

新能源场站快速频率支撑能力评估研究现状与技术展望

鲁宗相¹, 李佳明¹, 乔颖¹, 姜继恒¹, 王伟胜², 朱凌志², 王士柏³, 苗伟威⁴

(1. 电力系统及发电设备控制和仿真国家重点实验室(清华大学), 北京市 100084;

2. 新能源与储能运行控制国家重点实验室(中国电力科学研究院有限公司), 北京市 100192;

3. 国网山东省电力公司电力科学研究院, 山东省济南市 250003; 4. 国网山东省电力公司, 山东省济南市 250000)

摘要: 随着以风电、光伏为代表的新能源发电逐步取代同步机组, 系统调频资源不足、抗扰动能力下降, 频率安全问题凸显, 新能源场站提供快速频率支撑成为构建新型电力系统的必然要求。新能源场站快速频率支撑是其内部多设备、多环节综合作用的结果, 受风光资源、控制策略、电网条件等多因素的影响和制约。量化评估新能源场站的快速频率支撑能力是指导场站调频优化控制、分析新型电力系统频率响应特性、实现场站调频资源与电网交互的基础和前提。文中对新能源场站快速频率支撑能力评估问题进行了全面综述。首先, 分析场站快速频率支撑的特征, 并给出了场站快速频率支撑能力的定义; 然后, 从状态属性、控制特性、调频效果3个维度梳理了场站快速频率支撑能力的评估指标体系, 并对各类评估指标的常用计算方法进行分析评述; 最后, 提出了值得关注和进一步研究的关键技术问题。

关键词: 快速频率支撑; 新能源场站; 有功功率控制; 能力评估; 惯量支撑; 一次调频

0 引言

在“双碳”战略目标导向下, 中国正在加快构建新能源占比不断提升的新型电力系统, 以风、光为代表的新能源发展将进一步提速^[1-6]。截至2022年底, 中国风光电源装机占比为29.6%, 年发电量占比达到13.7%, 标志着已全国性迈入中比例可再生能源发展阶段^[7-8]。风光电源以及电化学储能、柔性直流换流站需要直接或间接通过电力电子设备接入电网。电力电子设备呈现低惯量、弱支撑的并网特性, 电力电子化程度进一步加深, 为电力系统的有功功率-频率调控问题带来了新的挑战^[9-10]。

一方面, 随着新能源发电逐步取代传统火电机组, 电网中由同步机提供的旋转惯量和一次调频能力逐渐下降, 调频资源不足问题凸显。西班牙的一项研究表明, 从1996年到2016年, 欧洲电网整体惯量下降了20%, 其中, 丹麦电网的惯量下降程度达到60%^[11]。根据中国电力科学研究院有限公司预测, 2030年中国电网的旋转惯量将下降至2011年的

50%^[12], 惯量严重不足, 仅靠同步机组参与频率调节不足以应对负荷和新能源的功率波动。另一方面, 新能源诱发的频率事故成为电网安全稳定运行的重大威胁。在低惯量电力系统中, 暂态频率事故发生的可能性更大, 造成的危害也更加严重^[13]。文献[14]指出, 当电力系统中新能源电量渗透率超过50%时, 暂态频率安全问题将十分显著, 大功率扰动后的暂态频率问题将严重威胁电网的安全运行。近年来, 由新能源诱发的新型暂态频率事故已在多个国家出现, 如2016年南澳^[15-18]、2019年英国^[19]的停电事故。高比例电力电子化电源接入导致的电网惯量不足、抗干扰性差^[20]是造成事故后频率快速跌落、触发低频减载的重要原因之一。

为应对上述挑战, 挖掘新能源场站频率支撑能力已成为国际共识^[21-24]。通过并网变流器控制环改造、预留备用以及附加储能装置等方式, 风/光场站可为系统提供快速频率支撑(fast frequency support, FFS)^[25-30]。新能源渗透率较高的国家出台的并网标准中, 对风/光场站的FFS提出了要求。丹麦、爱尔兰、英国等欧洲国家要求新能源场站具有功率-频率下垂调节能力^[31-34]; 南非电力系统要求并网新能源场站在安全频率范围内运行时, 需要主动减载不少于3%的理论功率以提供调频备用^[35]; 加拿大魁北克电网要求额定功率大于10 MW的风电场必须

收稿日期: 2023-09-18; 修回日期: 2023-12-25。

上网日期: 2024-04-11。

国家重点研发计划资助项目(2021YFB2400500); 国家电网有限公司科技项目(光伏/风电场站暂态频率电压主动快速支撑技术)。

具备有功功率-频率控制系统,在大扰动导致的低频事件中,风电场需要持续9 s提供6%额定功率的有功功率增量^[36]。2021年,中国风电场并网导则新增了风电场应参与惯量响应和一次调频响应的规定^[37]。2021年9月,华东电网开展了大区域电网频率特性验证和新能源主动支撑能力试验^[38],试验期间,通过灵绍直流功率速降和发电机组同步停运,共产生功率失却3 GW,华东电网频率最低跌落至49.897 Hz。试验过程中,风电场、光伏电站等新能源电源触发了一次调频动作,试验有效检验了试点新能源场站的一次调频性能。

在中国电力系统进入中比例可再生能源阶段并逐步向高比例阶段迈进的背景下,为满足新型电力系统对频率支撑能力的需求,新能源场站的有功功率-频率控制应从现有的一次调频技术进一步向超越常规电源的响应速度以及灵活的场景适应性等方向发展。通过主动支撑型风/光机组快速有功控制系统和场站主动支撑型控制系统的升级改造,新能源场站将为电网频率提供更快速、有效、可靠的支撑^[39-41],为保障中国未来高比例新能源电力系统安全稳定运行发挥重要作用。

新能源发电单元数量多,但单机容量小、运行状态差异大且地理位置分散,难以与调度系统直接交互,需要以新能源场站为一个调度单元纳入系统。为实现场站调频资源与电网的有效交互,量化评估新能源场站的快速频率支撑能力(fast frequency support capability, FFSC)是基础和前提。对场站而言,实时评估场站FFSC是指导场站调频控制策略制定、实现可调可控的重要前提。对电网而言,量化

场站FFSC可以为调度提供清晰的可调能力边界,将可信调频资源纳入电网调频体系。现有相关研究涉及对新能源场站调频能力的分析,但是其评估指标和方法往往局限于所关注的特定场景与环节,缺乏系统化梳理。

本文首先给出FFS的含义并分析新能源场站提供FFS的特征;然后,定义场站FFSC,从状态属性、控制特性、支撑效果3个维度梳理了场站FFSC的量化评估体系,总结了相关评估指标的计算方法;最后,对值得进一步关注的问题进行研究展望。

1 场站FFS的含义与特征

1.1 FFS的含义

FFS是由非同步电源通过变流器的快速频率响应(fast frequency response, FFR)抑制系统频率快速变化的新型电网支撑手段。FFS的定义为^[42-44]:在电网中出现严重有功功率不平衡后,支撑资源在同步机一次调频启动之前率先响应,通过快速改变有功功率注入,与同步惯量和一次调频共同抑制扰动后初期系统频率快速变化的措施。本文FFS关注的焦点为系统出现功率大扰动后,FFS资源在暂态频率响应过程中对系统频率变化率(rate of change of frequency, RoCoF)、频率最大偏移量和稳态频率偏差的抑制作用。

FFS与同步机的惯量支撑、一次调频存在本质不同,详细对比如表1所示。功率响应的快速性是FFS的基本要求,FFS资源应能够在触发响应后数百毫秒内快速、准确实现设定的有功调节目标。目前,所关注的FFS资源主要包括风电、光伏、储能装置和直流输电^[42]。

表1 FFS与惯量支撑、一次调频的对比
Table 1 Comparison of FFS with inertia support and primary frequency regulation

频率响应类型	响应资源	响应时间	持续时间	响应特点
惯量支撑	同步机轴系	即时响应	持续支撑,在扰动后0~3 s内发挥主要作用	缓解扰动后初期RoCoF,不能恢复频率
一次调频	同步调速器	2~30 s	30 s~10 min	即时性受调速器影响,爬坡时间为数十秒
FFS	通过变流器并网的设备	启动时间为数百毫秒 ^[42] ,全响应时间不超过2 s ^[43]	持续时间应大于频率极值点出现时间,一般为5 s~20 min ^[45]	响应、爬坡速度均快于一次调频,持续时间可按电网需求,FFS资源特点灵活设定

惯量支撑、一次调频和FFS在系统频率响应的时序关系如图1所示。FFS启动时间 $t_{FFS,1}$ 一般不超过数百毫秒,全响应时间 $t_{FFS,2}$ 不超过2 s,在扰动后初期快速调节有功功率,弥补同步机一次调频的响应延时。为有效抑制最大频率偏差,FFS持续时间 $t_{FFS,3}$ 应不小于系统频率最低点出现时间 t_{FN} 。待

一次调频充分响应后,FFS资源可根据系统需求和自身的动态能量储备适时退出响应、恢复到正常运行状态,或继续与一、二次调频共同参与系统频率恢复,直至 $t_{FFS,4}$ 时刻完全退出FFS。特别地,对于利用风电机组转子动能或电容器储能等临时能量参与FFS的机组,应合理设置其支撑幅度、支撑时间

和状态恢复策略,以避免其在能量恢复过程中对系统造成频率二次跌落。

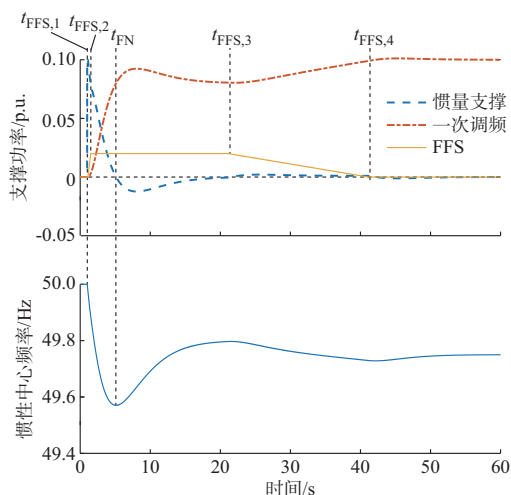


图1 FFS在频率响应中的时序关系
Fig. 1 Sequence relationship of FFS in frequency response

随着可再生能源发电装机比例的增加,系统同步惯量和一次调频能力下降,FFS将会成为保障系统频率安全的重要支撑手段。新能源场站FFS技术正在向超越常规电源响应速度的方向发展,通过对有功控制系统的升级改造,风电场、光伏电站可以具备快速功率调节的能力^[46],成为未来电力系统中提供FFS的重要主体。

1.2 新能源场站FFS的特征

1.2.1 发电单元FFS的特征

风电场/光伏电站实现FFS的基本支撑单元为其内部的分散受控风/光发电单元,也包括储能装置(若配置)。风/光/储单元频率响应与同步机频率响应特性对比如表2所示。

1.2.2 场站FFS的特征

场站FFS是其内部大量风/光/储支撑单元有功功率-频率响应综合作用的效果,最终体现在场站与电网之间的公共连接点(point of common coupling, PCC)处,具备以下特征。

1)受多环节、多因素影响。

场站FFS的实现受光/风资源、外部电网条件和发电单元内部机械/电气环节的多重约束,是大量状态和特性迥异的控制单元综合作用的结果。频率测量、场内通信、FFS过程中场站与单机的交互方式、FFS控制策略以及单机响应等多环节,场站内部风速/辐照度分布、稳态运行状态以及各类电气量、机械量限制因素都会影响FFS特性。

2)时变性显著。

场站内风/光/储发电单元的FFS响应特性取决于其控制策略。受资源波动、发电单元运行点变化的影响和制约,风/光发电单元的FFS控制方式和参数一般随实时资源状况和运行状态变化而动态调整,相应的FFS响应特性呈现出时变特点。

在配置储能装置的新能源场站中,储能需要根据风/光出力情况和调度指令提供补偿预测误差、平抑出力波动和跟踪调度计划等服务,以改善场站的涉网性能,其发电功率以及剩余能量具有时变性。因此,储能装置在FFS中的可调容量也呈现时变性。

此外,在不同电网运行方式下,可能出现的功率扰动类型、位置和大小也存在差异。

在上述因素综合作用下,场站FFS在不同时段内的响应特性往往不同,具有显著的时变性。

3)功率上调需有备用能量。

按照调节方向,场站FFS分为高频事件下的紧急降功率(功率下调)和低频事件下的紧急升功率(功率上调)。其中,紧急降功率可依靠安全稳定控制系统直接切除部分机组或整个场站实现,动作时间不超过100 ms^[47]。然而,场站功率上调需要提前留有充足的备用能量。

