统应用广泛,如何兼顾传统调频技术与储能,研究设计得到合理、自适应性强的协调控制策略成为未来风电参与系统频率控制的研究方向。另外,无论从技术还是算法上改进更新储能参与系统调频的参与度,研究更加适应现代电力系统的新型储能设备,如何在保障稳定的前提下使得利益最大化,也是需要解决的问题。

2.6 多控制策略组合控制

由2.1—2.5节对转子超速控制、桨距角控制、虚拟惯量综合控制和VSG控制这4种控制策略以及风储联合控制的综述,得到各控制策略优缺点及发展趋势如表1所示。由表可以看出,每种控制方式各有利弊,可以优势互补。因此,将多种控制策略相结合进行调频是很有必要的。

在基于改进转子超速控制、桨距角控制和虚拟惯量综合控制的组合控制方式方面,文献[73]提出了一种桨距角与转子转速协同频率调节控制机制,使转子转速最大化的同时减小桨距变化。文献[74]在中低风速时超速减载,高风速时使用桨距角控制,与虚拟惯量综合控制相配合,实现了不同风速的限功率运行,通过设置不同风速下的减载系数有效减少了弃风。

在储能系统与上述3种控制策略组合参与风电调频方面,文献[75]提出风储联合的调频策略,基于限转矩控制进行风机惯性响应,由储能为风机提供后续支撑改善频率二次跌落问题。还有基于变功率点跟踪与超级电容器储能的协调控制,通过改进MPPT模式,当发生负荷减小的扰动时,转速调节深度优于传统超速减载控制,频率调节能力提高;在发生负荷增加的扰动时,储能装置参与系统调频,为风电场提供备用容量,实现在全工况下均具有一次频率调节能力且DFIG不损失发电效益^[76]。

综上所述,中低风速下一般采用转子超速减载控制,理论上桨距角控制适用于全风速,但一般只将其用于高风速区。对于虚拟惯量关注的易造成频率二次跌落问题,储能系统可以提供支撑;对于储能关

表1 各控制策略优缺点及发展趋势

Table 1 Advantages and disadvantages, development tendency of control strategies

控制策略	优点	缺点	发展趋势
转子超速控制	响应速度快,功率备用首选	不适用高风速,降低经济性	设置合理参数,结合其他控制
桨距角控制	捕捉风能效率高,输出功率平稳,适用于全工况	响应速度较慢,机械部件磨损,备用降低经济性	结合其他控制,结合新型算法
虚拟惯量综合控制	迅速响应,提供惯量支撑	响应持续时间短,提供有功有限,频率易二次跌落	整定控制参数,结合其他控制
VSG控制	迅速响应,抑制频率变化,抵御负荷扰动,比传统电源灵活	耐受故障能力弱,参数配置复杂,需配置储能单元,逆变器耦合振荡	系统化、标准化,电力电子器件,合理配置参数,解决振荡问题
风储联合控制	灵活高效稳定,弥补风机不足,提高多能源配合	需增加额外设备,合理配置较困难	新型储能设备,新型算法改进,兼顾几种策略

注的经济问题,将储能与风机自身的控制相结合,将会均衡备用容量与储能配置问题,提高经济性。因此,在实际应用中,如何将上述控制策略有效结合,解决各控制之间的矛盾以及发挥各自优势将是未来值得研究的课题。

3 风电场调频控制策略

2020年9月7日,国家能源局华中监管局发布的《华中区域发电厂并网运行管理实施细则》^[77]指出:30 MW及以上风电场必须具有调频功能。上述所提控制策略主要集中在机组的层面上,目前在仿真时所使用的多台机组也大多由1台机组等值,然而即使在同一风电场,某时刻不同机组瞬时风速也相差较大^[78],因此根据实际情况考虑风电场内部数台风电机组之间的控制策略是很有必要的^[79]。风电场参与系统频率调节时,需要考虑风电场中风速、复杂的运行条件、频率控制要求的多样化,以及各机组频率控制能力和控制策略的不同等因素^[80]。目前主要聚焦的是基于机组分群的风电场内部机组间功率协调分配及转速恢复协调控制^[81-82]。在系统层面关注的是风电场与风电场或火电机组间的配合。

3.1 风电场内部机组间功率协调分配问题

目前在陆地上使用的风电机组单机容量通常为1.5~6 MW,由上百台风电机组构成的风电场渗透性很强,在同一时刻每台机组所能提供的调频能力是不同的。因此,若想获得整个风电场较好的功率外特性,就需要考虑风电场内机组之间的功率协调分配问题。功率分配的目的在于根据系统需求和风电场期望输出功率来指定场内各机组的参考功率。

