

分布式资源聚合参与频率紧急控制的控制性能评价方法

王浩然¹, 罗东琦¹, 张明泽², 巴宇¹, 鲁娜¹, 李卫东¹

(1. 大连理工大学电气工程学院, 116024, 辽宁大连; 2. 哈尔滨理工大学电气与电子工程学院, 150080, 哈尔滨)

摘要: 为对海量异构分布式资源及其聚合而成的虚拟控制单元参与频率紧急控制时的控制性能进行评价, 提出了一种分布式资源聚合参与频率紧急控制的控制性能评价方法。对于虚拟控制单元整体的控制性能评价, 根据电网频率紧急控制相关要求, 选取达到稳态前后两部分内实际有功功率相较要求越限导致的欠、过调节电量为评价参量, 对应设计4个评价指标; 对于所聚合分布式资源个体的控制性能评价, 根据聚合特点和资源个体动态特性, 选取调节持续、幅度、速度、延迟4个评价参量, 对应设计4个指标。算例分析表明: 在正常和3类不同异常场景中, 所提方法均能够可靠反映虚拟控制单元与分布式资源个体的控制性能并进行正确评价; 在部分场景中已有静态方法出现误判时, 所提方法能够更为有效地识别异常执行情况, 相比已有静态方法更为可靠; 量测采样间隔和噪声情况对所提评价指标的计算存在一定影响, 当采样间隔 ≤ 0.1 s、采用3点移动平均法等方法进行噪声预处理时, 评价指标计算误差相对较小。

关键词: 控制性能评价; 分布式资源; 频率紧急控制; 虚拟控制单元

中图分类号: TM732 **文献标志码:** A

DOI: 10.7652/xjtubXXXXXX001 **文章编号:** 0253-987X(XXXX)XX-0001-11

Control Performance Evaluation Method for Aggregated Distributed Energy Resources Participating in Frequency Emergency Control

WANG Haoran¹, LUO Dongqi¹, ZHANG Mingze², BA Yu¹, LU Na¹, LI Weidong¹

(1. School of Electrical Engineering, Dalian University of Technology, Dalian, Liaoning 116024, China; 2. School of Electrical and Electronic Engineering, Harbin University of Science and Technology, Harbin 150080, China)

Abstract: To evaluate the control performance of large numbers of heterogeneous distributed energy resources (DERs) and the virtual control unit (VCU) formed by aggregating them during frequency emergency control, this paper proposes a control performance evaluation method for aggregated DERs. At the VCU level, in accordance with relevant grid requirements for frequency emergency control, the under- and over-regulation energies caused by violations of the prescribed active-power bounds during the transient and steady-state stages are selected as evaluation quantities, and four corresponding indices are developed. At the individual DER level, regulation duration, amplitude, speed, and delay are selected as evaluation quantities based on aggregation characteristics and resource dynamics, and four corresponding indices are developed. Case studies under normal conditions and three types of abnormal conditions show that the proposed method reliably reflects and

correctly evaluates the control performance of both VCUs and individual DERs. In scenarios where existing static methods produce misclassifications, the proposed method more effectively identifies abnormal responses of VCUs and individual DERs and is therefore more reliable. The measurement sampling interval and noise affect the calculation of the proposed indices. When the sampling interval does not exceed 0.1 s and measurement data are preprocessed using a three-point moving average or a similar noise-reduction method, the index calculation errors remain relatively small.

Keywords: control performance evaluation; distributed energy resource; frequency emergency control; virtual control unit

随着风电、光伏等新能源发电容量占比的不断提升^[1-2],作为传统频率紧急控制辅助服务主要提供者的火电机组逐步被替代,系统对大扰动的抵抗能力被削弱^[3-4]。配电侧存在大量分布式资源(distributed energy resource, DER),包括电动汽车(electric vehicle, EV)、储能系统(energy storage system, ESS)等储能型资源^[5-8]和电热水器(electric water heater, EWH)、变频空调等温控负荷资源^[9-10]等,其可与电网双向互动并参与控制。利用虚拟电厂技术将这些分散式接入配电网的DER聚合成虚拟控制单元(virtual control unit, VCU)^[11-12],作为统一整体参与系统频率紧急控制,可在保证经济性的同时,有效补充系统短缺的频率紧急控制资源。

根据相关规范,VCU主要通过前馈方式参与频率紧急控制^[13-14]。这种方式调节速度快、作用于扰动发生初期,能够起到遏制频率变化速度、快速恢复频率稳定的重要作用^[15-16]。控制性能评价是在事后对辅助服务主体的实际表现进行评价分析,明确其是否达到相关要求。控制性能评价可以监督辅助服务主体履行电网的控制性能要求,辅助电网公司更好地规范和管理各主体的频率紧急控制行为,从管理侧角度提升电网实际频率紧急控制能力,保障系统频率安全^[17-18]。在电力系统频率安全态势日趋严峻的情形下,更需要对频率紧急控制行为进行细致的管理和考核。

不同于常规提供辅助服务的火电、风电机组通常为实际单一个体,VCU为大量小容量个体虚拟聚合组成,内部控制策略复杂、个体特性各异^[15,19]。因此,除电网需对VCU聚合后整体进行评价外,VCU运营方等聚合商亦需对下属DER个体进行控制性能评价,为下属DER个体向VCU提供的服务质量评价提供分析工具。

针对辅助服务主体参与频率调节的控制性能评价参量选取和指标设计,目前已有许多相关研究。文献[20]基于某段时间内负荷变化方差与频

率变化方差的比值定义了电网一次调频能力评估指标。文献[21]提出了以开环低阶一次调频响应模型为评价准则的火电机组动态一次调频参量辨识方法,实现评价参量获取由静态经验判断向动态参数辨识的转变。文献[22]基于火电机组一次调频以惯性响应为主的特点,选取了动态调整幅度、动态调节速度和动态累积效应3个评价参量设计指标。文献[23]以风电送出线路功率实测值与预测值的误差为评价参量,将风电的随机性纳入评价考量。文献[24]分别建立两种控制模式下风电机组的一次调频模型,利用量测辨识其下垂系数参量实现了动态评价。

上述研究针对单一辅助服务个体(如火电机组、新能源场站等)的控制性能获取与评价进行了较为深入研究。但是,其中传统静态评价多基于特定时刻的静态点监测,难以捕获VCU参与频率紧急控制过程中的非线性特征。然而,现有动态评价指标多适配单一个体,难以适配由海量异构DER虚拟聚合而成的VCU。此外,VCU运营方等聚合商亦需对下属DER个体进行监督管理,而目前缺乏对下属被聚合DER个体的控制性能评价方法。

针对上述问题,本文提出了一种分布式资源聚合参与频率紧急控制的控制性能评价方法。对于VCU整体的控制性能评价,结合电网频率紧急控制相关要求,根据达到稳态前后两部分内,实际有功功率相较要求越限导致的欠、过调节电量为评价参量,分别设计4个评价指标;对于所聚合DER个体的控制性能评价,结合整体虚拟聚合特点和个体动态特性,选取调节持续、幅度、速度、延迟4个评价参量,并分别设计指标,从而为电网频率紧急控制辅助服务监督考核和虚拟控制单元运营方内部服务质量评价提供分析工具。