光伏发电单元不包含机械旋转部件,其内部直流电容器存储的能量折算的等效惯量系数相较于同步机惯量常数小了2个数量级^[48],几乎无法发挥频率支撑作用。因此,不降载的光伏发电单元几乎不具备上调功率的能力。当要求光伏场站具备向上调节能力时,光伏场站需要限功率运行。

表2 风/光/储发电单元的频率响应特性

Table 2 Frequency response characteristics of wind/photovoltaic/storage generation units

频率响应类型	单元容量/MW	能量来源	支撑资源受限性	响应特性	过流能力
同步机频率响应(惯量+一次调频)	50~2 000	转子动能、调速器控制的原动机	可以持续支撑	转子转速决定电网频率,通过转子能量释放以及原动机功率调整参与调频	瞬时过载能力强
风力发电单元FFS	1~15	轴系动能/降载备用	受风/光资源条件制约	构网型设备模仿同步机频率响应;跟网型设备通过锁相跟踪电网频率,可通过定制化的控制策略实现有功功率-频率响应	变流器过流能力弱(约1.1 p.u.),支撑功率受变流器容量的限制
光伏发电单元FFS	0.1~5.0	降载备用			
新能源场站内储能FFS	1~100	功率/能量备用	受剩余能量制约		

不降载的风电机组只能通过临时释放转子动能提供短时功率上调,而支撑持续时间一般小于10 s,并且在退出FFS后存在明显的功率回撤现象,不利于系统频率恢复。为使风电机组提供更可靠、优质的功率上调,同样需要通过预先超速或变桨控制使风电机组限功率运行。

场站内储能装置可提供上调备用功率,但配置储能需要增加投资。

2 场站 FFSC 的定义、量化评估指标与影响因素

2.1 定义

本文将新能源场站的 FFSC 定义为:在所关注的 FFS 时间尺度内,场站响应系统频率变化并主动调整其并网有功功率,进而抑制系统频率快速变化的潜力或效果。

FFSC 可以进一步分为功率上调 FFSC (upward FFSC, UFFSC) 和功率下调 FFSC (downward FFSC, DFFSC) 两个方向。其中,场站功率快速下调一般通过稳控系统切机的方式实现,现有技术可实现百毫秒内快速切除^[47],可下调功率极限等于当前场站发电功率。也有研究探索通过“以调代切”的方式减少机组损耗^[49],提高向下支撑后的功率恢复速度。相较于向下支撑,向上支撑的制约因素多、调节过程复杂、支撑潜力不明晰。低频事件中的场站 UFFSC 分析是当前研究热点,也是本文关注重点。如无特殊说明,后文中的 FFSC 专指 UFFSC。

2.2 量化评估指标

新能源场站的发电能力和有功功率调节能力是其频率支撑能力的基础,其关系如图2所示。图中:场站发电能力受风光资源条件和各发电单元发电特性的综合影响;有功调节能力则是指在发电能力和能量储备的综合作用下,场站PCC处的有功功率可调范围。拟定适当的有功功率-频率控制策略将场站有功功率调节能力与电网的支撑需求相匹配,进而形成场站的频率支撑能力。

上述3种能力存在复杂的耦合关系,均可用于

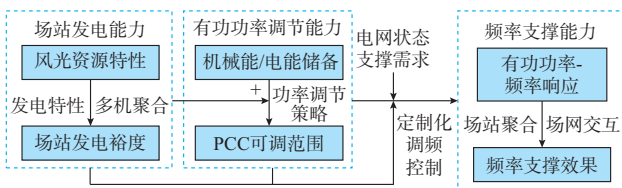


图2 新能源场站3种能力之间的关系
Fig. 2 Relationship among three capabilities of renewable energy station

刻画场站的FFSC。不同语境中的FFSC可能有不同含义。本文不对上述3种能力进行严格区分,从状态属性、控制特性和支撑效果3个维度对现有新能源场站FFSC的评估指标体系进行归纳。3个评估维度与FFS过程中“频率-功率-能量”之间的关系如图3所示,评估指标的细化分解如表3所示。

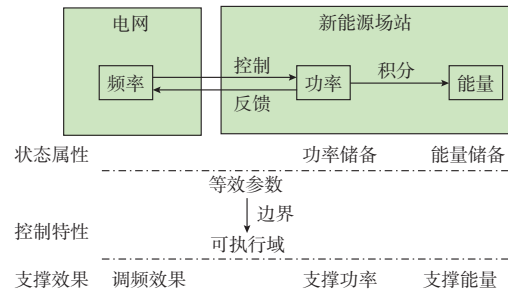


图3 FFSC的三维评估指标
Fig. 3 Three-dimensional evaluation indices for FFSC

表3 FFSC的量化评估指标
Table 3 Quantitative evaluation indices for FFSC

评估维度	指标类型	量化评估指标
状态属性	能量储备	备用能量(电能储备、动能储备等)
	功率储备	备用功率
控制特性	等效参数	等效惯量、下垂系数、功率增量等
	可执行域	可调功率边界、可执行控制参数极限等
支撑效果	调频效果	频率变化率、一/二次频率跌落最低点、稳态频率等
	支撑功率	性能类指标(响应延时、响应速度、上升时间、支撑持续时间、响应精度等)
		贡献类指标(调频贡献功率)
		回撤类指标(回撤功率、恢复时间)
支撑能量	调频贡献电量	

状态属性维度^[50-52]表征场站的能量/功率储备量,是场站参与FFS的基本前提,同时也是影响调频控制模式、参数和支撑时间设定的重要因素。其主要包括场站内部各单元存储的机械能、电磁能、电化学能以及通过降载留存的功率/能量等形式。该维度特征仅取决于场站自身的资源条件和稳态运行点,与调频控制策略、电网工况等因素无关。

控制特性维度^[53-55]表征场站在FFS过程中呈现的“有功功率-频率”响应特性,是场站内部分散受控单元频率响应的综合效果,受场站状态属性影响,由场站调频控制策略决定。从等效控制参数的角度,其可用等效惯量、下垂系数等表征;从可执行域的角度,其可以描述为在多重限制因素制约下场站可调节功率或可执行控制参数指令的取值极限。

支撑效果维度^[56-59]表征场站FFS对系统频率

响应特性的改善效果或提供的功率/能量支撑水平。由于系统频率由扰动功率、场站和站外电网响应特性共同决定,频率特性改善效果不单取决于场站控制特性,还受扰动类型和电网运行方式影响。

2.3 关键影响因素

场站FFSC是其内部各分散受控发电单元以及储能装置等多设备、多环节频率响应综合作用的结果,其影响因素众多且相互耦合。主要影响因素可以分为稳态运行状态、有功功率-频率控制、电网条件以及限制因素4类,如图4所示。

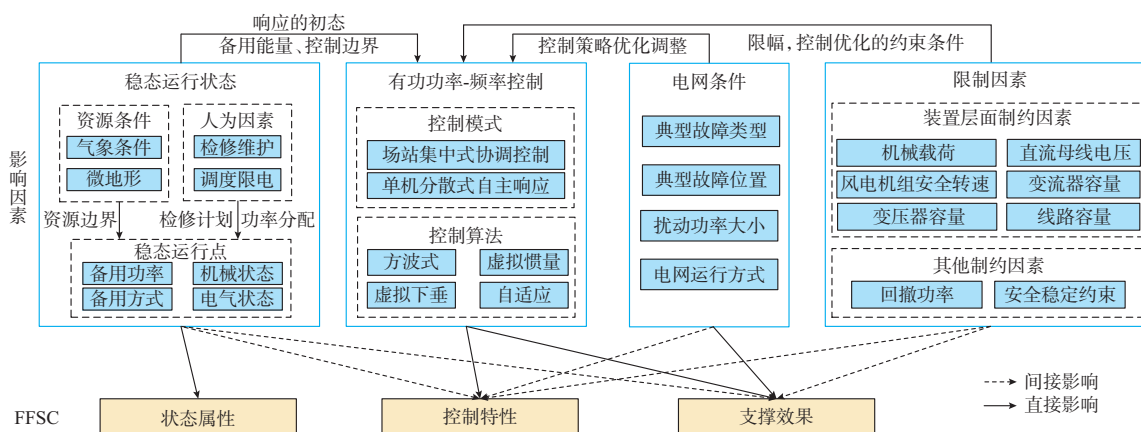


图4 影响新能源场站FFSC的关键因素
Fig. 4 Key factors affecting FFSC of renewable energy station

稳态运行状态为场站在FFS初始阶段的资源条件、电气量和机械量特征。其中,风光发电设备的备用功率、风电机组叶轮动能储备以及储能装置备用容量等特征决定了场站的能量储备,对调频潜力有显著影响。场站内部微观资源分布、调度限功率、场内设备检修计划、场站内部功率分配策略以及发电单元降载方式等因素都会影响场站的能量储备。

有功功率-频率控制是场站检测系统频率并将其转化为功率调整指令,改变各发电单元输出功率、泄放储备能量的过程。根据功率调整指令的生成方式,控制模式可分为场站集中控制和单机自主响应两类^[60]。单机自主响应包含频率量测、有功功率-频率控制算法以及单机响应环节;场站集中控制还包括功率指令分配以及单机-场站通信环节。其中,频率测量方式及精度、通信环节、响应死区设置都会影响FFS效果。根据“频率-功率指令”的转换方式,常用的控制算法包括方波控制、虚拟惯量/下垂控制、自适应控制以及频率整形控制等。不同的控制算法在FFS过程中生成的功率调整指令不同,导致FFS效果不同。

电网条件即场站PCC的外部的电网状态,包括典型故障类型、扰动位置和大小以及电网运行方式等。一方面,同步机开机方式、负荷大小等电网条件决定了场外系统频率响应特性,影响频率支撑效果;另一方面,不同的电网运行方式对场站频率支撑的需求不同,场站FFS控制方式往往随电网运行方式

的变化而动态调整。

限制因素即制约FFS过程中场站储备能量释放的各类要素,具体可分为对有功功率-频率控制参数的限制和对控制信号的限幅。装置层面的制约因素包含并网变流器、集电线路和变压器容量等电气量约束以及发电单元机械部件载荷(FFS过程主要考虑极限载荷约束)、风电机组安全转速范围等机械量约束。利用风电机组转子动能等临时性能量参与FFS的机组在退出FFS后,其状态恢复过程中会从电网吸收功率,回撤功率过大会造成频率二次跌落。此外,附加有功功率-频率控制环节可能会对系统振荡特性以及稳定性产生影响^[61-64]。因此,回撤功率和安全稳定约束同样会影响场站FFSC。上述限制因素是制定场站FFS控制策略的约束条件,会对FFS期间场站释放能量、控制参数取值等产生影响。

3 场站FFSC评估方法

新能源场站FFSC的评估框架如图5所示。

按照评估所关注的时间尺度,场站FFSC评估方法可以分为离线、仿真、实时和预测评估4类。其中,实时和预测评估需要在线运行。离线评估利用场站历史运行信息和故障录波数据分析场站FFSC,主要应用于事后评估;仿真评估根据场站和系统频率响应模型,分析不同边界条件下的场站频率支撑特性;实时/预测评估须在线滚动输出场站的

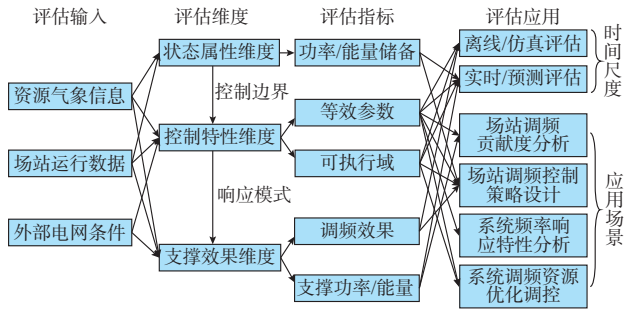


图5 新能源场站FFSC的评估框架
Fig. 5 Evaluation framework for FFSC of renewable energy station

实时FFSC或其变化趋势,二者方法类似,主要区别在于输入数据是实时采集量还是其预测值。场站FFSC评估结果在场站层面的应用主要为调频贡献度分析及调频控制策略设计;在系统层面的应用主要为系统频率响应特性分析及多类型调频资源协调优化调控。