文献[83]提出了一种风电场分布式协调控制框架,充分利用了所有机组的动能,减少了风能的损失,采用超线性收敛的分布式牛顿法进行快速功率分配,并引入能量状态指标,实现了各台机组之间功率的合理分配。文献[84]基于系统频率调节的需求提出一种功率偏差控制优化策略,这不仅提供了所需的功率偏差,还只涉及风电场的一部分而非所有机组,涉及的机组受到功率限制,其余的机组保持MPPT模式运行,该策略既提高了电源控制的质量又降低了系统复杂性。上述文献在满足系统的调节需求的基础上,合理分配风电场内机组,避免了机组功率的浪费。文献[85]在考虑功率的基础上,还考虑了风速这一因素,提出在多风速条件下风电机组群的频率多时间尺度协调优化策略,使得风电场不仅具备良好的调频能力,还有效抑制了频率二次跌落。

3.2 风电场内部机组间转速恢复协调问题

风电机组参与调频结束后,若同时进入转速恢复模式,这将很可能致使系统频率二次跌落。因此,不仅要在系统具有调频需求时风电场内各机组有

序提供支撑,调频结束后,机组有序退出运行也至关重要。

为此,文献[86]提出风电场转速延时恢复及基于风速的机组优化分组策略,根据机组所处风速段将机组分组,通过设置延时使得处于不同状态的风电机组转速恢复时刻也不同,风电机组能够依次退出运行。考虑到风电场的仿真建模难度,对风机给定转速恢复延时,不适用于机组数量较多的风电场,因此风电场内机组根据风速等因素的变化进行合理分群、实时分群也关乎调频的效果。文献[51]认为风速测量误差较大,因此提出基于转速分组的风电场调频策略,然后动态调节各机组的惯量响应的持续时间,使得各机组有序退出运行。文献[87]基于PMSG调频能力,引入调频能力系数和协同系数,按能分配风电机组调频功率,并采用补偿函数使得风电机组转速平滑恢复,避免了转速恢复引起的系统频率二次跌落及复杂的转速恢复时序安排问题。

3.3 风电场与风电场或火电机组配合问题

从一个风电场的层面而言,风电场内各机组调频功率、转速恢复时间都需协调分配。从整个电力系统的层面而言,系统中各风电场之间、风电场与火电机组之间更需合理规划。文献[88]以各风电场距故障点最短电气距离和实时旋转备用容量作为影响因子协调各风电场参与调频,当监测到存在有功缺额时,判断风电场是否参与调频,若参与则根据影响因子选取风电场,并计算紧急升/降功率容量,以实现各个风电场之间的配合。

虽然目前电网中风力发电占比不断提高,但更多的是起到辅助调频的作用,这是因为当今火电机组依然是调频主力^[79]。由于风的间歇性,风电能否稳定调频是对电网的重要挑战,然而火电的响应速度较慢,因此协调这2个发电源受到关注^[89]。文献[90]提出大型风火机组变频控制方案并且建立数学模型,调度中心根据系统频率的变化情况及风火电场运行状态,将系统需求进行实时分配,以实现风电机组在全风速工况情况下参与电力系统频率调节。目前在研究风电场参与系统调频时多将调频系统分层处理^[51,80,91],统筹规划,分别优化。文献[92]将系统分为3层,考虑风电与火电各自的调频特性,主要采用火电机组调频,辅以风电机组。其根据火电厂出力确定风电场功率,并且考虑了风电场的分组优化、功率分配与转速恢复问题,充分发挥了风电场的调频作用,以满足系统需求。

4 风电参与电力系统调频展望

电网中风电渗透率的不断提高,对电网而言既是机遇也是挑战,研究系统的频率特性应充分考虑现代电力系统的特点。风电的接入使得电网对化石

能源的依赖降低,随之而来的是如何将风电融入已经建成的大电网中。想要替代传统火电机组,风电机组不仅要能发电,还要具备相似的惯量和能够响应频率变化的能力。对于风电机组参与电力系统调频问题的研究,国内外学者们已研究得很透彻,但仍存在一些问题值得关注。

4.1 基于风储联合调频的问题

技术性问题:协同多种储能技术,基于系统调频需求联合风电机组与储能系统。虽然本文并未对所有储能技术的应用场景、适用范围等进行详细的描述,但储能技术各有特点,利用多种储能技术协同可以进行优势互补,避免单一储能方式的局限性。另外,在进行风储联合调频时需要综合考虑系统需求、风电机组控制能力与储能系统状态。这不仅要确保系统发生故障时联合系统所能提供的支撑足够大,还要保证在系统故障消除后联合系统退出运行时对系统的冲击尽量小,因此储能系统的投入时机、出力深度等与风电机组的控制息息相关。

经济性问题:保证系统可靠持续供给良好电能的同时提高系统经济性。想要制定经济性最优的风储联合调频策略,需要综合考虑风电机组的备用容量和储能容量配置的大小,还要考虑储能系统的安装、维护,是否有更加新型、更加经济的储能设备等用来缩小成本。另外还应与电力市场的相关理论进行结合,完善运营模式,提高收益。

4.2 基于风电场控制的问题

由上述对风电场层面参与系统的调频研究可知,单纯将风电场等值为1台机组是不符合实际的。目前我国弃风情况仍然严重,如何提高风电的利用率也是关乎电网经济性的重要问题。风电场内各机组所处环境相差较大,因此,风电场内风电机组之间的协调配合尤为重要,需要考虑更加贴合风电场实际情况的协调优化策略,包括建立哪种风电场模型,风电机组如何分组,根据什么判定条件进行机组出力之间的转换,如何让机组有序退出对电网的冲击最小等。在风电场层面对各台机组统筹规划,合理分配,减少弃风以提高经济性,需要进行更加深入的研究。

