DOI：10.13234/j.issn.2095-2805.2025.7.143 **中图分类号**：TM615 **文献标志码**：A

基于实测数据的新能源场站一次调频性能分段评价方法

包斯嘉，施志明，张 建，张军军
(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)，北京 100192)

摘要：近年来直流输电和新能源发电占比快速提升，新能源机组参与电网一次调频的要求逐步被引入各地方的管理细则之中。但现行的基于模拟电网频率扰动测试的新能源场站一次调频性能评价方法，侧重于场站一次调频性能综合评价而无法准确表征其初始动态特性，不适用于现场实测数据分析。对此，提出场站一次调频性能分段评价方法。在阐述现有新能源场站一次调频性能评价方法的基础上，结合现场故障录波数据分析结果揭示现有评价方法的不足。然后依据一次调频动态特性及场站一次调频控制流程对实测数据进行分段分析与评价，实现对场站一次调频性能的全过程准确表征。测试结果表明，所提的分段评价方法能够有效应用于一次调频实测数据分析并准确评价场站一次调频性能，为新能源场站的一次调频性能实时评估提供可选方案。

关键词：新能源场站；实测数据；一次调频；动态特性；分段评价

Segmented Evaluation Method for Primary Frequency Regulation Performance of Renewable Energy Stations Based on Measured Data

BAO Sijia, SHI Zhiming, ZHANG Jian, ZHANG Junjun
(State Key Laboratory of Operation and Control of Renewable Energy & Storage Systems (China Electric Power Research Institute), Beijing 100192, China)

Abstract: In recent years, the proportion of DC transmission and renewable energy power generation has increased rapidly, and the requirement that renewable energy units should participate in the primary frequency regulation of power grid has been gradually introduced into the management rules of various localities. However, the existing evaluation methods for the primary frequency regulation performance of a renewable energy station based on simulated power grid frequency disturbance tests focus on the comprehensive evaluation of primary frequency regulation performance of the station and cannot accurately characterize its initial dynamic characteristics, which are not suitable for the analysis of field measured data. Aimed at this problem, a segmented evaluation method for the primary frequency regulation performance of the station is proposed. Based on the description of the existing evaluation methods for the primary frequency regulation performance of renewable energy stations, the shortcomings of the existing evaluation methods are revealed by combining with the analysis results of field fault recording data. Then, according to the dynamic characteristics of primary frequency regulation and the control process of primary frequency regulation of the station, the measured data is analyzed and evaluated in segments to achieve an accurate characterization of primary frequency regulation performance during the whole process. Test results show that the proposed segmented evaluation method can be effectively applied to the analysis of measured data of primary frequency regulation and accurately evaluate the primary frequency regulation performance of the station, providing an alternative scheme for the real-time evaluation of primary frequency regulation performance of renewable energy stations.

收稿日期：2023-01-06；**修回日期**：2023-04-18，2023-09-28；
录用日期：2023-11-21；**网络首发日期**：2024-04-22
基金项目：国家电网有限公司总部科技项目(5100-202255376A-2-0-ZN)
This work is supported by the State Grid Corporation of China Headquarter Science & Technology Project under the grant 5100-202255376A-2-0-ZN

Keywords: Renewable energy station; measured data; primary frequency regulation; dynamic characteristic; segmented evaluation

大力发展风电/光伏等新能源是实现“双碳”目标、构建“以新能源为主体的新型电力系统”的必由之路。新能源已成为西北地区的主要电源，截至 2022 年 12 月 30 日，西北电网新能源装机容量达到 1.57 亿 kW，西北新能源装机比例突破 45%，新能源机组发电占比达 24%。随着电网中风电、光伏占比的不断升高，特高压直流输电逐步投运，电网运行与结构愈加复杂，系统功率平衡及调频难度不断加大[1-3]。

一方面，为提升新能源消纳比例，在可再生能源集中送出区域，电网常规电源已按照“负备用”安排开机方式，挤占具有转动惯量的常规水、火电机组空间，电源结构发生较大变化，电网可用的快速频率响应资源逐步减少[4-5]。当中午时段新能源达日最大发电出力时，全网火电机组深度调峰运行，无法提供下一次调频能力，对于电源送端大电网来说，电网频率控制特性的结构性困境日趋明显，发生电网频率安全问题的风险进一步加大[6-8]。另一方面，需要不断发挥新能源发电自身调节能力[9-11]。国外在新能源参与电网调频方面已开展相关研究，VDE-AR-N 4110、IEC 61400-21-1 等标准中均已明确新能源场站或机组应具备过频降额、欠频增额等一次调频功能。国内自 2016 年起，西北电网、东北电网、华东电网等陆续开展相关研究，制定技术指标并出台相关管理规定[12-14]。2018 年 6 月，国家能源局发布了 DL/T 1870—2018《电力系统网源协调技术规范》，首次在标准中提出了新能源场站应具备一次调频功能的要求。2021 年 10 月发布的国标 GB/T 40595—2021《并网电源一次调频技术规定及试验导则》中也针对新能源场站一次调频技术规定提出了详细要求。