需要说明的是,频率紧急控制存在上、下调节两种情况,详细分析见附录A。不失一般性地,本文以下调节情况为分析对象。对于上调节,可对目标

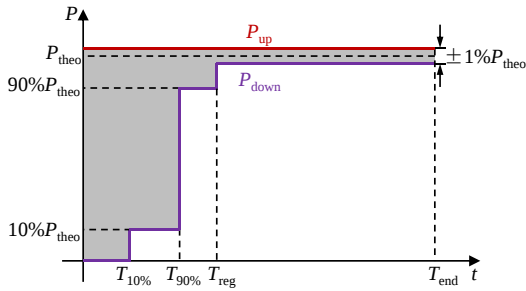
功率和功率改变量等参量取绝对值后,代入本文方法进行计算。

1 控制性能评价指标设计

1.1 电力系统频率紧急控制性能要求

本文所面向的聚合配电侧 DER 形成的 VCU,属于能够响应电力调度指令的可调节负荷(含通过聚合商、虚拟电厂等形式聚合)^[25],其参与频率紧急控制的流程分析详见附录 B。

目前,此类新型辅助服务主体参与辅助服务的相关规范尚未健全。考虑到其与原有发电侧辅助服务主体处于同一系统、参与同一市场,管理模式、运行规范等应会基本保持同一范式,因此本文参照现行对发电侧辅助服务主体控制性能要求相关文件中的范式,确定对 VCU 的控制性能要求。具体为,VCU 参与频率紧急控制过程中的有功功率应处于图 1 中阴影区域内^[26-27]。



P_{up} 、 P_{down} —控制性能要求的功率上、下限; P_{theo} —目标功率;
 $T_{10\%}$ 、 $T_{90\%}$ 、 T_{reg} 、 T_{end} —滞后时间要求值、上升时间要求值、调节时间要求值、持续时间要求值。

图 1 频率紧急控制的控制性能要求示意图

Fig. 1 Control performance requirements for frequency emergency control

控制性能要求可通过图 1 中紫色线条的功率下限和红色线条的功率上限描述,具体为

$$P_{up}(t) = 101\%P_{theo}, 0 \leq t < T_{end} \quad (1)$$

$$P_{down}(t) = \begin{cases} 0, & 0 \leq t < T_{10\%} \\ 10\%P_{theo}, & T_{10\%} \leq t < T_{90\%} \\ 90\%P_{theo}, & T_{90\%} \leq t < T_{reg} \\ 99\%P_{theo}, & T_{reg} \leq t \leq T_{end} \end{cases} \quad (2)$$

1.2 VCU 控制性能评价参量选择与获取

根据 1.1 节可知,控制性能要求可根据调节时间要求为界,前后分为暂态与稳态两个部分。暂态部分期间,VCU 有功功率需满足延迟时间与上升时间要求,并逐步达到目标功率;稳态部分期间,VCU

有功功率应维持在目标功率附近,不应波动过大。

基于频率紧急控制的快速性、准确性与整体效果要求,并考虑 VCU 为聚合整体的特点,本文选取 VCU 有功功率跃出控制性能要求范围的积分电量为评价参量。并按照控制性能要求的功率上、下限和暂、稳态两个部分,分为 4 个评价参量,具体如下。

暂态欠调节电量 W_{TR}^{un} 为在暂态部分期间,VCU 有功功率未满足要求功率下限部分的电量,具体为

$$W_{TR}^{un} = \int_0^{T_{reg}} \max[0, P_{down}(t) - P_{VCU}(t)] dt \quad (3)$$

式中: P_{VCU} 为 VCU 参与频率紧急控制有功功率。

暂态过调节电量 W_{TR}^{ov} 为在暂态部分期间,VCU 有功功率超过要求功率上限部分的电量,具体为

$$W_{TR}^{ov} = \int_0^{T_{reg}} \max[0, P_{VCU}(t) - P_{up}(t)] dt \quad (4)$$

稳态欠调节电量 W_{ST}^{un} 为在稳态部分期间,VCU 有功功率未满足要求功率下限部分的电量,具体为

$$W_{ST}^{un} = \int_{T_{reg}}^{T_{end}} \max[0, P_{down}(t) - P_{VCU}(t)] dt \quad (5)$$

稳态过调节电量 W_{ST}^{ov} 为在稳态部分期间,VCU 实际功率超过要求功率上限部分的电量,具体为

$$W_{ST}^{ov} = \int_{T_{reg}}^{T_{end}} \max[0, P_{VCU}(t) - P_{up}(t)] dt \quad (6)$$

考虑到电力系统量测设备测得的功率序列一般为等间隔采样,式(3)~(6)可表示为

$$W_{TR}^{un} = T \sum_{k=1}^{k_{reg}} \max[0, P_{down}(kT) - P_{VCU}(kT)] \quad (7)$$

$$W_{TR}^{ov} = T \sum_{k=1}^{k_{reg}} \max[0, P_{VCU}(kT) - P_{up}(kT)] \quad (8)$$

$$W_{ST}^{un} = T \sum_{k=k_{reg}+1}^{k_{end}} \max[0, P_{down}(kT) - P_{VCU}(kT)] \quad (9)$$

$$W_{ST}^{ov} = T \sum_{k=k_{reg}+1}^{k_{end}} \max[0, P_{VCU}(kT) - P_{up}(kT)] \quad (10)$$

式中: T 为电力系统量测采样间隔; $k_{reg} = \lfloor T_{reg}/T \rfloor$, $k_{end} = \lfloor T_{end}/T \rfloor$, $\lfloor \cdot \rfloor$ 为向下取整函数。当采样间隔较长时,可利用分段 3 次 Hermite 插值(piecewise cubic Hermite interpolating polynomial, PCHIP)等插值法提高参量计算精度^[28]。

1.3 VCU 控制性能评价指标设计

基于上节提出的 4 个评价参量,本节进一步根据暂态调节电量标准值 W_{TR} 和稳态调节电量标准值 W_{ST} ,对应设计了 4 个评价指标,具体如下。

暂态欠调节指数 R_{TR}^{un} 反映了 VCU 在暂态过程中 P_{VCU} 低于 P_{down} 的缺额程度,具体为

$$R_{TR}^{un} = \begin{cases} 1 - \frac{W_{TR}^{un}}{W_{TR}}, 0 \leq W_{TR}^{un} \leq W_{TR} \\ 0, W_{TR}^{un} > W_{TR} \end{cases} \quad (11)$$

式中: W_{TR} 为暂态调节电量标准值, 具体为

$$W_{TR} = P_{theo} T_{reg} \quad (12)$$

暂态过调节指数 R_{TR}^{ov} 反映了 VCU 在暂态过程中 P_{VCU} 超出 P_{up} 的超额程度, 具体为

$$R_{TR}^{ov} = \begin{cases} 1 - \frac{W_{TR}^{ov}}{W_{TR}}, 0 \leq W_{TR}^{ov} \leq W_{TR} \\ 0, W_{TR}^{ov} > W_{TR} \end{cases} \quad (13)$$