目前新能源发电还未能独当一面,基于风电场层面与传统火电机组之间的协调问题,大多是需要站在调度部门的角度,在系统有调频需求时,将需求分配给各机组,因此,调度中心对系统故障响应的快速性、实时性对于电网而言意义重大。调度中心应充分认知各风电场、火电机组的调频能力和现行状态等,以便在故障发生瞬间做出响应。在协调风电场、火电机组和调度中心配合的全过程中,通信系统也起着至关重要的作用,因此还需充分考虑通信系统的发展。

5 结论

随着电力网的逐渐扩大以及风电的规模化发展,风电等可再生能源的接入给系统带来了多种问题。为保证系统安全稳定运行,风电机组参与系统频率调节的控制策略、与储能或火电机组之间协调配合问题值得关注。本文在充分认识风电参与系统调频必要性与局限性的基础上,分析风电机组自身的转子超速控制、桨距角控制、虚拟惯量综合控制和VSG控制,以及储能与风电机组协调控制各自原理及优缺点,分别给出了未来可关注的研究方向。还针对几种控制策略的组合控制,风电场与风电场或火电机组间的协调配合,提出风电机组参与系统调频是未来值得研究的课题。另外,本文所提出的问题也为以后的研究提供了参考。

参考文献:

- [1] 国家能源局. 国家能源局2021年一季度网上新闻发布会文字实录[EB/OL]. (2021-01-30)[2021-05-28]. http://www.nea.gov.cn/2021-01/30/c_139708580.htm.
- [2] 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.
- [3] 维斯塔斯参与世界首个公用事业级风光储综合利用并网项目[J]. 电气时代,2017(10):124.
- [4] 夏云峰. 金风科技:以场景化定义新风电时代[J]. 风能,2020(10):24-31.
- [5] AHMAD K, MOHAMMAD N, QUAMRUZZAMAN M. Review on frequency adjustment for power systems with grid connected wind farm[C]//2019 International Conference on Robotics, Electrical and Signal Processing Techniques (ICREST). Dhaka, Bangladesh: IEEE, 2019: 617-621.
- [6] 李世春,邓长虹,龙志君,等. 适应于电网高风电渗透率下的双馈风电机组惯性控制方法[J]. 电力系统自动化,2016,40(1):33-38.
LI Shichun, DENG Changhong, LONG Zhijun, et al. An inertial control method of doubly fed induction generators suitable for power grid with high wind power penetration[J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(1): 33-38.
- [7] 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 on the optimal power tracking[J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(7): 32-39.
- [8] GEVORGIAN V, ZHANG Y, ELA E. Investigating the impacts of wind generation participation in interconnection frequency response[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2015, 6(3): 1004-1012.
- [9] 叶林,陈超宇,张慈杭,等. 基于分布式模型预测控制的风电场参与AGC控制方法[J]. 电网技术,2019,43(9):3261-3270.
YE Lin, CHEN Chaoyu, ZHANG Cihang, et al. Wind farm participating in AGC based on distributed model predictive control[J]. Power System Technology, 2019, 43(9): 3261-3270.
- [10] 文云峰,杨伟峰,林晓煌. 低惯量电力系统频率稳定分析与控制研究综述及展望[J]. 电力自动化设备,2020,40(9):211-222.