本章按照状态属性、控制特性和支撑效果3个评估维度,评述其现有评估计算方法及不足之处。

3.1 状态属性维度

状态属性维度包含场站功率储备和能量储备两类评估指标,下面分别介绍其评估方法。

3.1.1 功率储备

新能源场站功率储备的评估指标为上调备用功率 P_{res} ,表征在当前资源条件下场站理论发电功率与实际发电功率的差值,如式(1)所示。

$$P_{res} = \sum_i (P_{MPPT,i} - P_{E,i}) \quad (1)$$

式中: $P_{MPPT,i}$ 和 $P_{E,i}$ 分别为场站内发电单元 i 在当前资源条件下的理论发电功率和实际有功功率。

对于配置储能装置的场站,备用功率 P_{res}^* 计算如下:

$$P_{res}^* = \sum_i (P_{MPPT,i} - P_{E,i}) + P_B + P_{B,max} \quad (2)$$

式中: P_B 和 $P_{B,max}$ 分别为场站内储能装置(一般为电化学储能装置)的发电功率(充电为正、放电为负)和最大充放电功率。

场站实际有功功率可以在PCC测得,获知备用功率的关键是计算理论发电功率,计算步骤^[65-67]为:1)基于电源铭牌或通过实测数据拟合得到发电单元理想的“资源-发电功率”映射关系;2)将场站测光仪、测风塔、机舱测风仪等装置测量得到的资源数据还原为理论功率。

准确计算场站理论功率需要获知场站内部所有发电单元的真实资源条件,文献[68]利用风电场运行观测数据建立了风电机组输出功率与机舱风速的

映射关系,并通过实测机舱风速计算理论功率。考虑到实际风/光场站内部资源观测位点较少且测风仪等单机级资源监测数据质量不佳,文献[69]建立了太阳辐照度的时空插补模型,利用数据驱动方法获取网格化资源分布;文献[70]使用计算流体力学模型修正风电场测风塔数据,得到场站内部风资源微观分布特性;文献[71-74]利用风电机组运行数据修正机舱测风仪风速,得到叶片捕获的真实风速,提升了风电机组理论功率计算精度。考虑到对场内所有单机逐一计算理论功率计算所需的数据量、计算量大,可采用机群聚类划分^[75]、样板机^[76]等方法,利用代表性机组运行数据估算场站理论功率。

3.1.2 能量储备

能量储备 $E_{storage}$ 为场站内部储能装置的储备能量,主要包括风电机组的轴系动能以及电容器、电化学储能装置的电能,如式(3)所示。

$$E_{storage} = \underbrace{\frac{1}{2} \sum_i J_{WT,i} (\omega_{WT,i}^2 - \omega_{WT,min,i}^2)}_{\text{风电机组轴系可释放动能}} + \underbrace{\frac{1}{2} C (U^2 - U_{min}^2)}_{\text{电容器可释放电能}} + \underbrace{(S_{OC} - S_{OC,min}) E_B}_{\text{电化学储能可释放电能}} \quad (3)$$

式中: $J_{WT,i}$ 为风电机组 i 的轴系转动惯量; $\omega_{WT,i}$ 和 $\omega_{WT,min,i}$ 分别为风电机组 i 的转速和最低转速限制; C 、 U 、 U_{min} 分别为电容器容量、电压和最低电压限制; E_B 为电化学储能装置额定容量; S_{OC} 和 $S_{OC,min}$ 分别为储能荷电状态和最低荷电状态限制。

在FFS过程中,风电机组转速下降过多会导致叶轮捕获风功率下降,可能出现反向调节的现象,且退出调频后将引发更为严重的频率二次跌落^[77-80]。因此,在FFS中风电机组轴系动能难以充分释放。对于采用转子超速降载控制的风电场,在调频中恢复最大功率点跟踪(MPPT)转速的过程可以同时增加风能捕获和释放转子动能。定义风电场从转子超速降载运行状态恢复MPPT模式过程中释放的转子动能 $E_{WF,storage}$ 为可安全释放动能储备,如式(4)所示。

$$E_{WF,storage} = \frac{1}{2} \sum_i J_{WT,i} (\omega_{WT,i}^2 - \omega_{WT,MPPT,i}^2) \quad (4)$$

式中: $\omega_{WT,MPPT,i}$ 为风电机组 i 在MPPT模式下的转速。

场站的广义能量储备 $E_{storage}^*$ 如式(5)所示。与式(3)相比, $E_{storage}^*$ 还包括场站降载备用功率在调频过程中能够提供的“潜在能量”。

$$E_{storage}^* = E_{storage} + P_{res} T_{FR} \quad (5)$$

式中: T_{FR} 为场站FFS持续时间。

基于能量储备评估的新能源场站快速调频控制和调频潜力分析、预测受到了广泛关注。文献[81-83]建立了最大化风电场能量储备的场站内部功率优化分配模型,并通过仿真分析表明,增加场站的稳态能量储备可以有效改善频率支撑效果。文献[84]提出了风电场在调频过程中可释放动能的计算方法,并通过能量折算得到风电场等效频率响应参数。在一次调频过程中,风电机组存储的动能可以通过并网变流器控制快速泄放,其短时间内能量释放速度快于依赖调速器等慢速机械环节动作的同步机。

文献[50]从能量储备分析的角度评估风电场调频潜力,根据风电机组叶轮转速在FFS过程中以2 r/min变化来计算风电场调频能力,认为风电场具备在事故后0~30 s内提供充足调频容量的潜力。考虑到风光资源的波动性,文献[51]通过统计分析一年内的风电场转子动能储备,得到风电场快速调频容量在全年约40%的时间内近似相当于等容量的同步机,而其余60%的时间比等容量同步机储备能量低。文献[52]建立了风电场风速与可释放转子动能的关系,通过风速预测信息滚动评估场站调频潜力。

目前,对该维度的评估存在以下不足:

1) 现有研究多假定FFS过程中风光资源条件恒定。然而,FFS全过程一般持续十几秒至数十秒,其间风光资源存在随机波动,故需要根据风光资源在此时段内的波动特性对评估结果进行修正。

2) 当前研究多以资源监测点或样板机的单点资源数据等效代表全场站,忽略了场站内部微地形导致的发电单元资源特性差异,使得评估不准确。

解决上述问题的关键在于对风电场/光伏电站内部的风/光微观资源条件进行单机级、分钟级滚动评估,以此获得更精细化的状态属性维度评估结果。

表4 新能源场站FFS等效参数计算方法对比

Table 4 Comparison of calculation methods for FFS equivalent parameters of renewable energy station

计算方法	适用场景	优势	局限性
直接计算法	系统频率响应指标快速计算	理论性严谨	复杂控制策略难于计算
备用功率折算法	调频资源调度和规划	高度线性化,便于嵌入调度规划模型	计算结果较为保守
释放能量折算法	估算控制参数	计算简单、快速	计算精度较为粗糙
参数辨识法	频率响应特性分析	无模型依赖,适应多种控制策略	黑箱模型,可解释性差

1) 直接计算法

直接计算法构建场站有功功率-频率控制数学模型,解析化推导场站对外的等效参数,包含2个步骤:①等效建模:建立场站“有功功率-频率”等效控制数学模型,一般表示为状态空间方程或传递函数

3.2 控制特性维度

控制特性维度包含等效参数和可执行域两类评估指标。其中,等效参数用于量化表征新能源场站在FFS过程中的有功功率-频率控制响应特性;可执行域为场站可调功率或控制参数的取值范围。

3.2.1 等效参数

参考同步机系统的有功功率-频率响应模式,常用的场站FFS等效参数可以分为等效功率增量 ΔP_{eq} 、等效惯量 H_{eq} 和等效下垂系数 K_{eq} 。 ΔP_{eq} 、 H_{eq} 和 K_{eq} 分别表征场站参与FFS对系统不平衡功率的减少量、对频率变化速率的抑制程度以及对系统频率偏差的响应功率系数。包含上述等效参数的场站等效有功功率-频率响应特性如图6所示。图中: P_{ub} 为扰动功率; ΔE_{RE} 为场站在FFS过程中额外释放的能量大小。

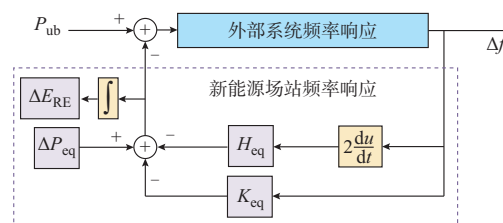


图6 新能源场站FFS等效参数模型

Fig. 6 Equivalent parameter model for FFS of renewable energy station

场站的功率变化 ΔP_{RE} 与系统频率的关系可以表示为:

$$\Delta P_{RE} = \Delta P_{eq} - 2H_{eq} \frac{d\Delta f}{dt} - K_{eq} \Delta f \quad (6)$$

式中: Δf 为系统频率与额定频率的偏差量。

场站FFS等效参数的计算方法主要有4类:直接计算法、备用功率折算法、释放能量折算法以及参数辨识法。各类方法的适用场景、优势和局限性对比如表4所示。

形式^[85-86];②参数计算:根据场站“有功功率-频率”等效模型,进一步计算所需的等效参数。

等效模型建立包含单机等值和多机等值两类方法^[87]。单机等值法利用一台等值机组等效表征场站整体的响应特性^[88]。文献[89]通过等值风能捕

获法获得等值机的风速,并对转速、桨距角等状态量以及调频控制器参数进行平均等值,得到表征风电场调频特性的单机等值模型。文献[90-91]借鉴同步机系统频率响应等值方法^[92],首先,利用小信号分析理论将风电机组单机频率响应表示为一个传递函数;然后,将场站调频模型用与单机相同形式的传递函数表示,并通过参数加权法得到等效单机的参数。单机等值参数多通过参数加权得到,故单机等值法只适用于场站内部各机组采取相同控制模式的场景。然而,运行于不同资源条件的新能源机组往往会自适应采取不同的控制策略,导致场站内部发电单元的控制模式多样化。因此,为准确刻画场站调频模型,需要使用多机等值模型。文献[53]将风电场内部的风电机组分为低风速、中风速和高风速3组,每组风电机组的调频模型分别用一个传递函数表示,使得等值模型能够更好地适应全工况。

在等效参数计算方面,文献[54]建立了含虚拟惯性控制的双馈风电机组详细模型,推导风电机组转子转速与系统频率关联关系的解析表达式,进一步从功率-频率响应外特性的角度解析求得风电机组的等效惯量,表示为一个关于风电机组参数的时变量。文献[55]采用局部线性化方法分别给出风电机组在不同类型功率跟踪模式和频率响应控制策略下的低阶近似调频模型,定义风电场在 0^+ 时刻提供的惯量为其等效惯量,在频率偏差达到稳态后的“有功-频率”下垂系数为其等效一次调频能力。利用传递函数的初值定理和终值定理计算得到等效参数。

2) 备用功率折算法

备用功率折算法将场站的降载备用功率分解为FFS中等效功率增量、虚拟下垂和虚拟惯量控制3种控制模式的释放功率,进而折算对应的等效参数,其计算方式如式(7)所示。

$$\begin{cases} \Delta P_{\text{eq}} = \gamma_P P_{\text{res}} \\ K_{\text{eq}} = \frac{\gamma_K P_{\text{res}}}{\Delta f_{\text{max}}} \\ H_{\text{eq}} = \frac{\gamma_H P_{\text{res}}}{2R_{\text{max}}} \end{cases} \quad (7)$$

式中: γ_P 、 γ_K 、 γ_H 分别为等效功率增量、虚拟下垂和虚拟惯量控制的功率分配系数,满足 $\gamma_P + \gamma_K + \gamma_H = 1$ 且 $\gamma_P, \gamma_K, \gamma_H \geq 0$; R_{max} 和 Δf_{max} 分别为系统可能出现的RoCoF最大值和频率偏差最大值。

该方法建立了场站FFS系数与降载备用功率的关联关系,表达式简洁且便于线性化,常用于系统调频资源调度^[93-97]与规划^[98]问题中。其中,功率分配系数可以作为变量嵌入优化模型中求解。然而,

本方法仅假设场站利用降载功率参与FFS,忽略了场站的叶轮动能储备等其他调频能量来源,且由于系统频率变化率和频率偏差不会同时取到最大值,降载功率不能被充分利用。因此,此类“预先分配调频功率”的方式得到的FFS等效参数有一定的保守性。