稳态欠调节指数 R_{ST}^{un} 反映了 VCU 在稳态过程中 P_{VCU} 低于 P_{down} 的缺额程度, 具体为

$$R_{ST}^{un} = \begin{cases} 1 - \frac{W_{ST}^{un}}{W_{ST}}, 0 \leq W_{ST}^{un} \leq W_{ST} \\ 0, W_{ST}^{un} > W_{ST} \end{cases} \quad (14)$$

式中: W_{ST} 为稳态调节电量标准值, 具体为

$$W_{ST} = P_{theo} (T_{end} - T_{reg}) \quad (15)$$

稳态过调节指数 R_{ST}^{ov} 反映了 VCU 在稳态过程中, P_{VCU} 超出 P_{up} 的超额程度, 具体为

$$R_{ST}^{ov} = \begin{cases} 1 - \frac{W_{ST}^{ov}}{W_{ST}}, 0 \leq W_{ST}^{ov} \leq W_{ST} \\ 0, W_{ST}^{ov} > W_{ST} \end{cases} \quad (16)$$

上述4个评价指标, 均为达到100%时合格, 越接近0则不合格程度越高, 其取值范围、合格条件等信息汇总如附录C表C1所示。

2 DER控制性能评价方法设计

2.1 DER个体动态特性模型获取

EV与ESS等储能类设备参与频率紧急控制时的有功功率动态特性, 可建模为一阶惯性环节, 考虑到控制过程中的通信与设备动作延迟, 可表示为

$$G_{EV}(s) = e^{-\tau_{EV}s} \frac{1}{T_{EV}s + 1} \quad (17)$$

$$G_{ESS}(s) = e^{-\tau_{ESS}s} \frac{1}{T_{ESS}s + 1} \quad (18)$$

式中: G_{EV} 、 G_{ESS} 分别为EV、ESS有功功率动态特性; T_{EV} 、 T_{ESS} 分别为EV、ESS的惯性时间常数; τ_{EV} 、 τ_{ESS} 分别为EV、ESS的通信与动作延迟时间。

EWH等定频温控负荷, 主要通过开关或模式切换参与频率紧急控制。考虑到控制过程中的通信与设备动作延迟, 其动态特性可表示为

$$G_{EWH}(s) = e^{-\tau_{EWH}s} \quad (19)$$

式中: G_{EWH} 为EWH有功功率动态特性; τ_{EWH} 为EWH的通信与动作延迟时间。

2.2 DER个体评价参量选择

考虑到在DER个体参与频率紧急控制的过程中, 受通信波动等随机因素影响可能出现中途退出控制等现象。本文选取调节持续参量 L_{DER} , 即DER个体连续保持参与控制的时间, 检测其参与频率紧急控制的可靠程度。理想状态下, DER个体有功功率稳态值应维持至电力系统要求的持续时间, 故其标杆值应为 T_{end} 。

针对DER个体控制过程中动态特性的评价, 根据2.1节, 本文选取了调节幅度 K_{DER} 、调节速度 T_{DER} 和调节延迟 τ_{DER} 3个评价参量。其中, EV与ESS包含全部3个评价参量, 其关系定义为

$$P_{DER} = c_{V2D} e^{-\tau_{DER}s} \frac{K_{DER}}{T_{DER}s + 1} \quad (20)$$

式中: P_{DER} 为量测测得的DER个体频率紧急控制有功功率; c_{V2D} 为VCU向DER个体下发的控制信号, 为DER个体目标功率 P_{V2D} 对应的阶跃信号, 即

$$c_{V2D} = \frac{P_{V2D}}{s} \quad (21)$$

EWH仅包含调节幅度和调节延迟两个评价参量, 其关系定义为

$$P_{DER} = c_{V2D} K_{DER} e^{-\tau_{DER}s} \quad (22)$$

调节幅度参量 K_{DER} 指DER个体按自身理想动态特性参与频率紧急控制时的比例控制常数值, 可体现DER个体相对目标功率的调节幅度效果。理想状态下DER个体有功功率稳态值应与VCU调控中心下发的控制信号 c_{V2D} 一致, 故标杆值应为1。

调节速度参量 T_{DER} 指DER个体按理想惯性响应特点进行调节时的惯性时间常数值, 可体现DER个体参与频率紧急控制的调节速度。标杆值可根据DER个体向VCU的申报参数确定, 或由VCU聚合前对各DER个体进行阶跃试验测试获取。

调节延迟参量 τ_{DER} 指DER个体参与频率紧急控制有功功率改变的延迟时间, 可体现DER个体对频率紧急控制指令信号的反应速度。标杆值同样可根据DER个体向VCU的申报参数确定, 或由VCU聚合前对各DER个体进行阶跃试验测试获取。

2.3 DER个体评价参量实际值获取

由于VCU向DER个体下发的频率紧急控制信号在控制期间为恒定阶跃信号, DER个体的正常稳态出力应维持在目标功率附近。所以, 可利用实测有功功率的一阶差分及其与目标功率的偏差进行检测, 具体为

$$\begin{cases} P_{\text{DER}}[(k_{\text{drop}} - 1)T] - P_{\text{DER}}(k_{\text{drop}}T) > \delta_1 P_{\text{V2D}} \\ \min_{k_{\text{drop}} < \kappa < k_{\text{drop}} + k_{\text{end}}} [P_{\text{DER}}(\kappa T)] < \delta_2 P_{\text{V2D}} \\ \max_{0 < \kappa < k_{\text{drop}}} [P_{\text{DER}}(\kappa T)] > \delta_3 P_{\text{V2D}} \end{cases} \quad (23)$$

式中: $\delta_1, \delta_2, \delta_3$ 为判别阈值,具体定义见附录 D1。

当采样数据无法满足式(23),即未出现中途退出情况时,可认为 L_{DER} 参量实际值 $L_{\text{DER}}^{\text{actu}}$ 与理论值 $L_{\text{DER}}^{\text{theo}}$ 相同;当采样数据同时满足 3 个判据,则 k_{drop} 为中途退出点,此时 $L_{\text{DER}}^{\text{actu}}$ 为

$$L_{\text{DER}}^{\text{actu}} = k_{\text{drop}} T \quad (24)$$

当未检测出中途退出情况时,可用全部量测功率序列;当检测出时,可用中途退出控制之前,即 L_{DER} 之前量测功率序列,通过参数辨识方法^[29]对 $K_{\text{DER}}, T_{\text{DER}}$ 和 τ_{DER} 参量的实际值 $K_{\text{DER}}^{\text{actu}}, T_{\text{DER}}^{\text{actu}}$ 和 $\tau_{\text{DER}}^{\text{actu}}$ 进行计算。

对于 EV 和 ESS,将 $K_{\text{DER}}^{\text{actu}}, T_{\text{DER}}^{\text{actu}}$ 和 $\tau_{\text{DER}}^{\text{actu}}$ 作为待辨识参量,考虑到量测测得的功率序列一般为等间隔采样,根据附录 D2 的推导过程,最小二乘法辨识为

$$\hat{\theta} = [K_{\text{DER}}^{\text{actu}} \quad K_{\text{DER}}^{\text{actu}} \tau_{\text{DER}}^{\text{actu}} \quad T_{\text{DER}}^{\text{actu}}]_{1 \times 3}^T = (X^T X)^{-1} X^T y \quad (25)$$

$$X = [P_{\text{V2D}} kT \quad -P_{\text{V2D}} \quad -P_{\text{DER}}(kT)]_{(k_{\text{end}} - k_1) \times 3} \quad (26)$$

$$y = \left[T \sum_{\kappa=1}^k P_{\text{DER}}(\kappa T) \right]_{(k_{\text{end}} - k_1) \times 1} \quad (27)$$