- WEN Yunfeng, YANG Weifeng, LIN Xiaohuang. Review and prospect of frequency stability analysis and control of low-inertia power systems[J]. *Electric Power Automation Equipment*, 2020, 40(9): 211-222.
- [11] ATTYA A B, DOMINGUEZ-GARCIA J L, ANAYA-LARA O. A review on frequency support provision by wind power plants: current and future challenges[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2018, 81: 2071-2087.
- [12] 全国电网运行与控制标准化技术委员会. 电力系统安全稳定导则: GB 38755—2019[S]. 北京: 中国标准出版社, 2019.
- [13] 曾辉, 孙峰, 李铁, 等. 澳大利亚“9·28”大停电事故分析及对中国启示[J]. *电力系统自动化*, 2017, 41(13): 1-6.
- ZENG Hui, SUN Feng, LI Tie, et al. Analysis of “9·28” blackout in Australia and its enlightenment to China[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2017, 41(13): 1-6.
- [14] 孙华东, 许涛, 郭强, 等. 英国“8·9”大停电事故分析及对中国电网的启示[J]. *中国电机工程学报*, 2019, 39(21): 6183-6192.
- SUN Huadong, XU Tao, GUO Qiang, et al. Analysis on blackout in great Britain power grid on August 9th, 2019 and its enlightenment to power grid in China[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2019, 39(21): 6183-6192.
- [15] 方勇杰. 英国“8·9”停电事故对频率稳定控制技术的启示[J]. *电力系统自动化*, 2019, 43(24): 1-7.
- FANG Yongjie. Reflections on frequency stability control technology based on the blackout event of 9 August 2019 in UK[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2019, 43(24): 1-7.
- [16] 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 Jinquan, 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.
- [17] 李茜, 刘天琪, 何川, 等. 含风电系统的有功和备用协调优化方法[J]. *电力自动化设备*, 2016, 36(7): 7-14.
- LI Xi, LIU Tianqi, HE Chuan, et al. Coordinated optimization of active power and reserve capacity for power grid with wind power[J]. *Electric Power Automation Equipment*, 2016, 36(7): 7-14.
- [18] HYDRO-QUEBEC T. Transmission provider technical requirements for the connection of power plants to the Hydro-Québec transmission system[R]. Quebec, Canada: Hydro-Québec Trans-Énergie, 2009.
- [19] LI S, WANG M. A novel model of the Lower Active Power Limit (LAPL) of DFIG under overspeed mode[J]. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 2020, 125: 106439.
- [20] 陈铮, 苏宏田, 王宁. 透视台湾大停电[N]. *中国能源报*, 2017-08-28(8).
- [21] YOKOYAMA H, TATSUTA F, NISHIKATA S. Tip speed ratio control of wind turbine generating system connected in series[C]//2011 International Conference on Electrical Machines and Systems. Beijing, China: IEEE, 2011: 1-4.
- [22] 赵晶晶, 吕雪, 符杨, 等. 基于可变系数的双馈风机虚拟惯量与超速控制协调的风光柴微电网频率调节技术[J]. *电工技术学报*, 2015, 30(5): 59-68.
- ZHAO Jingjing, LÜ Xue, FU Yang, et al. Frequency regulation of the wind/photovoltaic/diesel microgrid based on DFIG cooperative strategy with variable coefficients between virtual inertia and over-speed control[J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2015, 30(5): 59-68.
- [23] 穆钢, 蔡婷婷, 严干贵, 等. 双馈风电机组参与持续调频的双向功率约束及其影响[J]. *电工技术学报*, 2019, 34(8): 1750-1759.
- MU Gang, CAI Tingting, YAN Gangui, et al. Bidirectional power constraints and influence of doubly fed induction generator participating in continuous frequency regulation[J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2019, 34(8): 1750-1759.
- [24] 李世春, 黄悦华, 王凌云, 等. 基于转速控制的双馈风电机组一次调频辅助控制系统建模[J]. *中国电机工程学报*, 2017, 37(24): 7077-7086.
- LI Shichun, HUANG Yuehua, WANG Lingyun, et al. Modeling primary frequency regulation auxiliary control system of doubly fed induction generator based on rotor speed control[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2017, 37(24): 7077-7086.
- [25] 姜莹, 边晓燕, 李东东, 等. 基于可变减载率超速控制的双馈异步风机参与微电网调频研究[J]. *电机与控制应用*, 2017, 44(9): 118-124.
- JIANG Ying, BIAN Xiaoyan, LI Dongdong, et al. Research on doubly fed induction generator participation in microgrid frequency modulation based on variable load shedding ratio over-speed control[J]. *Electric Machines & Control Application*, 2017, 44(9): 118-124.
- [26] 邵勤丰, 王明军. 风电机组超速问题案例分析[J]. *风能*, 2019(8): 64-68.
- [27] 李传斌, 梁俊宇, 赵明, 等. 变桨距风力机在全风速段内的桨距角控制策略仿真研究[J]. *电机与控制应用*, 2015, 42(3): 56-60.
- LI Chuanbin, LIANG Junyu, ZHAO Ming, et al. Simulation research on pitch control strategies of variable pitch wind turbine within the whole section of wind speed[J]. *Electric Machines & Control Application*, 2015, 42(3): 56-60.
- [28] 戴伍祥. 变速变桨距风力发电机组优化控制研究[D]. 天津: 天津理工大学, 2012.
- DAI Wuxiang. The research of optimization control of variable speed variable pitch wind generating set[D]. Tianjin: Tianjin University of Technology, 2012.
- [29] 万天虎, 李华, 徐浩, 等. 基于惯性和变桨协调的风电机组一次调频控制[J]. *电气传动*, 2018, 48(11): 53-57.
- WAN Tianhu, LI Hua, XU Hao, et al. Wind turbine primary frequency regulation based on inertia and pitch coordination[J]. *Electrical Drive*, 2018, 48(11): 53-57.
- [30] 陈斌. 双馈风电机组参与电力系统频率调节的综合控制方法研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2018.
- CHEN Bin. Research on the integrated control method of doubly-fed induction generator participating in power system frequency regulation[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2018.
- [31] RASHID A, YING D. Fuzzy inference based approach for pitch angle control of variable speed variable pitch wind turbine[C]//2020 Asia Energy and Electrical Engineering Symposium(AEES). Chengdu, China: IEEE, 2020: 1051-1056.
- [32] ISAAC I A, CABRERA D, PIZARRA H, et al. Fuzzy logic based parameter estimator for variable speed wind generators PI pitch control[C]//2010 IEEE ANDESCON. Bogota, Colombia: IEEE, 2010: 1-6.
- [33] ALI M M M, YOUSSEF A, ABDEL-GABER G, et al. Adaptive fuzzy-PID based pitch angle control of wind turbine[C]//2018 Twentieth International Middle East Power Systems Conference(MEPCON). Cairo, Egypt: IEEE, 2018: 1110-1114.
- [34] REFAN M H, KAMARZARRIN M, AMESHCHI A. Control of wind turbine's pitch angle based on DFIG by using MRAC and PIP controller[C]//2016 Iranian Conference on Renewable