然而，当现行的基于主动测试数据的新能源场站一次调频性能评价方法应用于电站一次调频实测数据分析时，发现该评价方法难以准确反映与评估新能源场站在电网故障时的实际调频响应情况。为此，本文在阐述现有的场站一次调频主动测试与性能评价方法的基础上，结合西北电网某地区直流闭锁的现场故障录波数据分析结果，揭示现有一次调频性能评价方法的不足。继而依据一次调频动态特性及场站一次调频控制流程对实测数据进行分段分析与评价，实现对场站一次调频性能的全过程准确表征。最后基于实测数据，验证所提方法的有效性。

1 新能源场站一次调频性能评价方法

1.1 一次调频性能测试与评价方法

电力行业标准 DL/T 1870—2018《电力系统网源协调技术规范》中给出了新能源场站一次调频下垂特性计算公式，部分参数可根据各区域电网实际情况确定，即

$$P = P_0 - \frac{1}{K_c} \cdot P_N \cdot \frac{f - f_d}{f_N} \tag{1}$$

式中：f、f_d 与 f_N 分别为工作频率、一次调频死区与系统额定频率，Hz；P_N 与 P_0 分别为额定功率与有功功率初值，MW；K_c 为新能源场站一次调频调差率。通过对光伏电站和风电场的一次调频参数差异化设置，形成了适用于所在地区的新能源场站一次调频有功-频率下垂特性曲线。

参考西北、东北等地电网管理部门出台的新能源场站一次调频测试方案，一次调频测试基本原理如图 1 所示。可以看出，现场主动扰动测试采用频

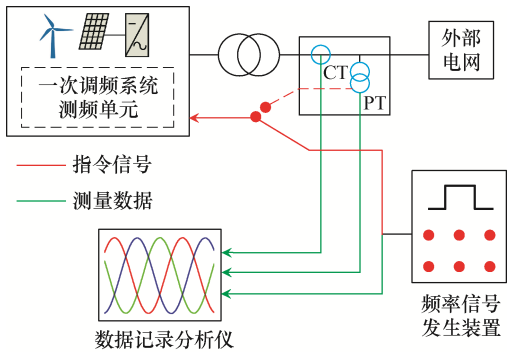


图 1 新能源场站一次调频测试原理

Fig. 1 Principle of primary frequency regulation test for renewable energy stations

率信号发生装置模拟场站并网点 PT 的二次侧信号，给出频率测试信号，并发送给新能源场站调频控制系统测频单元。测试项目一般包括：一次调频死区试验、频率阶跃扰动试验、模拟电网频率扰动试验、防扰动性能校验和自动发电控制协调试验。

本文着重关注频率阶跃扰动试验与模拟电网频率扰动试验，其中，频率阶跃扰动试验通过注入频率阶跃扰动信号来评估场站一次调频的动态性能，并利用响应滞后时间 t_1、上升时间 t_2 与调节时间 t_3 来表征该性能。测试曲线及指标示意图如图 2 所示。

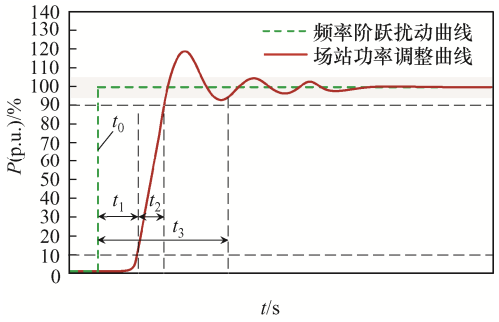


图 2　频率阶跃扰动试验示意

Fig. 2 Schematic of frequency step disturbance test

模拟电网频率扰动试验中所采用的频率扰动曲线应由当地电网调度机构根据电网的实际运行情况制定典型频率波动曲线，西北地区的测试曲线如图 3 所示。可以看出，模拟实际电网频率的上扰和下扰时，扰动频率变化趋势总体分为 2 段：第一段为频率快速变化阶段，第二段为频率缓慢恢复阶段。