式中: $k \in [k_1, k_{\text{end}}], k_1 \geq \tau_{\text{DER}}^{\text{actu}}/T$ 。

对于 EWH, $K_{\text{DER}}^{\text{actu}}$ 可通过采样全程中达到稳态后的尾部采样功率数据取均值进行获取,具体为

$$K_{\text{DER}}^{\text{actu}} = \frac{\sum_{\kappa=k}^{k_{\text{end}}} P_{\text{DER}}(\kappa T)}{P_{\text{V2D}}(k_{\text{end}} - k + 1)} \quad (28)$$

式中: $k \in [k_1, k_{\text{end}}], k_1 \geq \tau_{\text{DER}}^{\text{actu}}/T$ 。

进一步地,根据面积法求解 $\tau_{\text{DER}}^{\text{actu}}$,即理论上稳态值在全过程形成的积分电量与实际功率曲线的积分电量之差,近似等于 $\tau_{\text{DER}}^{\text{actu}}$ 导致的缺额电量,具体为

$$\tau_{\text{DER}}^{\text{actu}} = k_{\text{end}} T - \frac{T \sum_{\kappa=1}^{k_{\text{end}}} P_{\text{DER}}(\kappa T)}{P_{\text{V2D}} K_{\text{DER}}^{\text{actu}}} \quad (29)$$

在实际电力系统中,量测设备测得的采样数据可能受到噪声等污染而存在数据失真问题,可采用 3 点移动平均法等^[30-31]方法对采样数据进行预处理,以减小噪声等因素对评价参量辨识结果的影响。

2.4 DER 个体评价指标设计

基于 2.2 节选择的 DER 个体评价参量,本节对

应设计了调节持续、幅度、速度、延迟指数 4 项评价指标。其中, EV 与 ESS 包含全部 4 项评价指标, EWH 仅包含除调节速度指数外的 3 项评价指标。

调节持续指数 R_L 反映了频率紧急控制过程中调节持续参量 L_{DER} 对标杆值的完成程度,定义为

$$R_L = \begin{cases} \frac{L_{\text{DER}}^{\text{actu}}}{L_{\text{DER}}^{\text{theo}}}, & L_{\text{DER}}^{\text{actu}} < L_{\text{DER}}^{\text{theo}} \\ 100\%, & L_{\text{DER}}^{\text{actu}} \geq L_{\text{DER}}^{\text{theo}} \end{cases} \quad (30)$$

式中: $L_{\text{DER}}^{\text{actu}}$ 和 $L_{\text{DER}}^{\text{theo}}$ 分别为 L_{DER} 参量标杆值和实际值。

调节幅度指数 R_K 反映了频率紧急控制过程中调节幅度参量 K_{DER} 对标杆值的偏离程度,定义为

$$R_K = \begin{cases} 100\%, & (1 - \epsilon_K) K_{\text{DER}}^{\text{theo}} \leq K_{\text{DER}}^{\text{actu}} \leq (1 + \epsilon_K) K_{\text{DER}}^{\text{theo}} \\ \max\left(0, \frac{1 - |K_{\text{DER}}^{\text{actu}} - K_{\text{DER}}^{\text{theo}}|/K_{\text{DER}}^{\text{theo}}}{1 - \epsilon_K}\right), & \text{其他} \end{cases} \quad (31)$$

式中: $K_{\text{DER}}^{\text{actu}}$ 和 $K_{\text{DER}}^{\text{theo}}$ 分别为 K_{DER} 参量标杆值和实际值; ϵ_K 为可容忍的 DER 个体稳态功率调节误差阈值。

调节速度指数 R_T 反映了频率紧急控制过程中调节速度参量 T_{DER} 对标杆值的完成程度,定义为

$$R_T = \begin{cases} 100\%, & T_{\text{DER}}^{\text{actu}} \leq T_{\text{DER}}^{\text{theo}} \\ 2 - \frac{T_{\text{DER}}^{\text{actu}}}{T_{\text{DER}}^{\text{theo}}}, & T_{\text{DER}}^{\text{theo}} < T_{\text{DER}}^{\text{actu}} \leq 2T_{\text{DER}}^{\text{theo}} \\ 0, & T_{\text{DER}}^{\text{actu}} > 2T_{\text{DER}}^{\text{theo}} \end{cases} \quad (32)$$

式中: $T_{\text{DER}}^{\text{actu}}$ 和 $T_{\text{DER}}^{\text{theo}}$ 分别为 T_{DER} 参量标杆值和实际值。

调节延迟指数 R_τ 反映了频率紧急控制过程中调节延迟参量 τ_{DER} 对标杆值的完成程度,定义为

$$R_\tau = \begin{cases} 100\%, & \tau_{\text{DER}}^{\text{actu}} \leq \tau_{\text{DER}}^{\text{theo}} \\ 2 - \frac{\tau_{\text{DER}}^{\text{actu}}}{\tau_{\text{DER}}^{\text{theo}}}, & \tau_{\text{DER}}^{\text{theo}} < \tau_{\text{DER}}^{\text{actu}} \leq 2\tau_{\text{DER}}^{\text{theo}} \\ 0, & \tau_{\text{DER}}^{\text{actu}} > 2\tau_{\text{DER}}^{\text{theo}} \end{cases} \quad (33)$$

式中: $\tau_{\text{DER}}^{\text{actu}}$ 和 $\tau_{\text{DER}}^{\text{theo}}$ 分别为 τ_{DER} 参量标杆值和实际值。

上述 4 个评价指标,均为达到 100% 时合格,越接近 0 则不合格程度越高,其取值范围、合格条件等信息汇总如附录 C 表 C2 所示。

3 算例分析

为验证本文所提控制性能评价方法的可行性与有效性,以聚合 1 000 台 EV、1 000 台 EWH 及 1 套 ESS 的 VCU 为评价对象,在不同场景下进行指标计算与对比分析。

假设电力系统调度中心向 VCU 下发的频率紧

急控制任务为 2.5 MW, 信号形式为阶跃信号; VCU 向各 EV、EWH 个体下发 1 kW, 向 ESS 下发 500 kW 的紧急控制任务。当所有 DER 个体均正常调节时, 各类 DER 仿真参数如附录 E1 表 E1 所示。 $T_{10\%}$ 、 $T_{90\%}$ 、 T_{reg} 、 T_{end} 和 ϵ_K 分别取 1 s、3 s、4 s、60 s 和 1%^[26-27]。

3.1 所有 DER 个体均正常调节

当所有 DER 个体均正常调节时, VCU 整体有功功率的仿真结果如附录 E2 图 E1(a) 所示, 4 项评价指标均为 100.00%; 部分典型 DER 个体的有功功率仿真结果如附录 E2 图 E1(b) 所示, 所选取 DER 个体的各项评价指标均为 100.00%。