- Energy & Distributed Generation(ICREDG). Mashhad, Iran: IEEE, 2016:119-126.
- [35] MUNEEER A, KADRI M B. Pitch angle control of DFIG using self tuning neuro fuzzy controller[C]//2013 International Conference on Renewable Energy Research and Applications(ICRERA). Madrid, Spain: IEEE, 2013:316-320.
- [36] ZHANG Y, CHEN Z, HU W, et al. Flicker mitigation by individual pitch control of variable speed wind turbines with DFIG[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2014, 29(1): 20-28.
- [37] CARDENAS R, PENNA R, ALEPUZ S, et al. Overview of control systems for the operation of DFIGs in wind energy applications[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2013, 60(7):2776-2798.
- [38] 万天虎, 李华, 唐浩, 等. 基于全场控制的风电场一次调频控制方式及其工程化应用[J]. 智慧电力, 2019, 47(1):41-46.
- WAN Tianhu, LI Hua, TANG Hao, et al. Primary frequency regulation control method for wind farm and its engineering application based on full-field control[J]. Smart Power, 2019, 47(1):41-46.
- [39] 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 overspeed control and pitch control[J]. Automation of Electric Power Systems, 2011, 35(17):20-25.
- [40] WU Y, LU G, QUOC D P. A review of frequency regulation of DFIG-based wind farms[C]//The 11th IET International Conference on Advances in Power System Control, Operation and Management(APSCOM 2018). Stevenage, UK: IET, 2018: 1-5.
- [41] 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.
- [42] 刘彬彬, 杨健维, 廖凯, 等. 基于转子动能控制的双馈风电机组频率控制改进方案[J]. 电力系统自动化, 2016, 40(16):17-22.
- LIU Binbin, YANG Jianwei, LIAO Kai, et al. Improved frequency control strategy for DFIG-based wind turbines based on rotor kinetic energy control[J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(16):17-22.
- [43] 兰飞, 潘益丰, 时萌, 等. 双馈风电机组变系数虚拟惯量优化控制[J]. 电力系统自动化, 2019, 43(12):51-61.
- LAN Fei, PAN Yifeng, SHI Meng, et al. Optimal variable-coefficient virtual inertia control for DFIG-based wind turbines[J]. Automation of Electric Power Systems, 2019, 43(12):51-61.
- [44] DEEPAK C M, VIJAYAKUMARI A, MOHANRAJAN S R. Virtual inertia control for transient active power support from DFIG based wind electric system[C]//2017 2nd IEEE International Conference on Recent Trends in Electronics, Information & Communication Technology(RTEICT). Bangalore, India: IEEE, 2017:809-814.
- [45] 张祥宇. 变速风电机组的虚拟惯性与系统阻尼控制研究[D]. 北京:华北电力大学, 2013.
- ZHANG Xiangyu. Virtual inertia and system damping control for variable speed wind turbines[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2013.
- [46] ZENG X, LIU T, WANG S, et al. Comprehensive coordinated control strategy of PMSG-based wind turbine for providing frequency regulation services[J]. IEEE Access, 2019(7):63944-63953.
- [47] 李少林, 王伟胜, 张兴, 等. 风力发电对系统频率影响及虚拟惯量综合控制[J]. 电力系统自动化, 2019, 43(15):64-73.
- LI Shaolin, WANG Weisheng, ZHANG Xing, et al. Impact of wind power on power system frequency and combined virtual inertia control[J]. Automation of Electric Power Systems, 2019, 43(15):64-73.
- [48] 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, 37(2):486-496.
- ZHOU Tianpei, SUN Wei. Study on virtual inertia control for DFIG-based wind farms with high penetration[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(2):486-496.
- [49] 柯贤波, 张文朝, 李朋旺, 等. 高风电渗透率系统的模糊自适应虚拟惯量控制[J]. 电网技术, 2020, 44(6):2121-2134.
- KE Xianbo, ZHANG Wenchao, LI Pengwang, et al. Fuzzy adaptive virtual inertia control for high wind power penetration system[J]. Power System Technology, 2020, 44(6):2121-2134.
- [50] 杨蕾, 王智超, 周鑫, 等. 大规模双馈风电机组并网下频率稳定控制策略[J]. 中国电力, 2021, 54(5):186-194.
- YANG Lei, WANG Zhichao, ZHOU Xin, et al. Frequency stability control strategy for large-scale grid connections with DFIG units[J]. Electric Power, 2021, 54(5):186-194.
- [51] 王瑞明, 徐浩, 秦世耀, 等. 风电场一次调频分层协调控制研究与应用[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(14):50-58.
- WANG Ruiming, XU Hao, QIN Shiyao, et al. Research and application on primary frequency regulation of wind farms based on hierarchical coordinated control[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(14):50-58.
- [52] 乔颖, 郭晓茜, 鲁宗相, 等. 考虑系统频率二次跌落的风电机组辅助调频参数确定方法[J]. 电网技术, 2020, 44(3):807-815.
- QIAO Ying, GUO Xiaoxi, LU Zongxiang, et al. Parameter setting of auxiliary frequency regulation of wind turbines considering secondary frequency drop[J]. Power System Technology, 2020, 44(3):807-815.
- [53] 王亚维, 刘邦银, 段善旭, 等. 虚拟同步控制的暂态特性优化策略研究[J]. 中国电机工程学报, 2019, 39(20):5885-5893.
- WANG Yawei, LIU Bangyin, DUAN Shanxu, et al. Research on transient characteristic optimization of virtual synchronization generator control strategy[J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39(20):5885-5893.
- [54] 刘国宇, 蒯圣杰, 吴鸣, 等. 虚拟同步机示范工程综述[J]. 供用电, 2019, 36(4):37-42.
- LIU Guoyu, LIN Shengjie, WU Ming, et al. Summary of virtual synchronous machine technology demonstration project[J]. Distribution & Utilization, 2019, 36(4):37-42.
- [55] 全国微电网与分布式电源并网标准化技术委员会. 虚拟同步机 第1部分:总则:GB/T 38983.1—2020[S]. 北京:中国标准出版社, 2020.
- [56] 钟庆昌. 虚拟同步机与自主电力系统[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(2):336-348.
- ZHONG Qingchang. Virtual synchronous machines and autonomous power systems[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(2):336-348.
- [57] 章艳, 高晗, 张萌. 不同虚拟同步机控制下双馈风机系统频率响应差异研究[J]. 电工技术学报, 2020, 35(13):2889-2900.
- ZHANG Yan, GAO Han, ZHANG Meng. Research on frequency response difference of doubly-fed induction generator system controlled by different virtual synchronous generator controls[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2020, 35(13):2889-2900.
- [58] 吕志鹏, 盛万兴, 钟庆昌, 等. 虚拟同步发电机及其在微电网中的应用[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(16):2591-2603.
- LÜ Zhipeng, SHENG Wanxing, ZHONG Qingchang, et al. Virtual synchronous generator and its application in micro-grid[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(16):2591-2603.