3) 释放能量折算法

释放能量折算法将场站在调频过程中为系统提供的能量折算为等效调频参数^[99-101],以量化其频率支撑贡献。文献[99]给出了双馈风电机组等效惯性时间常数的评估方法,将风电机组等效惯性时间常数表示为一个关于叶轮惯量、风电机组初始运行点以及转子转速变化的函数,进一步将等效惯性时间常数表示为关于风速的分段线性函数。文献[100-104]计算了风电机组的可释放转子动能,并将其转换为在FFS过程中的等效惯量系数。

场站在调频中释放的能量可表示如下:

$$\Delta E_{\text{RE}} = \int_{t=0}^{T_{\text{FR}}} \Delta P_{\text{RE}}(t) dt \quad (8)$$

对于风电场,调频释放能量 ΔE_{WF} 包含风能捕获能量以及叶轮轴系动能两部分,如式(9)所示。

$$\Delta E_{\text{WF}} = \sum_i \left(\underbrace{\int_{t=0}^{T_{\text{FR}}} \Delta P_{M,i}(t) dt}_{\text{风能捕获能量变化}} - \underbrace{\frac{1}{2} J_{\text{WT},i} \Delta \omega_{\text{WT},i}^2}_{\text{叶轮能量变化}} \right) \quad (9)$$

式中: $\Delta P_{M,i}$ 为风电机组 i 捕获的风功率与FFS初始状态捕获风功率的差值; $\Delta \omega_{\text{WT},i}$ 为风电机组 i 转速的变化量。

将支撑能量 ΔE_{RE} 分解为固定功率增量、下垂响应以及惯性响应释放能量3个部分,基于释放能量折算法的等效参数计算方法如下:

$$\begin{cases} \Delta P_{\text{eq}} = \frac{\gamma_P \Delta E_{\text{RE}}}{T_{\text{FR}}} \\ K_{\text{eq}} = \frac{\gamma_K \Delta E_{\text{RE}}}{-\int_{t=0}^{T_{\text{FR}}} \Delta f(t) dt} \\ H_{\text{eq}} = \frac{\gamma_H \Delta E_{\text{RE}}}{-2\Delta f(T_{\text{FR}})} \end{cases} \quad (10)$$

4) 参数辨识法

参数辨识法根据大扰动下的仿真或实测数据,采用系统辨识方法对等效参数进行辨识计算,目前的研究热点是场站等效惯量参数辨识。文献[105]基于风电场FFS中实测的功率-频率曲线,使用最小二乘法对风电调频传递函数中的参数进行辨识,得到风电场的等效惯量系数。风电场实际量测值存在噪声,会影响辨识精度。针对这一问题,文献[106]利用扩展卡尔曼滤波方法对风电调频参数进行辨

识,通过估计随机噪声的统计特征来提高辨识精度。文献[107]分析了风电机组在惯性响应中自身动能和输出动能的转换关系,提出了利用风电场并网PCC有功功率-频率实测曲线进行计算的风电场惯量评估方法。辨识方法的分析说明详见文献[108-109]。辨识结果多解以及缺乏可解释性是制约其应用的主要因素。

3.2.2 可执行域

可执行域计算的关键在于功率/参数边界的求解,力图找到在满足电气、机械、安全稳定等各类约束条件下,场站调频附加功率或控制参数的取值边界^[110]。文献[110]计算了风电机组FFS过程中附加转矩极限值,将其作为评估FFSC的指标。然而,转矩控制一般在单机侧实现,且多机的附加转矩不能线性叠加,故转矩难以作为场站层面的评价指标。

从附加功率和等效下垂响应的角度,场站FFS可执行域的评估指标为可持续支撑功率极限 ΔP_{lim} 和最大等效有功功率-频率下垂系数 K_{lim} 。 ΔP_{lim} 为在各类电气量、机械量约束条件下,场站能够在FFS响应时间(T_{FR})内持续增发的理论最大功率,代表了场站在FFS中持续增发功率的极限值; K_{lim} 为场站能够在 T_{FR} 时间内持续提供的有功功率-频率下垂系数极限值。

以风电场站为例,考虑风电机组最低转速限制、变流器容量限制,并假定FFS过程中风电机组桨距角以恒定变化速率减小为设定值。此外,考虑过度释放转子动能将导致支撑结束后回撤功率 ΔP_{tb} 对系统频率恢复的不利影响,应将回撤功率限制在一定范围内。 ΔP_{lim} 的求解可以表示为目标函数为式(11)、约束条件为式(12)的优化问题。

$$\Delta P_{lim} = \max \left\{ \sum_i \Delta P_{E,i} \right\} \quad (11)$$

$$\text{s.t.} \begin{cases} \beta_i = \max \{ \beta_{0,i} - \lambda_i t, \beta_{set,i} \} \\ J_i \frac{d\omega_i}{dt} \omega_i = P_{M,i}(\omega_i, \beta_i, v_i) - P_{E0,i} - \Delta P_{E,i} \\ \omega_i(T_{FR}) \geq \omega_{set,i} \\ P_{E0,i} + \Delta P_{E,i} \leq P_{E,max,i} \\ \Delta P_{tb}(T_{FR}) \leq \Delta P_{tb,set} \end{cases} \quad (12)$$

式中: β_i 、 J_i 、 ω_i 、 v_i 分别为风电机组 i 的桨距角、转动惯量、转速、风速; $\beta_{0,i}$ 、 $\beta_{set,i}$ 和 λ_i 分别为风电机组 i 的初始、最终桨距角和桨距角最大变化速率; $\omega_{set,i}$ 和 $P_{E,max,i}$ 分别为风电机组 i 在FFS过程中的最低转速和最大功率限制; $P_{M,i}$ 、 $\Delta P_{E,i}$ 和 $P_{E0,i}$ 分别为叶轮捕获的机械功率、FFS过程中风电机组的增发电磁功率

和风电机组初始电磁功率; $\Delta P_{tb,set}$ 为场站FFS结束后回撤功率 ΔP_{tb} 的最大限制。

上述 ΔP_{lim} 的求解只需要获知场站本身的状态信息,本质上是得到场站在一定时间内的可增发极限功率,与系统频率变化无关。而最大等效下垂系数 K_{lim} 涉及系统频率的计算,还需要获知场站外部的频率响应特性。文献[111]提供了一种计算 K_{lim} 的方法,假设风电场整体采用下垂控制方法,将对风电场FFSC的评估表示为对其极限下垂斜率的计算。其评估优化模型的目标函数为风电场的综合下垂斜率,以风电机组风速、系统频率响应方程、风电机械-电气特性等作为约束条件。考虑到优化模型变量维度高且需要进行动态过程的模拟,文献[111]采用Koopman状态空间映射模型,通过对历史数据的训练构建风速与系统极限下垂斜率的函数关系,提升了评估的计算效率。

现有研究的不足主要有3个方面:

1)场站调频模型的线性化假设。现有研究中对等效参数的求取多基于线性化的有功功率-频率控制模型,而FFS过程中风光资源状态和发电单元运行点会偏离初始值。因此,线性化的频率响应模型不够准确。

2)忽略了发电单元控制模式的多样性。风光发电单元的调频控制策略会随风光资源条件的变化而动态调整,这使得场站内部各发电单元调频控制策略不一。而现有研究没有充分融合多机的多种控制策略,往往假设场站内所有发电单元都采用同类型的控制方式。

3)忽略了评估指标的时变性。场站等效频率响应参数和可执行域都是随着风光资源条件和调频控制模式而时变的。因此,刻画各类评估指标的可信值是实现场站调频资源可调可控的关键。

3.3 支撑效果维度

支撑效果维度包含调频效果和支撑能量/功率两类评估指标。其中,调频效果用于描述场站参与频率支撑对系统暂态频率响应过程的改善程度;支撑能量/功率用于量化场站在调频过程中的贡献度和响应性能。

3.3.1 调频效果

场站FFS效果最直接体现在系统出现严重有功功率不平衡后,场站快速功率调节对系统频率响应特性的改善效果。基于调频效果的FFSC评估方法假定系统中出现某预想频率事故,通过仿真分析或理论计算得到新能源场站参与FFS对系统频率响应特性关键指标的改善程度。

调频效果评估指标体系包括RoCoF、最大频率

偏差、稳态频率偏差 Δf_{ss} 、频率偏差积分(integral of frequency deviation, IFD) I_{FD} 。其中, IFD 的计算准则可表述为式(13), 表示从 T_1 至 T_2 时段内系统频率偏离额定值的累积量。

$$I_{FD} = \int_{t=T_1}^{T_2} |\Delta f(t)| dt \quad (13)$$

特别地, 若风电场站利用转子动能参与 FFS, 在支撑后的转速恢复阶段会从电网吸收功率, 可能会造成系统频率的二次跌落。因此, 将最大频率偏差指标分为一/二次跌落的最大频率偏差 2 个指标, 分别表示为 $\Delta f_{nadir, 1}$ 和 $\Delta f_{nadir, 2}$ 。

调频效果评估指标一般通过离线仿真得到, 需要获知系统频率响应模型, 并在预想事故下分析新能源场站参与调频对系统频率响应的改善程度^[112]。基于调频效果分析的场站调频能力评估可通过多场景仿真分析场站调频控制各个环节对调频效果的影响, 作为场站调频控制策略设计的依据^[113-115]。

文献[56-57]对比分析新能源场站参与调频以及不参与调频两种情况下的系统频率响应特性, 表明新能源场站参与 FFS 可以改善系统的频率响应特性, 指出场站资源条件、发电单元初始运行点、降载功率以及风电机组的旋转动能对新能源场站 FFSC 产生显著影响。文献[58]采用统计方法分析风电场参与调频对 RoCoF、频率最低点等系统频率响应特性的影响, 表明新能源场站具有较大的调频潜力。文献[59]探讨了风电场降载功率对其 FFS 效果的改善程度。文献[116]对系统频率响应中的频率最低点进行近似建模, 并分析风电场虚拟惯量以及虚拟下垂对系统频率最低点以及 RoCoF 的影响。文献[117]通过仿真分析建立了从风速、转子动能等状态变量到系统频率响应最低点、RoCoF 的映射关系, 分析了不同风电渗透率系统中风电场站参与 FFS 对系统整体频率响应特性的影响。文献[118]通过控制变量法分析了新能源渗透率、调频控制参数、备用功率以及直流母线电容容量等因素对调频控制效果的影响。

3.3.2 支撑能量/功率

支撑能量维度表征场站参与 FFS 对系统的能量贡献, 可以通过求解在频率支撑时段内场站功率变化量的积分得到, 如式(8)所示。

支撑功率指标分为调频贡献功率、响应性能和功率回撤指标 3 类。调频贡献功率为场站在 FFS 过程中的功率变化量 ΔP_{RE} ; 响应性能指标主要分为滞后时间 $t_{0,1}$ 、响应时间 $t_{0,9}$ 、调节时间 t_s 和调节精度 A_c ; 功率回撤指标分为回撤功率 ΔP_{tb} 和恢复时间 t_{re} 。

滞后时间 $t_{0,1}$ 为从场站频率越过死区直到场站有功发电可靠地向支撑方向调节所需的时间, 通常选取调节幅度达到 10% 目标值的时刻; 响应时间 $t_{0,9}$ 为场站有功功率调节到目标调节功率 90% 的时间; 调节时间 t_s 为有功功率调节达到稳定, 且实际值与目标值差的绝对值不超过目标调节量 5% 的最短时刻; 调节精度 A_c 为功率调节趋于稳定后, 实际功率调整量与目标值的偏差^[119]; 回撤功率 ΔP_{tb} 、恢复时间 t_{re} 分别为利用转子动能提供 FFS 的风电场在 FFS 后的状态恢复过程中, 需要向电网吸收的功率和恢复时间。各类指标的含义如图 7 所示。

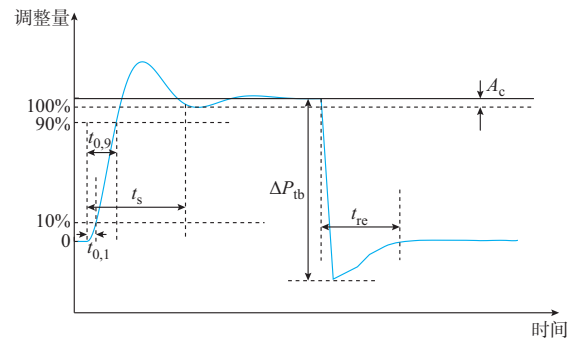


图 7 功率响应性能指标示意图
Fig. 7 Schematic diagram of power response performance indices

支撑功率响应性能类指标一般应用于场站调频响应能力测试^[119-120], 测试中的模拟扰动一般为输入假想阶跃频率信号或设置阶跃功率调节指令, 此类指标用于量化评估场站的 FFS 功能。