由此可知, 在此场景下, VCU 的各项评价指标均为合格, 所选取 DER 个体的各项评价指标均为合格, 评价结果与场景设置情况一致。

3.2 部分 DER 个体动态特性参数与申报不符

假设 801~1 000 号 EV、801~1 000 号 EWH 和 ESS 的动态特性参数与申报不符, 其申报参数与 3.1 节中相同, 实际参数如附录 E1 表 E2 所示, 其余 DER 个体实际参数与 3.1 节中相同。

此场景下, VCU 整体有功功率的仿真结果如附录 E3 图 E2(a) 所示, 4 项评价指标中 $R_{\text{TR}}^{\text{un}}=99.11\%$ 、 $R_{\text{ST}}^{\text{un}}=99.80\%$ 、 $R_{\text{TR}}^{\text{ov}}=100.00\%$ 、 $R_{\text{ST}}^{\text{ov}}=100.00\%$ 。可以看出, 在部分 DER 个体延迟时间、惯性时间常数等参数实际值大于申报值的情况下, VCU 在部分时刻出现欠调节问题, 其 $R_{\text{TR}}^{\text{un}}$ 和 $R_{\text{ST}}^{\text{un}}$ 指标不合格, 评价结果与场景设置情况一致。

此场景下, 部分典型 DER 个体的有功功率仿真结果如附录 E3 图 E2(b) 所示, 所选取的 DER 个体的各评价指标如表 1 所示。可以看出, 801 号 EV 和 ESS 的 R_T 和 R_i 指标不合格, 801 号 EWH 的 R_i 指标不合格, 评价结果与场景设置情况一致。

3.3 部分 DER 个体调节稳态功率与目标功率不符

本节对部分 DER 个体参与频率紧急控制时稳

表 1 部分 DER 个体评价指标仿真结果

Table 1 Simulation results of evaluation indices for selected individual DERs

DER 个体	$R_L/\%$	$R_K/\%$	$R_T/\%$	$R_i/\%$
1 号 EV	100.00	100.00	100.00	100.00
801 号 EV	100.00	100.00	18.80	0.00
1 号 EWH	100.00	100.00		100.00
801 号 EWH	100.00	100.00		0.00
ESS	100.00	100.00	66.07	0.00

态功率与目标功率不符的情况, 设置 3 个场景进行分析。场景 A 为部分 DER 个体调节稳态功率超过目标功率; 场景 B 为部分 DER 个体调节稳态功率不足目标功率; 场景 C 为部分 DER 个体调节稳态功率超过和不足目标功率并存。具体 DER 个体异常情况设置如附录 E1 表 E3 所示, 其余参数与 3.1 节中相同。

在 A、B 和 C 这 3 个场景下, VCU 整体有功功率的仿真结果如附录 E4 图 E3(a)、图 E4(a) 和图 E5(a) 所示, 4 项评价指标结果如表 2 所示。

由表 2、附录 E4 图 E3(a)、图 E4(a) 和图 E5(a) 可知: 在场景 A 中, VCU 整体出现调节过量, 其 $R_{\text{TR}}^{\text{ov}}$ 和 $R_{\text{ST}}^{\text{ov}}$ 指标均不合格; 在场景 B 中, VCU 整体在稳态部分期间出现调节不足, 其 $R_{\text{ST}}^{\text{un}}$ 指标不合格; 在场景 C 中, 由于过调节的 DER 个体总过调量和欠调节的 DER 个体总欠调量恰好相互抵消, VCU 整体功率满足控制性能要求, VCU 各评价指标均合格; 3 个场景的评价结果均与场景设置情况一致。

表 2 VCU 评价指标仿真结果

Table 2 Simulation results of evaluation indices for VCU

场景	$R_{\text{TR}}^{\text{un}}/\%$	$R_{\text{TR}}^{\text{ov}}/\%$	$R_{\text{ST}}^{\text{un}}/\%$	$R_{\text{ST}}^{\text{ov}}/\%$
A	100.00	85.71	100.00	85.00
B	100.00	100.00	91.40	100.00
C	100.00	100.00	100.00	100.00

在 A、B 和 C 这 3 个场景下, 部分典型 DER 个体的有功功率仿真结果如附录 E4 图 E3(b)、图 E4(b) 和图 E5(b) 所示, 所选取的 DER 个体的各个评价指标如表 3 所示。

由表 3、附录 E4 图 E3(b)、图 E4(b) 和图 E5(b) 可知: 在场景 A 中, 801 号 EV、801 号 EWH 和 ESS 的 R_K 指标不合格; 在场景 B 中, 801 号 EV、801 号 EWH 和 ESS 的 R_K 指标不合格; 在场景 C 中, 1 号 EV、801 号 EV、1 号 EWH 和 801 号 EWH 的 R_K 指标不合格; 3 个场景的评价结果均与场景设置情况一致。

从场景 C 可以看出, 即使 VCU 下属的部分 DER 个体出现调节稳态功率与目标功率不符的情况, 聚合后 VCU 整体控制性能仍可能满足要求。

3.4 部分 DER 中途退出控制

本节对部分 DER 个体参与频率紧急控制时, 受通信波动影响导致控制信号暂时中断、中途短暂退出调节的场景进行分析。假设 801~1 000 号 EV 和 801~1 000 号 EWH 与 VCU 控制中心之间在 3.00~

表3 部分DER个体评价指标仿真结果

Table 3 Simulation results of evaluation indices for selected individual DERs

场景	DER个体	$R_L/\%$	$R_K/\%$	$R_T/\%$	$R_r/\%$
A	1号EV	100.00	100.00	100.00	100.00
	801号EV	100.00	0.00	100.00	100.00
	1号EWH	100.00	100.00		100.00
	801号EWH	100.00	50.51		100.00
	ESS	100.00	80.81	100.00	100.00
B	1号EV	100.00	100.00	100.00	100.00
	801号EV	100.00	50.51	100.00	100.00
	1号EWH	100.00	100.00		100.00
	801号EWH	100.00	80.81		100.00
	ESS	100.00	80.81	100.00	100.00
C	1号EV	100.00	50.51	100.00	100.00
	801号EV	100.00	50.51	100.00	100.00
	1号EWH	100.00	80.81		100.00
	801号EWH	100.00	80.81		100.00
	ESS	100.00	100.00	100.00	100.00

3.50 s、15.00~20.00 s、30.00~30.50 s、40.00~45.00 s出现4次长短不一的通信波动,其余DER个体未出现通信异常,其余参数与3.1节中相同。

此场景下,VCU整体有功功率的仿真结果如附录E5图E6(a)所示,4项评价指标中 $R_{TR}^m=99.41\%$ 、 $R_{ST}^m=97.20\%$ 、 $R_{TR}^w=100\%$ 、 $R_{ST}^w=100\%$ 。

由附录E5图E6(a)可知,若采取静态视角方法对VCU整体控制性能进行评价,即仅监测 $T_{10\%}$ 、 $T_{90\%}$ 、 T_{reg} 、 T_{end} 这4个时刻的VCU整体功率,可得VCU在4个时刻的功率均为2500 kW,从而判定为合格。但是,事实上部分DER个体短暂退出控制,静态视角方法并未监测到该情况,而出现误判。

根据本文所提的4项评价指标,VCU整体出现欠调节问题,其 R_{TR}^m 和 R_{ST}^m 指标均不合格,评价结果与场景设置情况一致,说明本文所提评价方法相较传统静态评估方法具有更高的灵敏性。