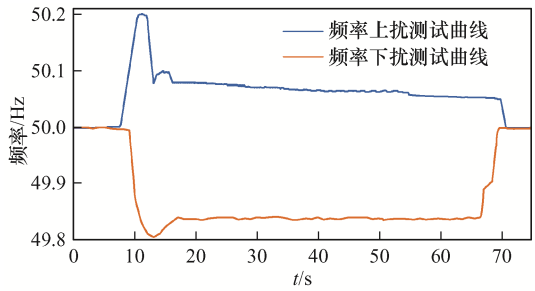


图 3　模拟电网频率扰动曲线

Fig. 3 Frequency disturbance curves for simulated power grid

注入模拟电网频率扰动信号后，根据场站一次调频响应实测曲线，计算一次调频出力响应合格率、一次调频积分电量合格率和一次调频合格率，验证新能源场站在电网频率实际变化时功率调节能力是否满足电网对于功率支撑的要求，各指标计算方法如下。

出力响应合格率 $\Delta P_{\%}$ 定义为在频率变化超过一次调频死区下限(或上限)开始至一次调频动作时间内，新能源场站实际最大出力调整量占理论最大出力调整量的百分比，计算公式为

$$\begin{cases} \Delta P_{\%}=\dfrac{\Delta P_{\mathrm{Smax}}}{\Delta P_{\mathrm{Emax}}}\cdot 100\% \\ \Delta P_{\mathrm{Smax}}=\max[P_{\mathrm{S}}(t)-P_0] \\ \Delta P_{\mathrm{Emax}}=-P_{\mathrm{N}}\cdot\dfrac{\Delta f_{\max}}{f_{\mathrm{N}}}\cdot\dfrac{1}{K_{\mathrm{c}}} \\ |\Delta P_{\mathrm{E}}|\leqslant K_{\mathrm{p}}P_{\mathrm{N}} \end{cases} \tag{2}$$

式中：ΔP_{Smax} 为场站一次调频实际最大出力调整量，kW；ΔP_{Emax} 为场站一次调频理论最大出力调整量，MW；$P_{\mathrm{S}}(t)$为场站一次调频响应动作时间内(如果时间超过 60 s，则按 60 s 计算)，t 时刻的实际有功出力，kW；P_{N} 为场站额定有功出力，MW；$\Delta f_{\max}$ 为最大频率偏差；ΔP_{E} 为场站一次调频响应动作时间内(如果时间超过 60 s，则按 60 s 计算)，t 时刻的理论有功出力；K_{p} 为一次调频出力的限幅。

积分电量合格率 $Q_{\%}$ 定义为在频率变化超过一次调频死区下限(或上限)开始至一次调频动作时间内(如果时间超过 60 s，则按 60 s 计算)，新能源场站一次调频实际贡献电量占理论贡献电量的百分比，计算公式为

$$\begin{cases} Q_{\%}=\dfrac{Q_{\mathrm{S}}}{Q_{\mathrm{E}}}\cdot 100\% \\ Q_{\mathrm{S}}=\pm\displaystyle\int_{t_0}^{t_1}[P_{\mathrm{S}}(t)-P_0]\mathrm{d}t/3\,600 \\ Q_{\mathrm{E}}=\displaystyle\int_{t_0}^{t_1}\Delta P_{\mathrm{E}}(t)\mathrm{d}t/3\,600 \end{cases} \tag{3}$$

式中：Q_{S} 与 Q_{E} 分别为场站一次调频实际积分电量与理论积分电量，kW·h；t_0 为系统频率变化超过一次调频动作死区的起始时刻，s；t_1 为系统频率恢复至一次调频动作死区范围内的时刻，s；P_0 为 t_0 时刻场站的实际有功出力。

一次调频合格率 G_{H} 为上述 2 个指标的平均值，即

$$G_{\mathrm{H}}=(Q_{\%}+\Delta P_{\%})/2 \tag{4}$$

利用模拟电网频率扰动测试数据，计算一次调频合格率，来评估场站一次调频控制调节性能，西北电网以 G_{H} 不小于 60%为合格判据。

1.2 现有测试评价方法的不足

结合 1.1 节中对现行场站一次调频测试评价方法的阐述，可以看出现有方法是通过阶跃扰动试验来评估场站一次调频的动态性能，评价指标包含调频滞后时间、上升时间及调节时间；通过模拟电网频率扰动试验来评估场站一次调频响应性能，评价指标包含出力响应合格率与积分电量合格率；并且这 2 项试验一般在场站投运前以单元抽检的形式进行。但是，在新能源场站投运期间，当发生真实频率事件时，考虑到真实频率扰动曲线与阶跃扰动测试曲线相差较大，导致无法获得快速调频动态性能指标；单独地将模拟电网频率扰动试验中一次调频响应性能评价方法运用于实测数据场景中时，会出现不能全面评估场站一次调频性能的问题。