现有场站调频效果分析存在以下不足: 1) 缺乏对影响因素的量化关联分析, 未能量化解析不同风光资源和电网条件下场站调频控制方式、降载备用功率与其调频效果的关联关系; 2) 场站调频资源与电网的交互不足, 如何协调新能源场站与其他多类型调频资源以满足系统暂态频率支撑需求是尚未得到充分解决的关键问题。

4 未来技术展望

针对现有场站 FFSC 评估存在的不足, 本文从评估基础和评估应用两方面提出研究方向和解决思路框架。

在评估基础方面, 场站内部实时风/光资源条件是 FFSC 评估模型的重要输入数据, 分散受控单元频率响应聚合特性是各类 FFSC 评估的前提条件。需要进一步研究的方向包括风光资源微观分布的滚动评估和融合多种控制策略的场站频率响应特性聚合。

在评估应用方面, 计算场站调频能力的可行域、

协调场站与系统中其他类型调频资源是实现场站与调度系统可信交互的关键,需要深化研究的方向包括场站可执行调频指令边界的计算与优化提升,以及考虑场站调频能力的场-网调频资源协调优化。

4.1 场站内部风光资源微观分布的分钟级实时滚动评估

场站内部各发电单元的实时风/光资源条件是评估场站 FFSC 的重要输入数据。目前的场站风/光资源实时评估模型的时空精细度不能满足场站 FFSC 评估对资源数据的要求,主要存在以下问题:1)风电场的测风塔、机舱测风仪和光伏电站环境监测仪等资源监测装置仅能反映局部气象信息,不能实时准确提供各发电单元的真实资源条件;2)现有场站资源实时评估系统多面向运行态,预测评估的时间分辨率一般为 15 min。然而,单机资源条件在 1 min 时间尺度内已出现较为明显的变化,场站有功功率调节能力也随之发生显著变化。因此,有必要以分钟级实时更新场站 FFSC 的评估结果。为实现场站 FFSC 评估结果的分钟级更新,需要单机风光资源分钟级滚动评估作为数据基础。

本文提出基于数据融合混合实测-推演的新能源场站内部微观资源特性及变化趋势滚动评估框架,整体思路如图 8 所示。

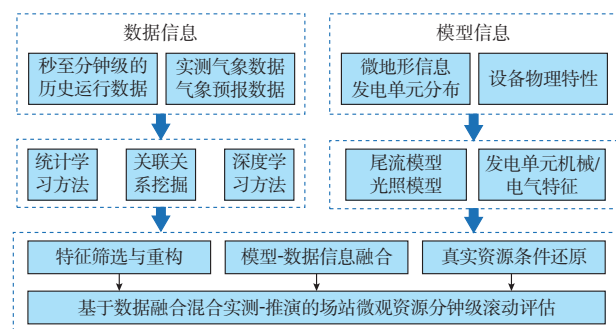


图 8 微观资源的滚动评估研究思路
Fig. 8 Research approach to rolling evaluation for micro-resources

首先,将场站的历史气象数据、场内实测风光资源数据以及数值天气预报等多时空分辨率的多源数据进行同一时空标尺融合,生成用于资源分析的数据集。根据发电单元空间分布情况以及场站局域地形信息,对场站内部微地形进行建模。根据历史数据分析发电单元资源条件和物理、电气特性与发电功率的耦合关系。然后,采用统计机器学习、深度学习等算法构建多源数据之间的关联关系,分析站内机组之间资源条件的时空耦合特性以及机组机械特征与电气特征的耦合特性。根据发电单元运行状态与场站内部测风塔、测风仪、测光装置的实测数据,

对场站内部真实资源条件分布进行还原。最后,结合风电场尾流模型和光照模型,利用场站实时监控数据,采用数据驱动方法构建场站微观资源特性趋势评估模型,逐分钟评估场站内部各发电单元的实时风光资源及变化趋势。

4.2 融合多种控制策略的场站频率响应聚合

获知新能源场站频率响应聚合特性是计算场站频率响应等效参数和分析新型电力系统频率动态响应特性的基础。在单机自主响应模式下,发电单元在 FFS 过程中根据所量测的频率信息,结合自身资源条件和运行状态,自适应选择调频控制策略和控制参数。由于场站内部各发电单元资源条件、运行点和频率动态特性不一,各调频电源的控制模式存在差异,难以通过简单的控制参数线性叠加方法得到聚合响应结果。

本文构建了新能源场站频率响应特性等效聚合特性分析框架,其思路包含分群聚类 and 聚合等效两部分,如图 9 所示。

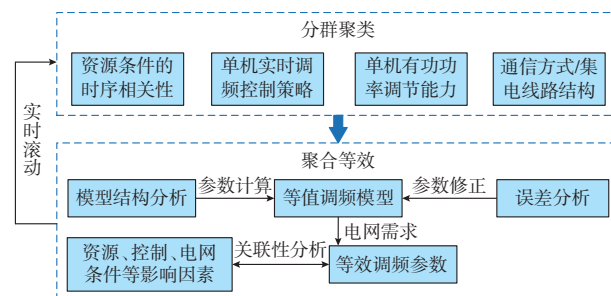


图 9 频率响应特性聚合研究思路
Fig. 9 Research approach to frequency response characteristic aggregation

在分群聚类方面,首先,利用特征筛选方法分析暂态频率支撑过程中影响新能源发电单元有功功率调节特性的关键特征,将其作为分群聚类的主要标准。然后,考虑各类主要特征的时序变化,采用时序聚类算法对发电单元进行聚类,聚类结果可以随场内资源和机组运行点的变化进行实时调整。

在聚合等效方面,首先,分别对每组等值单机的调频特性进行建模,并通过局部线性化方法计算等效模型的参数;然后,分析不同资源条件和运行点下暂态频率响应过程中线性化调频模型的误差,采用数据驱动的方法对模型参数进行修正;最后,结合电网的需要,将场站频率响应模型转换为合适的等值参数,并分析风光资源条件、运行点设定、控制策略和电网条件等因素对等值参数的影响。

4.3 场站可执行调频指令边界计算与优化提升

在场站集中控制模式下,场站在 FFS 过程中根据并网点频率变化特性,结合单机运行监控信息,将

功率调整量下发给每台发电单元。获知场站的可调功率边界,并将功率调整量合理下发给场站内部各台机组是关键问题。此外,稳态运行点的分配决定了发电单元的初始状态,对FFS过程中的单机可调功率边界有较大影响。在场站端,可以通过运行点实时优化分配,提升场站可调功率极限。

本文构建了时变资源条件下新能源场站可执行调频指令边界计算与优化的研究框架,如图10所示。

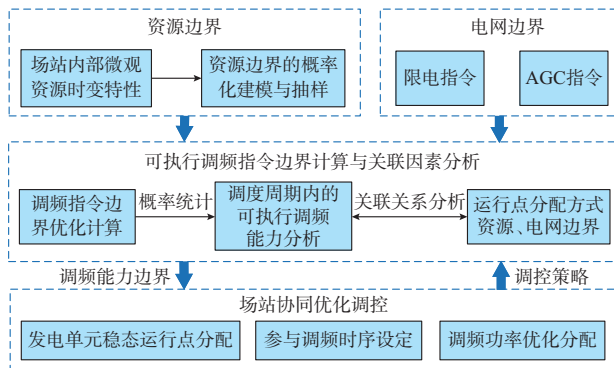


图10 可执行调频指令边界计算研究思路
Fig. 10 Research approach to calculating executable boundary of frequency regulation instructions

首先,结合新能源场站历史运行数据,构建场站功率与场内微观资源特性的映射关系,分析调度周期内场站内部微观资源的时变特性,对资源边界进行概率化建模与典型场景抽样。然后,分析不同资源条件下发电单元运行点、控制模式对其有功功率调节能力的影响。结合调度周期内的资源边界场景集以及自动发电控制(AGC)指令边界,考虑变流器容量、风电机组转速限制和机械载荷等因素的制约,建立最大化场站可执行暂态频率支撑能力的优化模型,通过优化模型的求解对场站内机组的稳态运行点以及调频控制策略进行协同设定。最后,综合场站可信调频能力以及运行点实时调节代价,采用模型预测控制、强化学习等决策方法,根据实时资源条件变化实现单机运行点设定以及调频容量分配的滚动更新。

4.4 考虑场站调频能力的场-网调频资源协调优化

将新能源场站调频能力纳入系统调频体系,是实现新型电力系统调频资源优化调控的新需求。然而,新能源场站调频能力呈现出与资源条件、控制特性等因素相关的时变特性。为使新能源场站调频资源为调度所用,将场站调频能力以合适的方式嵌入电力系统调频资源调度体系是一个关键问题。

本文构建了考虑新能源场站频率支撑能力的场-网协调优化调控研究框架,如图11所示。

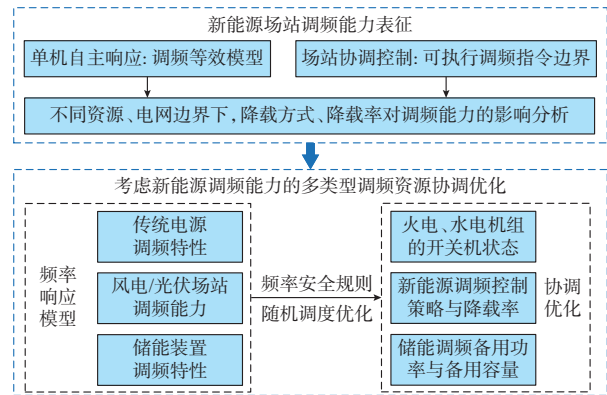


图11 考虑FFSC的调频资源协调优化研究思路
Fig. 11 Research approach to coordinative optimization of frequency regulation resources considering FFSC

首先,对于单机自主响应和场站协调控制两种场站调频模式,量化分析不同资源、电网条件下牺牲经济性的主动降载对新能源场站FFSC的影响,得到降载备用功率与场站FFSC之间的映射模型。建立场站调频聚合模型参数与新能源理论功率、实际功率等运行状态的关联关系,并对该关联关系进行逼近与化简,以便于嵌入后续的协调优化模型。然后,分析火电、水电、新能源以及储能等多类型调频资源的暂态频率响应特性,并构建统一化的系统频率响应模型。将新能源调频能力与控制策略、资源状态、降载率的关联关系,以及储能设备调频能力与其运行状态、荷电状态的关联关系嵌入系统频率响应模型中。通过数值仿真或理论推导,得到系统频率安全的规则,并采用凸松弛、线性化逼近等方法将系统频率安全规则转换为对系统频率响应参数的约束。最后,考虑新能源出力不确定性对FFSC的影响,构建包含机组组合、新能源主动弃电以及储能参与电力电量平衡的电力系统调度模型。在系统调度模型中进一步嵌入频率安全约束,以保障系统有充足的调频资源。通过求解优化模型,实现新能源场站与其他调频电源的协调配合,并能够根据系统对调频资源的需要为场站设置合适的降载功率,在保障系统频率安全的同时,提升运行经济性。

5 结语

未来的新能源高占比电力系统中,新能源场站将成为重要的调频电源,量化评估新能源场站FFSC是实现场站调频资源与电网交互的首要问题。场站FFSC存在功率特性、能量储备、控制效果等多重属性,包含风光资源、单机控制、机-场交互、场网协调等多个环节。现有研究往往局限于所关注的特定场景和环节,缺乏对场站FFSC评估指标和

评估方法的系统性梳理。

本文基于新能源场站 FFS 特性,给出了场站 FFSC 的定义。从频率支撑过程中“频率-功率-能量”的角度,梳理了场站 FFSC 的“状态属性-控制特性-支撑效果”三维量化评估指标体系,辨析三维指标之间的关联关系并分析其全环节影响因素。进一步,综述了国内外对上述各类评估指标的计算方法研究进展,辨析了当前研究中的不足之处。最后,从评估基础和评估应用两方面对未来相关技术发展方向进行了展望。本文提出了场站内部风光资源微观分布的分钟级实时滚动评估,融合多种控制策略的场站频率响应聚合,场站可执行调频指令边界计算与优化提升,以及考虑场站调频能力的场-网调频资源协调优化这 4 个值得进一步探索的问题,并分别给出了对应的研究框架,以期后续研究提供参考。