- [59] 吕志鹏,盛万兴,刘海涛,等. 虚拟同步机技术在电力系统中的应用与挑战[J]. 中国电机工程学报,2017,37(2):349-360.
LÜ Zhipeng, SHENG Wanxing, LIU Haitao, et al. Application and challenge of virtual synchronous machine technology in power system[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(2): 349-360.
- [60] 黄林彬,辛焕海,黄伟,等. 含虚拟惯量的电力系统频率响应特性定量分析方法[J]. 电力系统自动化,2018,42(8):31-38.
HUANG Linbin, XIN Huanhai, HUANG Wei, et al. Quantified analysis method of frequency response characteristics for power systems with virtual inertia[J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(8): 31-38.
- [61] 李东东,朱钱唯,程云志,等. 基于自适应惯量阻尼综合控制算法的虚拟同步发电机控制策略[J]. 电力自动化设备,2017,37(11):72-77.
LI Dongdong, ZHU Qianwei, CHENG Yunzhi, et al. Control strategy of virtual synchronous generator based on self-adaptive rotor inertia and damping combination control algorithm[J]. Electric Power Automation Equipment, 2017, 37(11): 72-77.
- [62] 杨赞,梅飞,张宸宇,等. 虚拟同步发电机转动惯量和阻尼系数协同自适应控制策略[J]. 电力自动化设备,2019,39(3):125-131.
YANG Yun, MEI Fei, ZHANG Chenyu, et al. Coordinated adaptive control strategy of rotational inertia and damping coefficient for virtual synchronous generator[J]. Electric Power Automation Equipment, 2019, 39(3): 125-131.
- [63] KONG X, PAN J, GONG X, et al. Emulating the features of conventional generator with virtual synchronous generator technology: an overview[J]. The Journal of Engineering, 2017(13): 2135-2139.
- [64] 惠东. 电力储能技术发展现状及趋势研判[R]. 北京:中国电力科学研究院,2020.
- [65] 赵健,王奕凡,谢桦,等. 高渗透率可再生能源接入系统中储能应用综述[J]. 中国电力,2019,52(4):167-177.
ZHAO Jian, WANG Yifan, XIE Hua, et al. An overview of energy storage application in power systems with high penetration renewable energy resources[J]. Electric Power, 2019, 52(4): 167-177.
- [66] 赵嘉兴,高伟,上官明霞,等. 风电参与电力系统调频综述[J]. 电力系统保护与控制,2017,45(21):157-169.
ZHAO Jiaxing, GAO Wei, SHANGGUAN Mingxia, et al. Review on frequency regulation technology of power grid by wind farm[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(21): 157-169.
- [67] KUSHWAHA P, VIVEK P, ROHIT B, et al. Assessment of energy storage potential for primary frequency response adequacy in future grids[C]//2018 8th IEEE India International Conference on Power Electronics (IICPE). Jaipur, India: IEEE, 2018: 1-6.
- [68] SHIM J W, VERBIC G, ZHANG N, et al. Harmonious integration of faster-acting energy storage systems into frequency control reserves in power grid with high renewable generation[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2018, 33(6): 6193-6205.
- [69] WEN J, LIU J, LONG Y, et al. Solution to short-term frequency response of wind farms by using energy storage systems[J]. IET Renewable Power Generation, 2016, 10(5): 669-678.
- [70] ZHANG S, MISHRA Y, SHAHIDEPOUR M. Fuzzy-logic based frequency controller for wind farms augmented with energy storage systems[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2016, 31(2): 1595-1603.
- [71] 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.
- [72] 刘辉,葛俊,巩宇,等. 风电场参与电网一次调频最优方案选择与风储协调控制策略研究[J]. 全球能源互联网,2019,2(1): 44-52.
LIU Hui, GE Jun, GONG Yu, et al. Optimization scheme selection of wind farm participation in grid primary frequency modulation and study of wind-storage coordination control strategy[J]. Journal of Global Energy Interconnection, 2019, 2(1): 44-52.
- [73] PRASAD R, PADHY N P. Synergistic frequency regulation control mechanism for DFIG wind turbines with optimal pitch dynamics[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2020, 35(4): 3181-3191.
- [74] 李颖颖,王德林,范林源,等. 双馈风电机组限功率运行下频率稳定的变系数控制策略[J]. 电网技术,2019,43(8):2910-2917.
LI Yingying, WANG Delin, FAN Linyuan, et al. Variable coefficient control strategy of DFIG under power-limited operation[J]. Power System Technology, 2019, 43(8): 2910-2917.
- [75] 赵晶晶,李敏,何欣芹,等. 基于限转矩控制的风储联合调频控制策略[J]. 电工技术学报,2019,34(23):4982-4990.
ZHAO Jingjing, LI Min, HE Xinqin, et al. Coordinated control strategy of wind power and energy storage in frequency regulation based on torque limit control[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2019, 34(23): 4982-4990.
- [76] 颜湘武,宋子君,崔森,等. 基于变功率点跟踪和超级电容器储能协调控制的双馈风电机组一次调频策略[J]. 电工技术学报,2020,35(3):530-541.
YAN Xiangwu, SONG Zijun, CUI Sen, et al. Primary frequency regulation strategy of doubly-fed wind turbine based on variable power point tracking and supercapacitor energy storage[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2020, 35(3): 530-541.
- [77] 国家能源局华中监管局. 华中区域发电厂并网运行管理实施细则[EB/OL]. (2020-09-07)[2020-12-07]. <http://hzj.nea.gov.cn/adminContent/initViewContent.do?pk=AEB05CC013339FBDE-050A8C0C1C8659B>.
- [78] 张旭,陈云龙,岳帅,等. 风电参与电力系统调频技术研究的回顾与展望[J]. 电网技术,2018,42(6):1793-1803.
ZHANG Xu, CHEN Yunlong, YUE Shuai, et al. Retrospect and prospect of research on frequency regulation technology of power system by wind power[J]. Power System Technology, 2018, 42(6): 1793-1803.
- [79] 刘巨,姚伟,文劲宇,等. 大规模风电参与系统频率调整的技术展望[J]. 电网技术,2014,38(3):638-646.
LIU Ju, YAO Wei, WEN Jinyu, et al. Prospect of technology for large-scale wind farm participating into power grid frequency regulation[J]. Power System Technology, 2014, 38(3): 638-646.
- [80] SHAO C, LI Z, HAO R, et al. A wind farm frequency control method based on the frequency regulation ability of wind turbine generators[C]//2020 5th Asia Conference on Power and Electrical Engineering (ACPEE). Chengdu, China: IEEE, 2020: 592-596.
- [81] 郑重,杨振勇,李卫华. 风电与火电机组的一次调频技术分析 & 比较[J]. 电力自动化设备,2017,37(12):92-101.
ZHENG Zhong, YANG Zhenyong, LI Weihua. Analysis and comparison of primary frequency control technology for wind power and thermal power unit[J]. Electric Power Automation Equipment, 2017, 37(12): 92-101.
- [82] KHESHTI M, DING L, BAO W, et al. Toward intelligent inertial frequency participation of wind farms for the grid frequen-