此场景下,部分典型DER个体的有功功率仿真结果如附录E5图E6(b)所示,所选取的DER个体的各个评价指标如表4所示。

由附录E5图E6(b)可知,若采取静态视角方法对DER个体控制性能进行评价,仅监测DER个体有功功率达到10%、90%、99%目标功率的时间点和控制临近结束段的稳态有功功率,无法监测到频率紧急控制过程中其曾出现短暂退出控制的情况,从而判定为合格,出现误判。

而由表4可知,根据本文所提评价方法,801号EV和801号EWH的调节持续指数 R_L 指标不合格,表明其在 L_{DER}^{ctu} 时刻开始出现中途退出控制,评价结果与场景设置情况一致,并未出现误判。

表4 部分DER个体评价指标仿真结果

Table 4 Simulation results of evaluation indices for selected individual DERs

DER个体	$R_L/\%$	$R_K/\%$	$R_T/\%$	$R_r/\%$
1号EV	100.00	100.00	100.00	100.00
801号EV	5.03	100.00	100.00	100.00
1号EWH	100.00	100.00		100.00
801号EWH	5.05	100.00		100.00
ESS	100.00	100.00	100.00	100.00

3.5 采样间隔影响分析

本节对实际电力系统中存在多类量测设备,不同量测设备的采样间隔不一,可能导致指标计算产生较大误差的问题,进行仿真误差分析。

为兼顾VCU整体和DER个体评价,以3.3节场景A为基础,在原有0.01 s的采样间隔基础上,增加0.03、0.05、0.10、0.25、0.50、0.75、1.00 s采样间隔,利用PCHIP插值法数值积分处理,计算指标并进行误差对比分析。

在不同采样间隔下,VCU整体部分评价参量和指标的仿真结果如表5所示,DER个体部分评价参量和指标仿真结果如图2所示,其余部分未受采样间隔影响的评价参量和指标仿真结果未进行展示。

由表5可知:在采样间隔较小, ≤ 0.1 s时,所选取VCU的评价参量误差均较小,相应评价指标基本保持不变;在采样间隔较大, ≥ 0.5 s时,所选取VCU的评价参量误差明显增大,且随着采样间隔的增大而增大,相应评价指标受其影响也明显产生偏差。

由图2(a)~(c)可知,不同采样间隔下 K_{DER} 辨识结果基本保持不变,相对误差均小于0.01%。这是由于 K_{DER} 辨识结果主要由DER个体的稳态有功功率确定,受采样间隔影响较小,具有较好的稳定性。

由图2(d)~(f)可知,采样间隔对 τ_{DER} 辨识结果的影响与DER自身延迟时间有关。对于实际延迟较大DER个体,如801号EWH,即使采样间隔增大至1.00 s,采样功率仍包含调节起始时刻信息,因而辨识误差相对较小。对于实际延迟较小的DER个体,如1号EWH,当采样间隔超过其实际延迟,采样功率难以反映调节起始时刻,导致辨识误差较大。

表5 VCU评价参量和指标仿真结果

Table 5 Simulation results of evaluation parameters and indices for VCU

采样间隔/s	$W_{TR}^m/(kW \cdot s)$	W_{TR}^m 相对误差	$R_{TR}^m/\%$	$W_{ST}^m/(kW \cdot s)$	W_{ST}^m 相对误差	$R_{ST}^m/\%$
0.01	88.92	0.00	99.11	274.15	0.00	99.80
0.03	88.76	0.18	99.11	274.17	0.01	99.80
0.05	88.91	0.01	99.11	274.26	0.04	99.80
0.10	88.98	0.06	99.11	273.93	0.08	99.80
0.25	88.52	0.45	99.11	274.99	0.31	99.80
0.50	91.10	2.45	99.01	291.63	6.38	99.79
0.75	87.90	1.15	99.12	235.94	13.94	99.83
1.00	83.30	6.32	99.17	339.87	23.97	99.76

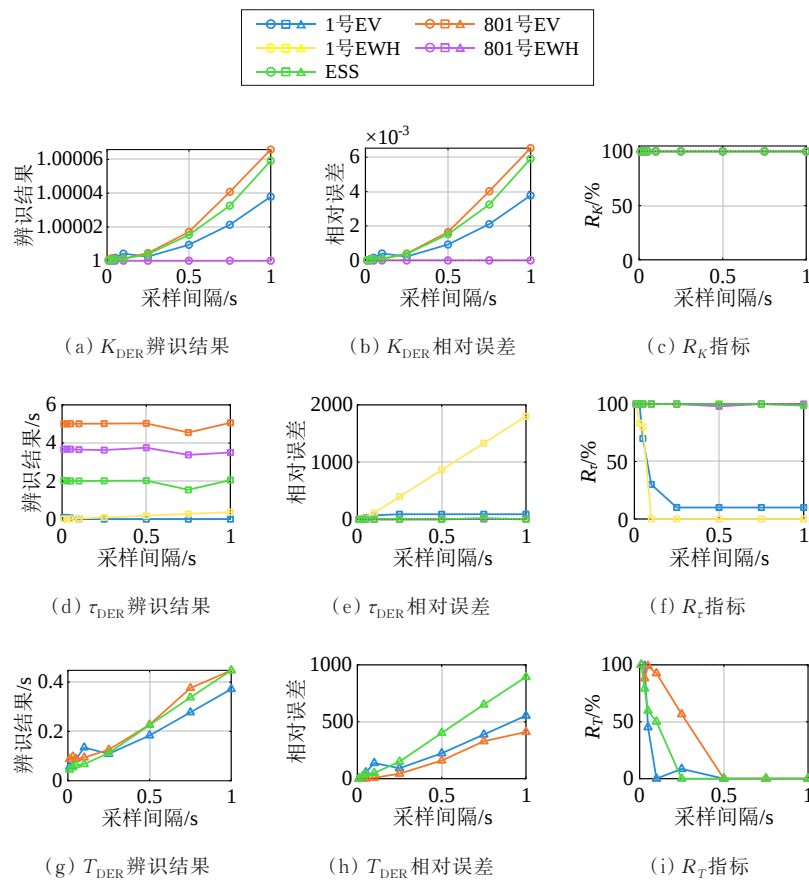


图2 部分DER个体评价参量和指标仿真结果

Fig. 2 Simulation results of evaluation parameters and indices for selected individual DERs

由图2(g)~(i)可知, T_{DER} 对采样间隔最为敏感。当采样间隔增大时, 调节上升过程中的有效采样点逐渐减少, 辨识结果误差逐渐增大。

综合表5和图2可知, 采样间隔对不同评价指标的影响存在明显差异。VCU整体评价指标稳定性均较好。DER个体评价指标中: R_k 指标受采样间隔影响较小, 稳定性较好; 对于 R_r 和 R_t 指标, 由于采样间隔较大时采样功率易丢失调节起始和上升阶段信息, PCHIP插值亦无法恢复, 因而对采样时间