参考文献

- [1] 胡博,谢开贵,邵常政,等.双碳目标下新型电力系统风险评述:特征、指标及评估方法[J].电力系统自动化,2023,47(5):1-15.
HU Bo, XIE Kaigui, SHAO Changzheng, et al. Commentary on risk of new power system under goals of carbon emission peak and carbon neutrality: characteristics, indices and assessment methods[J]. Automation of Electric Power Systems, 2023, 47(5): 1-15.
- [2] 鲁宗相,李昊,乔颖.从灵活性平衡视角的高比例可再生能源电力系统形态演化分析[J].全球能源互联网,2021,4(1):12-18.
LU Zongxiang, LI Hao, QIAO Ying. Morphological evolution of power systems with high share of renewable energy generations from the perspective of flexibility balance[J]. Journal of Global Energy Interconnection, 2021, 4(1): 12-18.
- [3] 卓振宇,张宁,康重庆,等.面向双碳目标的电力系统规划方案量化归因分析方法[J].电力系统自动化,2023,47(2):1-14.
ZHUO Zhenyu, ZHANG Ning, KANG Chongqing, et al. Quantitative attribution analysis method of power system planning scheme for carbon emission peak and carbon neutrality goals[J]. Automation of Electric Power Systems, 2023, 47(2): 1-14.
- [4] 辛保安,单葆国,李琼慧,等.“双碳”目标下“能源三要素”再思考[J].中国电机工程学报,2022,42(9):3117-3126.
XIN Baoan, SHAN Baoguo, LI Qionghui, et al. Rethinking of the “three elements of energy” toward carbon peak and carbon neutrality[J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(9): 3117-3126.
- [5] 鲁宗相,李海波,乔颖.高比例可再生能源并网的电力系统灵活性评价与平衡机理[J].中国电机工程学报,2017,37(1):9-20.
LU Zongxiang, LI Haibo, QIAO Ying. Flexibility evaluation and supply/demand balance principle of power system with high-penetration renewable electricity[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(1): 9-20.
- [6] 鲁宗相,林弋莎,乔颖,等.极高比例可再生能源电力系统的灵活性供需平衡[J].电力系统自动化,2022,46(16):3-16.
LU Zongxiang, LIN Yisha, QIAO Ying, et al. Flexibility supply-demand balance in power system with ultra-high proportion of renewable energy[J]. Automation of Electric Power Systems, 2022, 46(16): 3-16.
- [7] 2022年全国电力工业统计数据[EB/OL].[2023-04-08].http://www.nea.gov.cn/2023-01/18/c_1310691509.htm.
National electric power industry statistics in 2022 [EB/OL]. [2023-04-08]. http://www. nea. gov. cn/2023-01/18/c_1310691509.htm.
- [8] 卓振宇,张宁,谢小荣,等.高比例可再生能源电力系统关键技术及发展挑战[J].电力系统自动化,2021,45(9):171-191.
ZHUO Zhenyu, ZHANG Ning, XIE Xiaorong, et al. Key technologies and developing challenges of power system with high proportion of renewable energy[J]. Automation of Electric Power Systems, 2021, 45(9): 171-191.
- [9] KNAP V, CHAUDHARY S K, STROE D I, et al. Sizing of an energy storage system for grid inertial response and primary frequency reserve[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2016, 31(5): 3447-3456.
- [10] 丁立,乔颖,鲁宗相,等.高比例风电对电力系统调频指标影响的定量分析[J].电力系统自动化,2014,38(14):1-8.
DING Li, QIAO Ying, LU Zongxiang, et al. Impact on frequency regulation of power system from wind power with high penetration [J]. Automation of Electric Power Systems, 2014, 38(14): 1-8.
- [11] FERNÁNDEZ-GUILLAMÓN A, GÓMEZ-LÁZARO E, MULJADI E, et al. Power systems with high renewable energy sources: a review of inertia and frequency control strategies over time [J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2019, 115: 109369.
- [12] 孙华东,王宝财,李文锋,等.高比例电力电子电力系统频率响应的惯量体系研究[J].中国电机工程学报,2020,40(16):5179-5192.
SUN Huadong, WANG Baocai, LI Wenfeng, et al. Research on inertia system of frequency response for power system with high penetration electronics [J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(16): 5179-5192.
- [13] 叶林,王凯丰,赖业宁,等.低惯量下电力系统频率特性分析及电池储能调频控制策略综述[J].电网技术,2023,47(2):446-464.
YE Lin, WANG Kaifeng, LAI Yening, et al. Review of frequency characteristics analysis and battery energy storage frequency regulation control strategies in power system under low inertia level[J]. Power System Technology, 2023, 47(2): 446-464.
- [14] MARARAKANYE N, BEKKER B. Renewable energy integration impacts within the context of generator type, penetration level and grid characteristics [J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2019, 108: 441-451.
- [15] Preliminary report: black system event in South Australia on 28 September, 2016 [EB/OL]. [2023-06-05]. https://apo.org.au/node/68095.
- [16] AL MASOOD N, YAN R F, KUMAR SAHA T. Cascading contingencies in a renewable dominated power system: risk of blackouts and its mitigation [C]// IEEE Power & Energy Society General Meeting (PESGM), August 5-10, 2018,

- Portland, USA.
- [17] 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 South Australia and its enlightenment to China[J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(13): 1-6.
- [18] 王宝财, 孙华东, 李文锋, 等. 考虑动态频率约束的电力系统最小惯量评估[J]. 中国电机工程学报, 2022, 42(1): 114-127.
WANG Baocai, SUN Huadong, LI Wenfeng, et al. Minimum inertia estimation of power system considering dynamic frequency constraints[J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(1): 114-127.
- [19] 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.
- [20] 李兆伟, 吴雪莲, 庄侃沁, 等. “9·19”锦苏直流双极闭锁事故华东电网频率特性分析及思考[J]. 电力系统自动化, 2017, 41(7): 149-155.
LI Zhaowei, WU Xuelian, ZHUANG Kanqin, et al. Analysis and reflection on frequency characteristics of East China grid after bipolar locking of “9·19” Jinping-Sunan DC transmission line[J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(7): 149-155.
- [21] GEVORGIAN V, ZHANG Y C, ELA E. Investigating the impacts of wind generation participation in interconnection frequency response [J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2015, 6(3): 1004-1012.
- [22] 鲁宗相, 叶一达, 郭莉, 等. 电力电子化电力系统的调频挑战与多层次协调控制框架[J]. 中国电力, 2019, 52(4): 8-17.
LU Zongxiang, YE Yida, GUO Li, et al. Frequency regulation challenge of power electronics dominated power systems and its new multi-level coordinated control framework [J]. Electric Power, 2019, 52(4): 8-17.
- [23] VEERS P, DYKES K, LANTZ E, et al. Grand challenges in the science of wind energy [J]. Science, 2019, 366(6464): eaau2027.
- [24] 辛保安, 李明节, 贺静波, 等. 新型电力系统安全防御体系探究[J]. 中国电机工程学报, 2023, 43(15): 5723-5732.
XIN Baoan, LI Mingjie, HE Jingbo, et al. Research on security defense system of new power system [J]. Proceedings of the CSEE, 2023, 43(15): 5723-5732.
- [25] 汪梦军, 郭剑波, 马士聪, 等. 新能源电力系统暂态频率稳定分析与调频控制方法综述[J]. 中国电机工程学报, 2023, 43(5): 1672-1694.
WANG Mengjun, GUO Jianbo, MA Shicong, et al. Review of transient frequency stability analysis and frequency regulation control methods for renewable power systems[J]. Proceedings of the CSEE, 2023, 43(5): 1672-1694.
- [26] 鲁宗相, 汤海雁, 乔颖, 等. 电力电子接口对电力系统频率控制的影响综述[J]. 中国电力, 2018, 51(1): 51-58.
LU Zongxiang, TANG Haiyan, QIAO Ying, et al. The impact of power electronics interfaces on power system frequency control: a review[J]. Electric Power, 2018, 51(1): 51-58.
- [27] 张子扬, 张宁, 杜尔顺, 等. 双高电力系统频率安全问题评述及其应对措施[J]. 中国电机工程学报, 2022, 42(1): 1-25.
ZHANG Ziyang, ZHANG Ning, DU Ershun, et al. Review and countermeasures on frequency security issues of power systems with high shares of renewables and power electronics [J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(1): 1-25.
- [28] WU Z P, GAO W Z, GAO T Q, et al. State-of-the-art review on frequency response of wind power plants in power systems [J]. Journal of Modern Power Systems and Clean Energy, 2018, 6(1): 1-16.
- [29] YE Y D, QIAO Y, LU Z X. Revolution of frequency regulation in the converter-dominated power system [J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2019, 111: 145-156.
- [30] ATTYA A B, DOMINGUEZ-GARCIA J L, ANAYALARA 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.
- [31] DÍAZ-GONZÁLEZ 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 and Sustainable Energy Reviews, 2014, 34: 551-564.
- [32] MOHSENI M, ISLAM S M. Review of international grid codes for wind power integration: diversity, technology and a case for global standard [J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2012, 16(6): 3876-3890.
- [33] TSILI M, PAPATHANASSIOU S. A review of grid code technical requirements for wind farms [J]. IET Renewable Power Generation, 2009, 3(3): 308.
- [34] WU Y K, CHANG S M, MANDAL P. Grid-connected wind power plants: a survey on the integration requirements in modern grid codes [J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2019, 55(6): 5584-5593.
- [35] Grid connection code for renewable power plants connected to the electricity transmission system or the distribution system in South Africa [EB/OL]. [2023-01-27]. <https://www.nersa.org.za/wp-content/uploads/bsk-pdf-manager/2022/01/SAGC-Requirements-for-Renewable-Power-Plants-Rev-3.1.pdf>.
- [36] Technical requirements for the connection of generating stations to the hydro-Québec transmission system [EB/OL]. [2023-01-15]. https://www.hydroquebec.com/data/transenergie/pdf/2_Requirements_generating_stations_D-2018-145_2018-11-15.pdf.
- [37] 风电场接入电力系统技术规定 第1部分: 陆上风电: GB/T 19963.1—2021[S]. 北京: 中国标准出版社, 2021.
Technical specification for connecting wind farm to power system: Part 1 on shore wind power: GB/T 19963.1—2021 [S]. Beijing: Standards Press of China, 2021.
- [38] 黄艳蓓. 华东电网频率特性验证和新能源主动支撑能力试验完成[N]. 国家电网报, 2021-10-13(2).
HUANG Yanbei. Completion of frequency characteristic verification and new energy active support capability test of East China Power Grid [N]. State Grid News, 2021-10-13(2).