为了更加直观地论述现行方法应用于实测数据时的问题，以西北电网某地区直流段开展的直流单级闭锁试验为例，说明现有一次调频测试方法的不足。直流闭锁期间共有 17 座新能源场站投入一次调频功能，各场站对此次电网频率波动的响应程度各不相同。选取其中 3 座新能源场站实际动作数据进行分析，一次调频响应波形如图 4~图 6 所示，各场站一次调频参数见表 1。从图 4~图 6 可以看出，由于各场站调频死区设置不同，场站参与一次调频

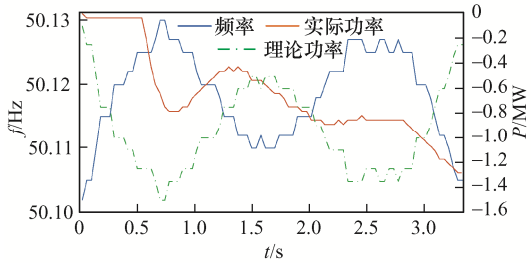


图 4 场站 1 一次调频实测曲线

Fig. 4 Measured curves of primary frequency regulation for No. 1 station

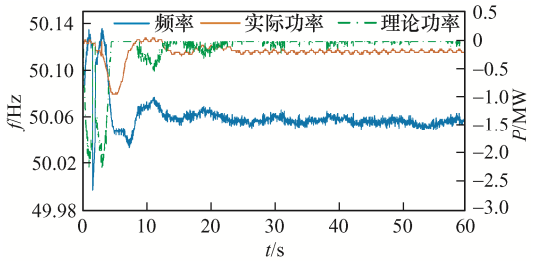


图 5 场站 2 一次调频实测曲线

Fig. 5 Measured curves of primary frequency regulation for No. 2 station

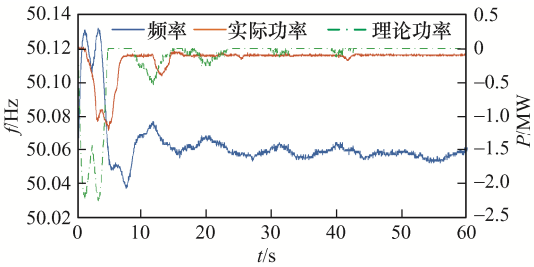


图 6 场站 3 一次调频实测曲线

Fig. 6 Measured curves of primary frequency regulation for No. 3 station

表 1 新能源场站一次调频参数

Tab. 1 Primary frequency regulation parameters of renewable energy stations

场站	一次调频死区/Hz	一次调频限幅	调差率/%
场站 1	±0.10	≥10%P_{N}	2
场站 2~场站 3	±0.06	≥10%P_{N}	3

的理论时间也不同，其中场站 1 调频时间不足 4 s，场站 2~场站 3 调频时间近 60 s。图中的功率均指频率扰动期间的功率调整量。

依据式(2)~式(4)对故障后场站一次调频期间数据进行分析计算，结果见表 2。由表 2 可得出，依据当前测试方法，3 个场站均满足目前的模拟实际电网频率扰动测试要求。但是，从实际功率响应曲线来看，场站 1 由于自身调频的延时作用，在频率故障最严重时刻未调整到位，反而在频率恢复后存在超调现象，超调量远远大于功率调节理论值，且场站 2 和场站 3 的出力响应合格率均较低，在频率值波动最大时并不能最大程度地进行补偿，而是依靠频率近似正常时持续过补偿，抬高调频期间的

积分电量合格率，使得场站测试合格。

表 2　一次调频性能指标计算结果

Tab. 2 Calculation results of primary frequency regulation performance indexes

场站	$\Delta P_{\%}$/%	$Q_{\%}$/%	G_{H}/%
场站 1	86.67	50.88	68.78
场站 2	35.92	93.71	64.82
场站 3	48.92	77.98	63.45

综合上述分析可以得出，现行测试评价方法应用于实测数据分析时，无法评估新能源场站的动态调节性能，即体现场站调频通信时延、单机启动时间差异等特征。对此，有必要对现有的测试与评价方法进行改进，以准确评估场站频率支撑性能，保障系统安全稳定运行。

2　基于实测数据的场站一次调频性能评价方法

2.1　一次调频性能分段评价方法

从现场一次调频实测波形(图4~图6)可以看出，虽然光伏电站通过电力电子装置并网，不具备转动惯量，但在实际测试中由于一次调频系统通信的延时和大量逆变器启动的先后不一致性，导致了光伏电站的功率响应出现了一定的“负惯性”，这种“惯性”与电站容量大小、逆变器数量和一次调频系统的通信能力相关。而当前的调频性能评价方法无法表征该特性，为此，本文对现有评价方法进行改进，具体如下。

首先，为了充分确保电网频率在实际变化过程中，新能源场站的有功出力和积分电量在整个调节过程中能满足电网调节的需求，不再仅以一次调频合格率作为评判依据，应以出力响应合格率和积分电量合格率结果相结合的方式进行评定。