间隔较为敏感。

3.6 DER个体最小二乘辨识稳定性分析

为验证量测噪声对3.3节EV、ESS评价参量最小二乘法辨识结果的影响, 本节以3.3节场景A为基础, 在原有理想量测数据基础上叠加零均值高斯白噪声, 噪声标准差分别设置为0.2%、0.5%、1%、3%、5%和10%。分别在未进行预处理和利用3点移动平均法进行预处理的两种情况下, 在各噪声水平进行500次蒙特卡罗仿真, 采用平均绝对误差

(mean absolute error, MAE)、平均绝对百分比误差(mean absolute percentage error, MAPE)、均方根误差(root mean square error, RMSE)和相对均方根误差(relative root mean squared error, RRMSE)进行误差分析。

在未进行预处理下,所得典型DER个体评价参量辨识结果的MAE和MAPE如图3所示,RMSE和RRMSE如附录E6图E7所示。在利用三点移动平均法进行预处理下,所得典型DER个体评价参量辨识结果的MAE和MAPE如附录E6图E8所示,RMSE和RRMSE如附录E6图E9所示。

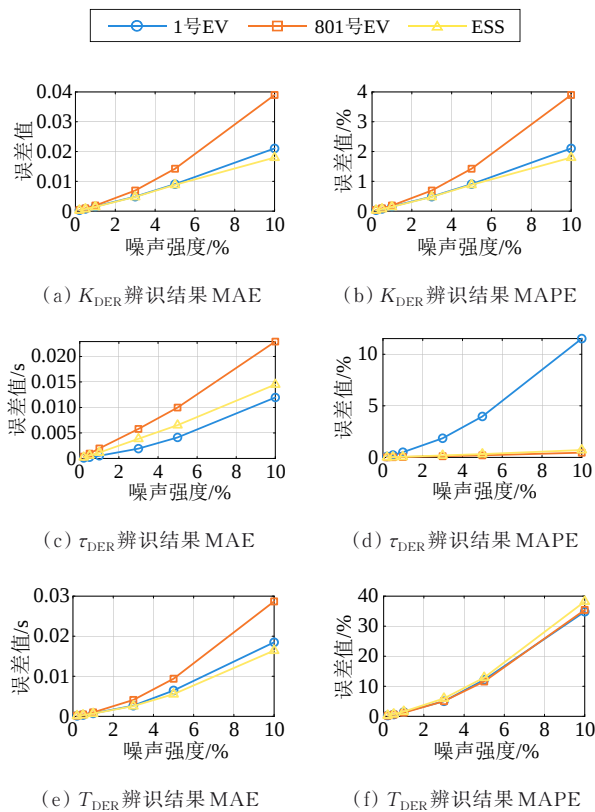


图3 未预处理时评价参量辨识的MAE和MAPE

Fig. 3 MAE and MAPE of identified evaluation parameters for selected individual DERs without preprocessing

由图3和附录E6图E7可知,所选典型DER个体的 K_{DER} 、 T_{DER} 和 τ_{DER} 的最小二乘辨识误差,均随噪声强度的增大而增大。

由图3(a)、(b)和附录E6图E7(a)、(b)可知,未进行量测预处理时, K_{DER} 参量的总体辨识误差相对较小,对量测噪声具有相对较好的稳定性。在10%噪声下,所选取DER个体 K_{DER} 辨识结果的MAPE均不超过4%。原因在于, K_{DER} 参量主要反映DER个体的稳态有功功率,而稳态持续时间较长,采样

点较多,且随机噪声经积分和多时刻最小二乘计算后得到一定程度的削弱。

由图3(c)、(d)和附录E6图E7(c)、(d)可知,量测噪声对 τ_{DER} 参量辨识结果的影响与DER个体自身延迟时间有关。在各噪声强度下:主要表征绝对误差的MAE、RMSE大致处于同一数量级,且1号EV辨识误差相对较小;对于主要表征相对误差的MAPE、RRMSE,1号EV超出其余典型DER个体一个数量级。原因在于,1号EV的实际延迟很小,较小的辨识绝对误差也会形成较大的相对误差。

由图3(e)、(f)和附录E6图E7(e)、(f)可知, T_{DER} 参量对量测噪声最为敏感,其误差随噪声强度增大而快速增加,明显高于相同噪声条件下其余两参量的辨识误差。原因在于, T_{DER} 参量主要由调节上升阶段的功率变化特征确定,而DER个体调节上升阶段通常较短,且较强的量测噪声容易掩盖相邻采样点之间的真实动态变化,从而对 T_{DER} 参量的辨识产生较大影响。

对比图3、附录E6图E7~E9可知,进行预处理后, K_{DER} 、 T_{DER} 和 τ_{DER} 这3个参量的辨识误差均有所下降,且较强噪声下改善效果更为显著。较高强度噪声下 T_{DER} 、 τ_{DER} 参量辨识结果均有较为明显改善,MAPE降幅在50%左右。1号EV的 τ_{DER} 参量辨识误差虽下降较为显著,但仍高于另外两类DER,进一步说明较短实际延迟下 τ_{DER} 参量对量测噪声更为敏感。

4 结 论

本文提出了一种分布式资源聚合参与频率紧急控制的控制性能评价方法,通过理论分析与算例结果得出以下结论。

(1)在正常场景和3类不同控制异常场景中的仿真分析表明,所提控制性能评价方法能够可靠反映VCU与DER个体参与频率紧急控制时的控制性能,并在此基础上进行正确评价,可为电网和VCU运营方对下属主体提供的服务质量评价提供工具。

(2)在部分场景下,已有静态方法出现误判时,本文所提控制性能评价方法能够更为有效地识别VCU和DER个体频率紧急控制不正常执行情况,正确评价其控制性能,相比已有静态方法更为可靠。

(3)量测采样间隔对所提评价指标计算产生一定影响。当采样间隔 ≤ 0.1 s时,评价指标的计算误差相对较小;当采样间隔 ≥ 0.5 s时,量测数据对

VCU整体及DER个体功率上升过程信息丢失过多,导致部分指标计算结果出现较大偏差。

(4)量测噪声对DER个体的最小二乘辨识结果存在一定影响。其中, K_{DER} 参量辨识结果的稳定性最佳, T_{DER} 参量对量测噪声最为敏感,而 τ_{DER} 参量辨识效果与DER个体实际延迟时间存在关联。进行预处理后,较高强度噪声下 T_{DER} 、 τ_{DER} 参量辨识结果有较为明显改善,MAPE降幅在50%左右。

参考文献:

- [1] 国家统计局. 能源转型跨越发展 绿色低碳成效显著——“十四五”经济社会发展成就系列报告之十四[R/OL]. (2026-06-05) [2026-06-15]. https://www.stats.gov.cn/sj/sjjd/202606/t20260604_1963892.html.
- [2] 中华人民共和国国务院新闻办公室. 白皮书:中国的能源转型[R/OL]. (2024-08-29) [2026-06-15]. <http://www.scio.gov.cn/gxzt/dtzt/2024zt/zgnyzxbps/index.html>.
- [3] 张智刚,康重庆. 碳中和目标下构建新型电力系统的挑战与展望[J]. 中国电机工程学报, 2022, 42(08): 2806-2819.
ZHANG Z G, KANG C Q. Challenges and Prospects for Constructing the New-type Power System Towards a Carbon Neutrality Future [J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(08): 2806-2819.
- [4] 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 Z Y, ZHANG N, DU E S, 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.
- [5] ZHANG M Z, LI W D, YU S S, et al. A Unified Configurational Optimization Framework for Battery Swapping and Charging Stations Considering Electric Vehicle Uncertainty[J]. Energy, 2021, 218: 119536.
- [6] WANG H, JIA Y W, SHI M G, et al. A Mutually Beneficial Operation Framework for Virtual Power Plants and Electric Vehicle Charging Stations [J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2023, 14 (6): 4634-4648.
- [7] 闫东翔,陈玥. 共享储能商业模式和定价机制研究综述[J]. 电力系统自动化, 2022, 46(23): 178-191.
YAN D X, CHEN Y. Review on Business Model and Pricing Mechanism for Shared Energy Storage [J]. Automation of Electric Power Systems, 2022, 46 (23): 178-191.
- [8] YU H F, YU S J, XU F C, et al. Flexibility Aggregation and Power Disaggregation of Distributed Shared Energy Storage for Coordinating Virtual Power Plant in Regulation Market[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2026, 17(2): 970-984.
- [9] 聂世豪,李桐,陈磊,等. 投切型温控负荷一次调频策略及电网侧聚合建模[J]. 中国电机工程学报, 2022, 42(S1): 1-11.
NIE S H, LI T, CHEN L, et al. Primary Frequency Control Strategy of Switching Thermostatically Controlled Load and Modeling of Aggregated Model [J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(S1): 1-11.
- [10] ALVAREZ M A Z, AGBOSSOU K, CARDENAS A, et al. Demand Response Strategy Applied to Residential Electric Water Heaters Using Dynamic Programming and K-Means Clustering [J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2020, 11 (1): 524-533.
- [11] ZHANG M Z, LI W D, YU S S, et al. A Day-ahead Self-dispatch Optimization Framework for Load-side Virtual Control Units Participating in Active Power Regulation of Power Grids [J]. Energy, 2025, 318: 134791.
- [12] WANG S Y, WU W C. Aggregate Flexibility of Virtual Power Plants With Temporal Coupling Constraints [J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2021, 12(6): 5043-5051.
- [13] 全国量度继电器和保护设备标准化技术委员会静态继电保护装置分标准化技术委员会. 电力系统安全稳定控制技术导则: GB/T 26399-2011[S]. 北京: 中国标准出版社, 2011.
- [14] 李卫东,晋萃萃,温可瑞,等. 大功率缺失下主动频率响应控制初探[J]. 电力系统自动化, 2018, 42(8): 22-30.
LI W D, JIN C C, WEN K R, et al. Active Frequency Response Control Under High-power Loss [J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42 (8): 22-30.
- [15] 薛景润,施啸寒,王超,等. 兼顾物理状态和用户行为的虚拟电厂紧急功率调节能力量化评估[J]. 中国电机工程学报, 2023, 43(08): 2906-2921.
XUE J R, SHI X H, WANG C, et al. Online Evaluation of Emergency Power Regulation Capability for Virtual Power Plants Considering Physical Characteristics and User Behavior Constraints [J]. Proceedings of the CSEE, 2023, 43(08): 2906-2921.

- [16] 李兆伟, 方勇杰, 李威, 等. 电化学储能应用于电网频率安全防御三道防线的探讨[J]. 电力系统自动化, 2020, 44(8): 1-7.
LI Z W, FANG Y J, LI W, et al. Discussion on Application of Electrochemical Energy Storage in Three Defense Lines of Power Grid Frequency [J]. Automation of Electric Power Systems, 2020, 44(8): 1-7.
- [17] 张艳军, 高凯, 曲祖义. 基于发电机组出力曲线特征的一次调频性能评价方法[J]. 电力系统自动化, 2012, 36(7): 99-103.
ZHANG Y J, GAO K, QU Z Y. An Evaluation Method of Primary Frequency Modulation Performance Based on Characteristics of Unit Output Power Curves [J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(7): 99-103.
- [18] 刘子琦, 刘洋, 李卫东, 等. 火电机组一次调频和二次调频响应功率数据剥离方法[J]. 电力系统自动化, 2023, 47(16): 132-141.
LIU Z Q, LIU Y, LI W D, et al. Data Separation Method for Primary and Secondary Frequency Regulation Response Power of Thermal Power Units [J]. Automation of Electric Power Systems, 2023, 47(16): 132-141.
- [19] 康重庆, 陈启鑫, 苏剑, 等. 新型电力系统规模化灵活资源虚拟电厂科学问题与研究框架[J]. 电力系统自动化, 2022, 46(18): 3-14.
KANG C Q, CHEN Q X, SU J, et al. Scientific Problems and Research Framework of Virtual Power Plant with Enormous Flexible Distributed Energy Resources in New Power System [J]. Automation of Electric Power Systems, 2022, 46(18): 3-14.
- [20] 于达仁, 郭钰锋. 电网一次调频能力的在线估计[J]. 中国电机工程学报, 2004(3): 77-81.
YU D R, GUO Y F. The Online Estimate of Primary Frequency Control Ability in Electric Power System [J]. Proceedings of the CSEE, 2004(3): 77-81.
- [21] 刘柳. 动态频率响应运行关键理论问题研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2021.
- [22] 刘子琦. 动态视角火电机组一次调频控制性能评价方法[D]. 大连: 大连理工大学, 2023.
- [23] 李滨, 吴思缘, 阳育德, 等. 大型风电场的控制性能评价标准及储能控制策略研究[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(16): 4691-4698+4894.
LI B, WU S Y, YANG Y D, et al. A Research on the Control Performance Standard and Energy Storage Control Strategy for Large Scale Wind Farms [J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(16): 4691-4698+4894.
- [24] SU Y X, LIU Y, LIU Z Q, et al. Performance Evaluation and Parameter Identification for Primary Frequency Response Control of Wind Turbine [C]// 2023 IEEE Sustainable Power and Energy Conference (iSPEC). Chongqing, China: IEEE, 2023: 1-6.
- [25] 国家能源局. 国家能源局关于印发《电力辅助服务管理办法》的通知[EB/OL]. (2021-12-21) [2026-06-15]. https://zfxxgk.nea.gov.cn/2021-12/21/c_1310391161.htm.
- [26] 全国电网运行与控制标准化技术委员会(SAC/TC 446). 并网电源一次调频技术规定及试验导则: GB/T 40595-2021[S]. 北京: 中国标准出版社, 2021.
- [27] 国家能源局东北监管局. 东北能源监管局关于印发《东北区域电力并网运行管理实施细则》《东北区域电力辅助服务管理实施细则》的通知[EB/OL]. (2024-09-04) [2026-06-15]. https://dbj.nea.gov.cn/xxgk/zcfg/202409/t20240906_269018.html.
- [28] 张宏伟, 金光日, 董波, 等. 计算机科学计算(第三版)[M]. 北京: 高等教育出版社, 2023.
- [29] 邱亮. 基于阶跃辨识的PID自整定算法研究及其应用[D]. 上海: 上海交通大学, 2013.
- [30] 程佩青. 数字信号处理教程(第五版)[M]. 北京: 清华大学出版社, 2017.
- [31] 费业泰. 误差理论与数据处理(第7版)[M]. 北京: 机械工业出版社, 2017.