- [39] 王志磊,张新燕,杨涵棣,等.光伏电站一次调频控制策略研究[J].电网与清洁能源,2023,39(11):120-128.
WANG Zhilei, ZHANG Xinyan, YANG Handi, et al. Research on the primary frequency regulation control strategy of photovoltaic power plants [J]. Power System and Clean Energy, 2023, 39(11): 120-128.
- [40] 胡正阳,高丙团,张磊,等.风电机组双向支撑能力分析与自适应惯量控制策略[J].电工技术学报,2023,38(19):5224-5240.
HU Zhengyang, GAO Bingtuan, ZHANG Lei, et al. Bidirectional support capability analysis and adaptive inertial control strategy of wind turbine [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2023, 38(19): 5224-5240.
- [41] LYU X, JIA Y W, DONG Z Y. Adaptive frequency responsive control for wind farm considering wake interaction [J]. Journal of Modern Power Systems and Clean Energy, 2021, 9(5): 1066-1075.
- [42] 陈亦平,卓映君,刘映尚,等.高比例可再生能源电力系统的快速频率响应市场发展与建议[J].电力系统自动化,2021,45(10):174-183.
CHEN Yiping, ZHUO Yingjun, LIU Yingshang, et al. Development and recommendation of fast frequency response market for power system with high proportion of renewable energy [J]. Automation of Electric Power Systems, 2021, 45(10): 174-183.
- [43] Fast frequency response in the NEM[EB/OL]. [2023-08-21]. https://www.aemo.com.au/-/media/files/electricity/nem/security_and_reliability/reports/2017/ffr-working-paper.pdf.
- [44] RAHMANN C, CASTILLO A. Fast frequency response capability of photovoltaic power plants: the necessity of new grid requirements and definitions[J]. Energies, 2014, 7(10): 6306-6322.
- [45] MENG L X, ZAFAR J, KHADEM S K, et al. Fast frequency response from energy storage systems—a review of grid standards, projects and technical issues [J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2020, 11(2): 1566-1581.
- [46] 孙晓强,高敏,刘鑫,等.风电场参与西北送端大电网频率调节的快速频率响应能力实测与分析[J].南方电网技术,2018,12(1):48-54.
SUN Xiaoliang, GAO Min, LIU Xin, et al. Measurement and analysis of fast frequency response capability of wind farms participating in frequency regulation of northwest sending-end large power grid [J]. Southern Power System Technology, 2018, 12(1): 48-54.
- [47] 董希建,罗剑波,崔晓丹,等.安全稳定控制系统全程控制时间及其构成[J].电力系统自动化,2018,42(5):163-168.
DONG Xijian, LUO Jianbo, CUI Xiaodan, et al. Whole control time and its constitution of security and stability control system [J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(5): 163-168.
- [48] 闵勇,陈磊,刘瑞阔,等.电力系统频率动态中惯量与惯量响应特性辨析[J].中国电机工程学报,2023,43(3):855-868.
MIN Yong, CHEN Lei, LIU Ruiquo, et al. Analysis on characteristics of inertia and inertial response in power system frequency dynamics [J]. Proceedings of the CSEE, 2023, 43(3): 855-868.
- [49] 柯贤波,郝朝辉,霍超,等.西北电网风电与光伏紧急功率控制系统设计[J].电力工程技术,2021,40(2):39-45.
KE Xianbo, QIE Zhaohui, HUO Chao, et al. Design of a wind power and photovoltaic emergency power control system for Northwest China Grid [J]. Electric Power Engineering Technology, 2021, 40(2): 39-45.
- [50] 唐坚,唐庆宏,姚禹歌,等.风电调频能力的潜力分析[J].动力工程学报,2022,42(11):1138-1145.
TANG Jian, TANG Qinghong, YAO Yuge, et al. Potential analysis of frequency regulation ability of wind power in the view of energy [J]. Journal of Chinese Society of Power Engineering, 2022, 42(11): 1138-1145.
- [51] RAWN B G, GIBESCU M, KLING W L. Kinetic energy from distributed wind farms: technical potential and implications [C]// IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies Conference Europe (ISGT Europe), October 11-13, 2010, Gothenburg, Sweden.
- [52] YAN C, TANG Y, DAI J F, et al. Uncertainty modeling of wind power frequency regulation potential considering distributed characteristics of forecast errors [J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2021, 6(1): 22.
- [53] 戴剑丰.适应弱惯性大电网的风电场频率响应技术研究[D].南京:东南大学,2019.
DAI Jianfeng. Research on frequency response technology of wind farm for adapting to large power grid with weak inertial [D]. Nanjing: Southeast University, 2019.
- [54] 李世春,邓长虹,龙志君,等.风电场等效虚拟惯性时间常数计算[J].电力系统自动化,2016,40(7):22-29.
LI Shichun, DENG Changhong, LONG Zhijun, et al. Calculation of equivalent virtual inertial time constant of wind farm [J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(7): 22-29.
- [55] 黄俊凯,杨知方,余娟,等.面向频率稳定校核的风机快速频率响应低阶建模方法及其误差分析[J].中国电机工程学报,2022,42(18):6752-6766.
HUANG Junkai, YANG Zhifang, YU Juan, et al. Low-order modeling of wind turbine-based fast frequency response and its error analysis for frequency stability assessment [J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(18): 6752-6766.
- [56] SOTO C C, GRILO PAVANI A P, MORACO A G, et al. Analysis of wind farms frequency support [C]// IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies Conference-Latin America (ISGT Latin America), September 15-17, 2021, Lima, Peru.
- [57] WANG Y, DELILLE G, BAYEM H, et al. High wind power penetration in isolated power systems—assessment of wind inertial and primary frequency responses [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2013, 28(3): 2412-2420.
- [58] DOHERTY R, MULLANE A, NOLAN G, et al. An assessment of the impact of wind generation on system frequency control [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2010, 25(1): 452-460.
- [59] RAWN B G, GIBESCU M, KLING W L. A static analysis method to determine the availability of kinetic energy from wind turbines [C]// IEEE PES General Meeting, July 25-29,

- 2010, Minneapolis, USA.
- [60] 高丙团, 胡正阳, 王伟胜, 等. 新能源场站快速有功控制及频率支撑技术综述[J/OL]. 中国电机工程学报[2023-05-31]. <https://kns.cnki.net/kcms2/article/abstract?urlId=11.2107.TM.20230530.1551.003&uniplatform=NZKPT>. GAO Bingtuan, HU Zhengyang, WANG Weisheng, et al. Review on fast active power control and frequency support technologies of renewable energy stations[J/OL]. Proceedings of the CSEE[2023-05-31]. <https://kns.cnki.net/kcms2/article/abstract?urlId=11.2107.TM.20230530.1551.003&uniplatform=NZKPT>.
- [61] 石佳莹, 沈沉, 刘锋. 双馈风电机组动力学特性对电力系统小干扰稳定的影响分析[J]. 电力系统自动化, 2013, 37(18): 7-13. SHI Jiaying, SHEN Chen, LIU Feng. Analysis on impact of DFIG wind turbines dynamic characteristics on power system small signal stability [J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(18): 7-13.
- [62] 张进, 李少林, 王伟胜, 等. 双馈风电机组虚拟惯量控制量化分析与参数优化整定[J]. 电网技术, 2023, 47(4): 1369-1379. ZHANG Jin, LI Shaolin, WANG Weisheng, et al. Quantitative analysis and parameter optimization of virtual inertia control for doubly fed wind turbine [J]. Power System Technology, 2023, 47(4): 1369-1379.
- [63] 陈润泽, 吴文传, 孙宏斌, 等. 双馈风电机组惯量控制对系统小干扰稳定的影响[J]. 电力系统自动化, 2014, 38(23): 6-12. CHEN Runze, WU Wenchuan, SUN Hongbin, et al. Impact of inertia control of DFIG wind turbines on system small-signal stability [J]. Automation of Electric Power Systems, 2014, 38(23): 6-12.
- [64] 王宝财, 孙华东, 李文锋, 等. 考虑频率稳定的电力电子电源频率控制参数优化方法[J]. 电网技术, 2023, 47(5): 1751-1762. WANG Baocai, SUN Huadong, LI Wenfeng, et al. Frequency control parameter optimistic method of converter-interfaced generation considering frequency stability [J]. Power System Technology, 2023, 47(5): 1751-1762.
- [65] 刘永前, 邵振州, 王铮, 等. 基于分段支持向量机的风电机组理论功率计算研究[J]. 太阳能学报, 2019, 40(3): 673-680. LIU Yongqian, SHAO Zhenzhou, WANG Zheng, et al. Piecewise support vector machine model for theoretical wind-power calculation [J]. Acta Energetica Sinica, 2019, 40(3): 673-680.
- [66] 王铮, 刘纯, 冯双磊, 等. 基于非参数回归的风电场理论功率计算方法[J]. 电网技术, 2015, 39(8): 2148-2153. WANG Zheng, LIU Chun, FENG Shuanglei, et al. The wind farm theoretical power calculation method research based on non-parameter regression [J]. Power System Technology, 2015, 39(8): 2148-2153.
- [67] 郭海思, 何慧, 包大恩. 风电机组理论发电功率计算及对比优化[J]. 电力与能源, 2019, 40(3): 339-343. GUO Haisi, HE Hui, BAO Daen. Theoretical power calculation and comparative optimization of wind turbines [J]. Power & Energy, 2019, 40(3): 339-343.
- [68] 姜文玲, 冯双磊, 孙勇, 等. 基于机舱风速数据的风电场弃风电量计算方法研究[J]. 电网技术, 2014, 38(3): 647-652. JIANG Wenling, FENG Shuanglei, SUN Yong, et al. Study on energy loss calculation during wind power curtailment based on wind speed measured by turbine nacelle anemometers [J]. Power System Technology, 2014, 38(3): 647-652.
- [69] 乔颖, 孙荣富, 丁然, 等. 基于数据增强的分布式光伏电站群短期功率预测(一): 方法框架与数据增强[J]. 电网技术, 2021, 45(5): 1799-1808. QIAO Ying, SUN Rongfu, DING Ran, et al. Distributed photovoltaic station cluster gridding short-term power forecasting: part I methodology and data augmentation [J]. Power System Technology, 2021, 45(5): 1799-1808.
- [70] TANG X Y, ZHAO S M, FAN B, et al. Micro-scale wind resource assessment in complex terrain based on CFD coupled measurement from multiple masts [J]. Applied Energy, 2019, 238: 806-815.
- [71] LIO W H, LI A, MENG F Z. Real-time rotor effective wind speed estimation using Gaussian process regression and Kalman filtering [J]. Renewable Energy, 2021, 169: 670-686.
- [72] SOLTANI M N, KNUDSEN T, SVENSTRUP M, et al. Estimation of rotor effective wind speed: a comparison [J]. IEEE Transactions on Control Systems Technology, 2013, 21(4): 1155-1167.
- [73] JENA D, RAJENDRAN S. A review of estimation of effective wind speed based control of wind turbines [J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2015, 43: 1046-1062.
- [74] GÖÇMEN T, GIEBEL G. Estimation of turbulence intensity using rotor effective wind speed in Lillgrund and Horns Rev-I offshore wind farms [J]. Renewable Energy, 2016, 99: 524-532.
- [75] 张小奇, 张振宇, 孙骁强, 等. 基于机群划分方法的风电场理论发电功率计算研究[J]. 高电压技术, 2019, 45(1): 284-292. ZHANG Xiaoqi, ZHANG Zhenyu, SUN Xiaoqiang, et al. Research on theoretical power of wind farm based on wind turbine grouping method [J]. High Voltage Engineering, 2019, 45(1): 284-292.
- [76] 李延和, 杨立滨, 郝丽丽, 等. 基于改进样板机法的风光互补新能源电站容量配比优化[J]. 电力工程技术, 2022, 41(2): 224-233. LI Yanhe, YANG Libin, HAO Lili, et al. Capacity ratio optimization of wind-solar hybrid new energy power station based on improved model-generator method [J]. Electric Power Engineering Technology, 2022, 41(2): 224-233.
- [77] LIU K C, QU Y B, KIM H M, et al. Avoiding frequency second dip in power unreserved control during wind power rotational speed recovery [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2018, 33(3): 3097-3106.
- [78] 何延一, 孙领, 王晨光, 等. 避免频率二次跌落的风电场一次调频功率分配方法[J]. 电力系统保护与控制, 2022, 50(11): 12-20. HE Tingyi, SUN Ling, WANG Chenguang, et al. A method of primary frequency regulation power distribution in a wind farm to avoid secondary frequency drop [J]. Power System Protection and Control, 2022, 50(11): 12-20.
- [79] 张雯欣, 吴琛, 黄伟, 等. 考虑频率二次跌落的风电场系统频率特征评估及风电调频参数整定[J]. 电力系统自动化, 2022, 46(8): 11-19.