其次，为了准确描述一次调频响应过程中的动态特征，依据场站调频动态性能，对实测数据进行分段分析与评价。参照 GB/T 40595—2021《并网电源一次调频技术规定及试验导则》，新能源场站的一次调频动态性能测试是通过阶跃扰动试验来实现的，技术指标包含响应滞后时间 t_1、上升时间 t_2、调节时间 t_3 等，各指标示意如图 2 所示。为说明各技术指标的含义，本文以集中式光伏场站调频架构为例，阐述新能源场站一次调频控制链路机理，调频架构如图 7 所示。新能源场站一次调频控制流程一般为一次调频控制器通过直接采集场站并网点二次侧电压与电流，计算出频率与功率等信息，然后根据内部一次调频控制策略计算出有功功率调整值并下发各发电单元。为减少站内通信时间，部分地区电站将常规通信方式升级为 GOOSE 高速通信，并采用一次调频装置直接控制发电单元的方式，进一步提升了新能源场站一次调频性能。

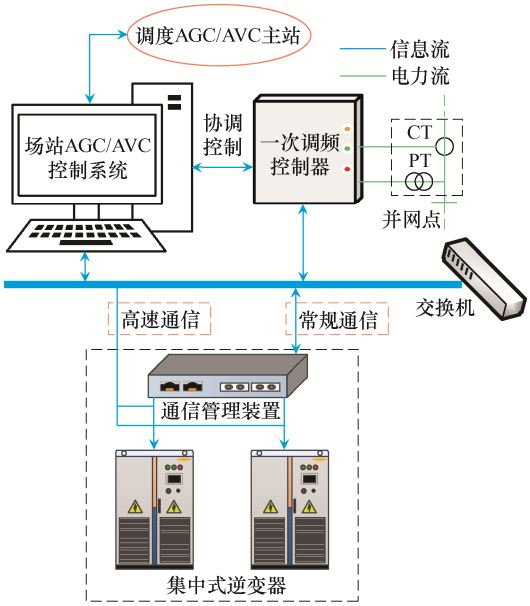


图 7　光伏电站典型调频架构

Fig. 7 Typical frequency regulation architecture of PV power station

根据一次调频控制机理可以看出，场站调频响应滞后时间 t_1 主要由一次调频装置的控制指令出口时间、站内通信时间与单机自身控制时间组成；上升时间 t_2 主要是由各单机控制时延差异、通信信道阻塞导致的[15]。可以看出 t_1+t_2 时间段主要体现场站一次调频响应初始的动态特性，故以此为第一段，定义为自频率超出调频死区开始，至有功功率调节量达到调频目标值与初始功率之差的 90%时所需时间，该段判据 F_1 为

$$\begin{cases} F_1=(\Delta P_{1\%}>60\%)\cap(Q_{1\%}>60\%) \\ \quad t_0\leqslant t\leqslant t_1+t_2 \\ \Delta P_{1\%}=\dfrac{\Delta P_{\mathrm{Smax1}}}{\Delta P_{\mathrm{Emax1}}}\cdot 100\% \\ \Delta P_{\mathrm{Smax1}}=\max[P_{\mathrm{S}}(t)-P_0] \\ \Delta P_{\mathrm{Emax1}}=-P_{\mathrm{N}}\cdot\dfrac{\max\Delta f(t)}{f_{\mathrm{N}}}\cdot\dfrac{1}{K_{\mathrm{c}}} \\ |\Delta P_{\mathrm{E}}|\leqslant K_{\mathrm{p}}P_{\mathrm{N}} \\ Q_{1\%}=\dfrac{Q_{\mathrm{S1}}}{Q_{\mathrm{E1}}}\cdot 100\% \\ Q_{\mathrm{S1}}=\pm\int_{t_0}^{t_1+t_2}[P_{\mathrm{S}}(t)-P_0]\mathrm{d}t/3\ 600 \\ Q_{\mathrm{E1}}=\int_{t_0}^{t_1+t_2}\Delta P_{\mathrm{E}}(t)\mathrm{d}t/3\ 600 \end{cases} \tag{5}$$