- cy control[J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2020,16(11):6772-6786.
- [83] WANG Z, WU W. Coordinated control method for DFIG-based wind farm to provide primary frequency regulation service[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2018,33(3):2644-2659.
- [84] AWEDNI O, MASMOUDI A, KRICHEN L. Power control of DFIG-based wind farm for system frequency support [C] // 2018 15th International Multi-conference on Systems, Signals & Devices (SSD). Hammamet, Tunisia: IEEE, 2018: 1298-1304.
- [85] 王瑞峰, 高磊, 谌杰, 等. 高风电渗透率下变速风电机组参与系统频率调整策略[J]. 电力系统自动化, 2019,43(15):101-110. WANG Ruifeng, GAO Lei, CHEN Jie, et al. Frequency regulation strategy with participation of variable speed wind turbines for power system with high wind power penetration[J]. Automation of Electric Power Systems, 2019,43(15):101-110.
- [86] 张俊武, 王德林, 刘柳, 等. 基于变参数PI控制的双馈风电机组频率控制策略[J]. 电工电能新技术, 2018,37(12):9-17. ZHANG Junwu, WANG Delin, LIU Liu, et al. Control strategy of high penetration wind power out of frequency regulation based on variable parameter PI control [J]. Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy, 2018,37(12):9-17.
- [87] 侍乔明, 王刚, 李海英, 等. 考虑调频能力的风电场虚拟惯量多机协同控制策略[J]. 电网技术, 2019,43(11):4005-4017. SHI Qiaoming, WANG Gang, LI Haiying, et al. Coordinated virtual inertia control strategy of multiple wind turbines in wind farms considering frequency regulation capability[J]. Power System Technology, 2019,43(11):4005-4017.
- [88] 黄伟, 陈炜, 吴军, 等. 基于功率平衡控制原理的双馈风电机组辅助调频方法[J]. 电力自动化设备, 2019,39(1):66-72. HUANG Wei, CHEN Wei, WU Jun, et al. Auxiliary frequency modulation method of DFIG-based wind turbine based on principle of power balance control[J]. Electric Power Automation Equipment, 2019,39(1):66-72.
- [89] JOSEPH T, GONCALVES J, UGALDE-LOO C E, et al. Wind-thermal generation coordination in multi-terminal HVDC-connected AC systems for improved frequency support [C] // 13th IET International Conference on AC and DC Power Transmission (ACDC 2017). Manchester, UK: IET, 2017: 1-6.
- [90] YANG P, DONG X, LI Y, et al. Research on primary frequency regulation control strategy of wind-thermal power coordination[J]. IEEE Access, 2019(7):144766-144776.
- [91] 孙铂皓, 汤涌, 叶林, 等. 基于分层分布式模型预测控制的多时空尺度协调风电集群综合频率控制策略[J]. 中国电机工程学报, 2019,39(1):155-167. SUN Bohao, TANG Yong, YE Lin, et al. Integrated frequency control strategy for wind power cluster with multiple temporal-spatial scale coordination based on H-DMPC[J]. Proceedings of the CSEE, 2019,39(1):155-167.
- [92] 刘吉臻, 姚琦, 柳玉, 等. 风火联合调度的风电场一次调频控制策略研究[J]. 中国电机工程学报, 2017,37(12):3462-3469. LIU Jizhen, YAO Qi, LIU Yu, et al. Wind farm primary frequency control strategy based on wind & thermal power joint control[J]. Proceedings of the CSEE, 2017,37(12):3462-3469.