- ZHANG Wenxin, WU Chen, HUANG Wei, et al. Evaluation of system frequency characteristic and parameter setting of frequency regulation for wind power considering secondary frequency drop [J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2022, 46(8): 11-19.
- [80] 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 Xiaoqian, 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.
- [81] AHMADYAR A S, VERBIC G. Coordinated operation strategy of wind farms for frequency control by exploring wake interaction [J]. *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, 2017, 8(1): 230-238.
- [82] LI Y J, XU Z, MENG K. Optimal power sharing control of wind turbines [J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2017, 32(1): 824-825.
- [83] MA S K, GENG H, YANG G, et al. Clustering-based coordinated control of large-scale wind farm for power system frequency support [J]. *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, 2018, 9(4): 1555-1564.
- [84] ATTYA A B T, HARTKOPF T. Control and quantification of kinetic energy released by wind farms during power system frequency drops[J]. *IET Renewable Power Generation*, 2013, 7(3): 210-224.
- [85] HE X Q, GENG H, MU G. Modeling of wind turbine generators for power system stability studies: a review [J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2021, 143: 110865.
- [86] KIM D E, EL-SHARKAWI M A. Dynamic equivalent model of wind power plant using an aggregation technique [J]. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 2015, 30(4): 1639-1649.
- [87] ZOU J X, PENG C, YAN Y, et al. A survey of dynamic equivalent modeling for wind farm [J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2014, 40: 956-963.
- [88] FERNÁNDEZ L M, JURADO F, SAENZ J R. Aggregated dynamic model for wind farms with doubly fed induction generator wind turbines[J]. *Renewable Energy*, 2008, 33(1): 129-140.
- [89] 奥博宇,王方政,陈磊,等.风电机组变桨减载一次调频模型及聚合方法[J].*电网技术*,2023,47(4):1360-1369.
AO Boyu, WANG Fangzheng, CHEN Lei, et al. Primary frequency regulation model and aggregation of deloading wind turbine generators with pitch angle adjustment [J]. *Power System Technology*, 2023, 47(4): 1360-1369.
- [90] DAI J F, TANG Y, WANG Q, et al. Aggregation frequency response modeling for wind power plants with primary frequency regulation service[J]. *IEEE Access*, 2019, 7: 108561-108570.
- [91] DAI J F, TANG Y, WANG Y R. Aggregation frequency response modeling for wind farms with frequency support capabilities [C]// *IEEE Power & Energy Society General Meeting (PESGM)*, August 4-8, 2019, Atlanta, USA.
- [92] SHI Q X, LI F X, CUI H T. Analytical method to aggregate multi-machine SFR model with applications in power system dynamic studies [J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2018, 33(6): 6355-6367.
- [93] LI J, QIAO Y, LU Z, et al. Integrated frequency-constrained scheduling considering coordination of frequency regulation capabilities from multi-source converters [J/OL]. *Journal of Modern Power Systems and Clean Energy* [2023-05-25]. <https://ieeexplore.ieee.org/document/10136528>.
- [94] SHEN Y K, WU W C, WANG B, et al. Optimal allocation of virtual inertia and droop control for renewable energy in stochastic look-ahead power dispatch [J]. *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, 2023, 14(3): 1881-1894.
- [95] PRAKASH V, KUSHWAHA P, CHAND SHARMA K, et al. Frequency response support assessment from uncertain wind generation [J]. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 2022, 134: 107465.
- [96] YOO Y, JANG G, JUNG S. Stochastic assessment of frequency support from wind power plants for power system with high wind penetration using correlation between wind farms [J]. *IET Renewable Power Generation*, 2022, 16(11): 2372-2383.
- [97] YUAN Y P, ZHANG Y, WANG J X, et al. Enhanced frequency-constrained unit commitment considering variable-droop frequency control from converter-based generator [J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2023, 38(2): 1094-1110.
- [98] LI H, QIAO Y, LU Z X, et al. Frequency-constrained stochastic planning towards a high renewable target considering frequency response support from wind power [J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2021, 36(5): 4632-4644.
- [99] TIAN X S, WANG W S, CHI Y N, et al. Virtual inertia optimization control of DFIG and assessment of equivalent inertia time constant of power grid [J]. *IET Renewable Power Generation*, 2018, 12(15): 1733-1740.
- [100] CHU Z D, MARKOVIC U, HUG G, et al. Towards optimal system scheduling with synthetic inertia provision from wind turbines [J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2020, 35(5): 4056-4066.
- [101] 张祥宇,金召展,付媛,等.基于频率变化极值时间的风电虚拟惯量约束与支撑控制[J].*高电压技术*,2023,49(6):2491-2505.
ZHANG Xiangyu, JIN Zhaozhan, FU Yuan, et al. Virtual inertia constrain and support control of wind turbines based on variable frequency limit time [J]. *High Voltage Engineering*, 2023, 49(6): 2491-2505.
- [102] XU G Y, XU L. Improved use of WT kinetic energy for system frequency support [J]. *IET Renewable Power Generation*, 2017, 11(8): 1094-1100.
- [103] 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.
- [104] 周涛,黄菊,韩汝帅,等.综合惯性控制下风机惯性支撑能力分析 & 等效惯量评估[J/OL].*上海交通大学学报*[2023-09-06].<https://doi.org/10.16183/j.cnki.jsjtu.2023.161>.
ZHOU Tao, HUANG Ju, HAN Rushuai, et al. Inertial support capacity analysis and equivalent inertia estimation of

- wind turbines under integrated inertial control[J/OL]. Journal of Shanghai Jiao Tong University [2023-09-06]. <https://doi.org/10.16183/j.cnki.jsjtu.2023.161>.
- [105] CHEN P W, QI C C, CHEN X. Virtual inertia estimation method of DFIG-based wind farm with additional frequency control[J]. Journal of Modern Power Systems and Clean Energy, 2021, 9(5): 1076-1087.
- [106] 王彤,邢其鹏,李鸿恩,等.计及虚拟惯量控制的DFIG等效惯量在线评估与响应特性分析[J].电力系统保护与控制,2022,50(11):52-60.
WANG Tong, XING Qipeng, LI Hongen, et al. Online evaluation and response characteristics analysis of equivalent inertia of a doubly-fed induction generator incorporating virtual inertia control[J]. Power System Protection and Control, 2022, 50(11): 52-60.
- [107] 安军,盛帅,周毅博,等.基于量测数据的风电场等效虚拟惯量评估方法[J].电网技术,2023,47(5):1819-1829.
AN Jun, SHENG Shuai, ZHOU Yibo, et al. Evaluation of equivalent virtual inertia of wind farm based on measured data[J]. Power System Technology, 2023, 47(5): 1819-1829.
- [108] 张武其,文云峰,迟方德,等.电力系统惯量评估研究框架与展望[J].中国电机工程学报,2021,41(20):6842-6856.
ZHANG Wuqi, WEN Yunfeng, CHI Fangde, et al. Research framework and prospect on power system inertia estimation[J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(20): 6842-6856.
- [109] 鲁宗相,姜继恒,乔颖,等.新型电力系统广义惯量分析与优化研究综述[J].中国电机工程学报,2023,43(5):1754-1776.
LU Zongxiang, JIANG Jiheng, QIAO Ying, et al. A review on generalized inertia analysis and optimization of new power systems[J]. Proceedings of the CSEE, 2023, 43(5): 1754-1776.
- [110] 董昱,孙荣富,丁然,等.考虑风速不确定性的风电场暂态有功支撑能力在线评估方法[J/OL].电力系统自动化[2023-07-28]. <https://kns.cnki.net/kcms2/detail/32.1180.TP.20230727.1554.002.html>.
DONG Yu, SUN Rongfu, DING Ran, et al. Online evaluation method of transient active power support capability of wind farm considering wind speed uncertainty [J/OL]. Automation of Electric Power Systems [2023-07-28]. <https://kns.cnki.net/kcms2/detail/32.1180.TP.20230727.1554.002.html>.
- [111] 王中冠,刘嘉琛,郭力,等.基于状态空间映射的模型不完备风电场调频能力在线评估方法[J].中国电机工程学报,2023,43(3):927-939.
WANG Zhongguan, LIU Jiachen, GUO Li, et al. Online frequency characteristics analysis for incomplete-model wind farms based on state space mapping[J]. Proceedings of the CSEE, 2023, 43(3): 927-939.
- [112] 李兆伟,张恒旭,曹永吉,等.计及锅炉热动态影响的机组一次调频能力评估方法[J].山东大学学报(工学版),2022,52(5):35-43.
LI Zhaowei, ZHANG Hengxu, CAO Yongji, et al. Assessment scheme for primary frequency regulation capability considering boiler thermal dynamic[J]. Journal of Shandong University (Engineering Science), 2022, 52(5): 35-43.
- [113] 孙铭,徐飞,陈磊,等.利用转子动能的风机辅助频率控制最优策略[J].中国电机工程学报,2021,41(2):506-514.
SUN Ming, XU Fei, CHEN Lei, et al. Optimal auxiliary frequency control strategy of wind turbine generator utilizing rotor kinetic energy[J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(2): 506-514.
- [114] SUN M, MIN Y, XIONG X J, et al. Practical realization of optimal auxiliary frequency control strategy of wind turbine generator[J]. Journal of Modern Power Systems and Clean Energy, 2022, 10(3): 617-626.
- [115] SUN M, SUN Y, CHEN L, et al. Novel temporary frequency support control strategy of wind turbine generator considering coordination with synchronous generator[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2022, 13(2): 1011-1020.
- [116] AKBARI M, MADANI S M. Analytical evaluation of control strategies for participation of doubly fed induction generator-based wind farms in power system short-term frequency regulation[J]. IET Renewable Power Generation, 2014, 8(3): 324-333.
- [117] RAKHSHANI E, GUSAIN D, SEWDIEN V, et al. A key performance indicator to assess the frequency stability of wind generation dominated power system[J]. IEEE Access, 2019, 7: 130957-130969.
- [118] ENGLEITNER R, NIED A, SANTOS MATOS CAVALCA M, et al. Dynamic analysis of small wind turbines frequency support capability in a low-power wind-diesel microgrid [J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2018, 54(1): 102-111.
- [119] 马晓伟,徐海超,刘鑫,等.适用于西北送端大电网新能源场站快速频率响应功能的入网试验方法[J].电网技术,2020,44(4):1384-1391.
MA Xiaowei, XU Haichao, LIU Xin, et al. A test method for fast frequency response function of renewable energy stations in northwest power grid[J]. Power System Technology, 2020, 44(4): 1384-1391.
- [120] 沐润志,吴水军,陈晶,等.并网新能源场站调频能力检测技术研究[J].云南电力技术,2021,49(6):80-86.
MU Runzhi, WU Shuijun, CHEN Jing, et al. Study on the detection technology of frequency regulation capability of grid-connected new energy station[J]. Yunnan Electric Power, 2021, 49(6): 80-86.

鲁宗相(1974—),男,通信作者,博士,长聘副教授,主要研究方向:风电/太阳能发电并网分析与控制、能源与电力宏观规划、电力系统可靠性、分布式电源及微电网。E-mail: luzongxiang98@tsinghua.edu.cn

李佳明(1998—),男,博士研究生,主要研究方向:新能源场站主动支撑、新能源并网调频控制优化、新型电力系统调度运行。E-mail: lijiaminggood@163.com

乔颖(1981—),女,博士,副研究员,主要研究方向:新能源、分布式发电、电力系统安全与控制。E-mail: qiaoying@tsinghua.edu.cn

(编辑 王梦岩)

Research Status and Technology Prospects of Fast Frequency Support Capability Assessment for Renewable Energy Stations

LU Zongxiang¹, LI Jiaming¹, QIAO Ying¹, JIANG Jiheng¹, WANG Weisheng²,
ZHU Lingzhi², WANG Shibo³, MIAO Weiwei⁴

- (1. State Key Laboratory of Power System and Generation Equipment (Tsinghua University), Beijing 100084, China;
2. State Key Laboratory of Operation and Control of Renewable Energy & Storage Systems (China Electric Power Research Institute), Beijing 100192, China;
3. Electric Power Research Institute of State Grid Shandong Electric Power Company, Jinan 250003, China;
4. State Grid Shandong Electric Power Company, Jinan 250000, China)

Abstract: With the gradual replacement of synchronous units by renewable energy generation represented by wind and photovoltaic power, the frequency regulation resources of systems are insufficient, and the anti-interference ability is declining, and the frequency security problem is highlighted. The fast frequency support provided by renewable energy stations has become an inevitable requirement for the construction of a new power system. The fast frequency support of renewable energy stations is the result of the coordinated efforts of multiple internal equipment and links, which is influenced and constrained by multiple factors such as wind and solar resources, control strategies, and power grid conditions. Quantitative evaluation of the fast frequency support capability of renewable energy stations is the basis for guiding the optimal control of station frequency regulation, analyzing the frequency response characteristics of the new power system, and realizing the interaction between frequency regulation resources of stations and power grids. This paper provides a comprehensive overview of the evaluation of the fast frequency support capability of renewable energy stations. First, the fast frequency support characteristics of stations are analyzed, and the definition of the fast frequency support capability of stations is given. Then, the evaluation index system of the fast frequency support capability of the stations is sorted out from the three dimensions of state attribute, control characteristic and frequency regulation effect, and the common calculation methods of various evaluation indices are analyzed and commented. Finally, key technical issues worthy of attention and further research are proposed.

This work is supported by National Key R&D Program of China (No. 2021YFB2400500) and State Grid Corporation of China.

Key words: fast frequency support; renewable energy station; active power control; capability assessment; inertia support; primary frequency regulation