调节时间 t_3 主要受一次调频控制步长与调频参数影响，即体现的是场站一次调频的控制性能。考虑到实际频率扰动不同于阶跃扰动，场站实际调频时间与 t_3 不相等，又因本文所提方法主要应用于实测数据分析，故以场站实际调频调节时间为第二段，定义为自有功功率调节量达到调频目标值与初始功率之差的 90%开始，至有功功率达到稳定(功率波动不超过额定出力±1%)的最短时间，该段判据 F_2 为

$$\begin{cases} F_2=(\Delta P_{2\%}>60\%)\bigcap(Q_{2\%}>60\%) \\ \quad t_1+t_2\leqslant t\leqslant t_3 \\ \Delta P_{2\%}=\dfrac{\Delta P_{\mathrm{Smax2}}}{\Delta P_{\mathrm{Emax2}}}\cdot 100\% \\ \Delta P_{\mathrm{Smax2}}=\max[P_{\mathrm{S}}(t)-P_0] \\ \Delta P_{\mathrm{Emax2}}=-P_{\mathrm{N}}\cdot\dfrac{\max\Delta f(t)}{f_{\mathrm{N}}}\cdot\dfrac{1}{K_{\mathrm{c}}} \\ |\Delta P_{\mathrm{E}}|\leqslant K_{\mathrm{p}}P_{\mathrm{N}} \\ Q_{2\%}=\dfrac{Q_{\mathrm{S2}}}{Q_{\mathrm{E2}}}\cdot 100\% \\ Q_{\mathrm{S2}}=\pm\int_{t_1+t_2}^{t_3}[P_{\mathrm{S}}(t)-P_0]\mathrm{d}t/3\ 600 \\ Q_{\mathrm{E2}}=\int_{t_1+t_2}^{t_3}\Delta P_{\mathrm{E}}(t)\mathrm{d}t/3\ 600 \end{cases} \tag{6}$$

最后，根据 2 段的出力响应合格率与积分电量合格率计算结果，若均不小于 60%，则认为该场站一次调频性能合格，反之不合格，总判据 F 为

$$F=F_1\cap F_2 \tag{7}$$

需要说明的是，本文所提的基于实测数据的场站一次调频性能分段评价方法需依据场站阶跃扰动试验中的测试结果，即响应滞后时间 t_1 与上升时间 t_2，对实测数据进行分段，实现基于实测数据的场站一次调频分析与性能评估。

2.2 一次调频性能评价流程

根据 2.1 节中对现有一次调频测试评价方法的改进思路，形成一次调频性能分段评价流程，如图 8 所示。可以看出，本文通过对测试数据分段评价，以描述一次调频在各时段的动作表现，并要求同时满足出力响应与积分电量指标，从而实现场站一次调频性能的全过程评估，弥补现行主动测试评价方法应用于实测数据时的不足。

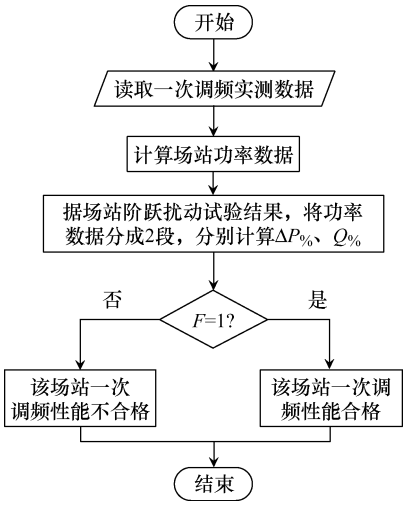


图 8 一次调频分段评价流程

Fig. 8 Segmented evaluation process of primary frequency regulation

3 算例分析

考虑到本文所提的新能源场站一次调频性能评价方法需依靠场站调频动态性能进行分段，故选取 2 个调频动态性能指标已知的场站 4 与场站 5 来验证所提方法的有效性。场站 4 与场站 5 的阶跃扰动测试结果见表 3，按照 2.1 节给出的分段评价方法，可得出场站 4 第一段选取 5.28 s 测试数据，第二段选取 54.72 s 测试数据；场站 5 第一段选取 1.45 s 测试数据，第二段选取 58.55 s 测试数据。