作者简介:



刘洪波

刘洪波(1973—),女,吉林吉林人,教授,博士后,主要研究方向为电力系统稳定和控制等(E-mail:690760747@qq.com);

彭晓宇(1997—),女,内蒙古通辽人,硕士研究生,主要研究方向为风电参与电力系统调频控制等(E-mail:1240843105@qq.com)。

(编辑 李玮)

Overview of wind power participating in frequency regulation control strategy for power system

LIU Hongbo, PENG Xiaoyu, ZHANG Chong, ZHANG Shuyu

(Key Laboratory of Modern Power System Simulation and Control & Renewable Energy Technology, Ministry of Education, Northeast Electric Power University, Jilin 132012, China)

Abstract: With the large-scale development of renewable energy, the wind power has been integrated into the power grid in large quantities and its penetration rate has been increasing. On the one hand, the overall inertia of system is reduced because traditional power generators are replaced by wind turbines that have a smaller inertia time constant. On the other hand, the intermittency and randomness of wind power production affects the system frequency characteristics and further reduces the system frequency regulation ability. The participation of wind power units in frequency regulation is one of the effective means to accommodate the penetration of wind power. Hence, the participation of wind power in the field of frequency regulation is reviewed. Firstly, the frequency regulation control strategies of the two most commonly used wind power unit, i.e., variable-speed wind turbines of doubly-fed induction generator and permanent magnetic synchronous generator, are taken as an example, the principles, advantages and disadvantages, development tendency of the rotor overspeed control, pitch angle control, combined virtual inertia control, virtual synchronous generator control, energy storage and wind power frequency regulation, and the combination of multiple control strategies are reviewed. Subsequently, some key problems of wind farm participating in system frequency regulation are analyzed. Finally, the future research directions in this topic are summarized.

Key words: wind turbines; wind farms; frequency regulation; rotor overspeed control; pitch angle control; combined virtual inertia control; virtual synchronous generator control; energy storage