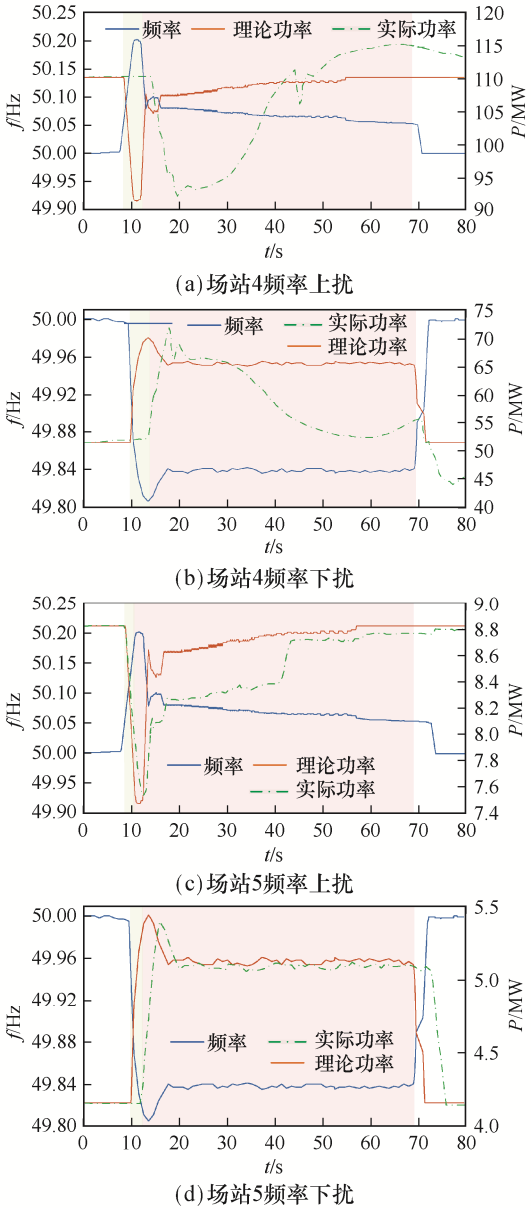
表 3　场站阶跃扰动测试结果

Tab. 3 Test results under step disturbance at the station

场站	t_1/s	t_2/s
场站 4	1.96	3.32
场站 5	0.43	1.02

场站 4 与场站 5 在频率上扰与下扰测试时的实测波形如图 9 所示。分别运用已有一次调频评估方法[12-13]与所提方法对场站 4 与场站 5 进行一次调频性能评估，评估结果见表 4 和表 5。可以得出，应用现有测试评价方法时，场站 4 与场站 5 在 2 种扰动测试下调频性能均合格，且部分测试工况下调频性能指标远高于合格线。但是，从测试波形来看，场站 4 的响应滞后时间约为 5 s，且在频率平稳时，有功出力波动与超调现象明显，超调量基本达到理论值的 2 倍，积分电量从整个频率扰动期间来看数值合理，但如果分段来看，部分时段存在负补偿现象。场站 5 尽管调频延时较小，但从其下扰测试曲线可以看出，场站 5 在频率扰动平稳时存在功率输出不足的情况。而从本文所提分段评价方法的判定结果可以看出，所提方法在第一段能够描述出场站调频延时与单机启动时间差异的特征，第二段能够描述出场站调频的控制性能。采用所提方法后，场站 4 与场站 5 均存在不合格情况，与实际现象较为吻合。

综合算例分析可以得出，本文提出的基于实测数据的场站一次调频性能评价方法能够更精确、更全面地反映新能源场站一次调频响应的实际情况，通过大量新能源场站一次调频测试数据对该判定方法进行精确验证后，可对新能源场站一次调频功能入网检测与在线评估工作提供一定的参考。



(a)场站4频率上扰　(b)场站4频率下扰　(c)场站5频率上扰　(d)场站5频率下扰

图 9　场站频率扰动测试曲线

Fig. 9 Frequency disturbance test curves for stations

表 4　场站 4 一次调频性能对比评价结果

Tab. 4 Comparative evaluation results of primary frequency regulation for No. 4 station

扰动类型	评价方法	数据段	$\Delta P_{\%}$/%	$Q_{\%}$/%	G_{H}/%	是否合格
上扰	文献[12-13]	—	89.34	193.64	141.49	是
	所提方法	第一段	0	0	—	否
		第二段	105.34	216.99	—	是
下扰	文献[12-13]	—	107.22	32.16	69.69	是
	所提方法	第一段	1.68	0.22	—	否
		第二段	117.22	52.48	—	否

表 5 场站 5 一次调频性能对比评价结果

Tab. 5 Comparative evaluation results of primary frequency regulation for No. 5 station

扰动类型	评价方法	数据段	$\Delta P_{\%}$/%	$Q_{\%}$/%	G_{H}/%	是否合格
上扰	文献[12-13]	—	85.21	300.19	192.70	是
	所提方法	第一段	81.08	87.58	—	是
		第二段	85.21	317.57	—	是
下扰	文献[12-13]	—	83.42	88.62	86.02	是
	所提方法	第一段	2.69	0.60	—	否
		第二段	83.42	92.83	—	是

4 结语

为了解决现有一次调频测试评价方法应用于实测数据分析时，不能准确反映与评估场站一次调频动态性能的问题，本文提出一次调频分段评价方法。测试结果表明，所提方法能够准确反映一次调频全过程性能表现，为新能源场站一次调频测试与评价方法提供可选方案。

参考文献：

[1] 刘洋, 林英明, 余达, 等. 构网型虚拟同步化光储并网系统的频率支撑策略[J]. 电源学报, 2025, 23(3): 152-161.
Liu Yang, Lin Yingming, Yu Da, et al. Frequency support strategy for grid-forming virtual synchronization PV-storage grid-connected system [J]. Journal of Power Supply, 2025, 23(3): 152-161. (in Chinese)

[2] 袁小明, 何维. 动态过程的幅频调制统一本质与系统稳定问题分类及新能源发电构网能力创新[J]. 电源学报, 2021, 19(6): 1-9.
Yuan Xiaoming, He Wei. Amplitude/frequency as prerequisites of operation and thus classification of stability problems and capability opportunities for new generations [J]. Journal of Power Supply, 2021, 19(6): 1-9. (in Chinese)

[3] 刘纯, 马烁, 董存, 等. 欧洲 3·20 日食对含大规模光伏发电的电网运行影响及启示[J]. 电网技术, 2015, 39(7): 1765-1772.
Liu Chun, Ma Shuo, Dong Cun, et al. Review and experiences of the European solar eclipse's impact on power grid operation with significant PV generation [J]. Power System Technology, 2015, 39(7): 1765-1772. (in Chinese)

[4] 郑超, 王士元, 张波琦, 等. 光伏高渗透电网动态频率特性及应对措施[J]. 电网技术, 2019, 43(11): 4064-4073.
Zheng Chao, Wang Shiyuan, Zhang Boqi, et al. Dynamic frequency characteristics and countermeasures of power grid with highly penetrated photovoltaics [J]. Power System Technology, 2019, 43(11): 4064-4073. (in Chinese)

[5] 刘翔宇, 李晓明, 朱介北, 等. 新型电力系统的频率响应模型综述及展望[J]. 南方电网技术, 2022, 16(10): 38-47.
Liu Xiangyu, Li Xiaoming, Zhu Jiebei, et al. Review and prospect on frequency response models of new power system [J]. Southern Power System Technology, 2022, 16(10): 38-47. (in Chinese)

[6] 陈国平, 李明节, 许涛, 等. 关于新能源发展的技术瓶颈研究[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(1): 20-27.
Chen Guoping, Li Mingjie, Xu Tao, et al. Study on technical bottleneck of new energy development [J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(1): 20-27. (in Chinese)

[7] 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. (in Chinese)

[8] 李明节. 大规模特高压交直流混联电网特性分析与运行控制[J]. 电网技术, 2016, 40(4): 985-991.
Li Mingjie. Characteristic analysis and operational control of large-scale hybrid UHV AC/DC power grids [J]. Power System Technology, 2016, 40(4): 985-991. (in

Chinese)

[9] 赵强, 张丽, 王琦, 等. 系统负荷频率特性对电网频率稳定性的影响[J]. 电网技术, 2011, 35(3): 69-73.
Zhao Qiang, Zhang Li, Wang Qi, et al. Impact of load frequency characteristics on frequency stability of power systems [J]. Power System Technology, 2011, 35(3): 69-73. (in Chinese)

[10] 马进, 赵大伟, 钱敏慧, 等. 大规模新能源接入弱同步支撑直流送端电网的运行控制技术综述[J]. 电网技术, 2017, 41(10): 3112-3120.
Ma Jin, Zhao Dawei, Qian Minhui, et al. Reviews of control technologies of large-scale renewable energy connected to weakly-synchronized sending-end DC power grid [J]. Power System Technology, 2017, 41(10): 3112-3120. (in Chinese)

[11] 毛荀, 占勇, 刘敏, 等. 基于先导节点选取下优化下垂控制的孤岛运行微电网负荷功率分配方法[J]. 电源学报, 2023, 21(1): 126-132.
Mao Xun, Zhan Yong, Liu Min, et al. Load power distribution method of islanding microgrid with optimal droop control based on the selection of pilot nodes [J]. Journal of Power Supply, 2023, 21(1): 126-132. (in Chinese)

[12] 孙骁强, 刘鑫, 程林, 等. 基于多调频资源协调控制的西北送端大电网新能源快速频率响应参数设置方案[J]. 电网技术, 2019, 43(5): 1760-1765.
Sun Xiaoqiang, Liu Xin, Cheng Lin, et al. Parameter setting of rapid frequency response of renewable energy sources in northwest power grid based on coordinated control of multi-frequency regulation resources [J]. Power System Technology, 2019, 43(5): 1760-1765. (in Chinese)

[13] 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. (in Chinese)

[14] 张建, 夏烈, 徐亮辉, 等. 基于最小鉴别信息组合赋权法的光伏发电单元综合评价技术研究[J/OL]. 电源学报, 2022: 1-12. (2022-12-30)[2023-01-03]. https://link.cnki.net/urlid/12.1420.TM.20221229.1327.001.
Zhang Jian, Xia Lie, Xu Lianghui, et al. Research on comprehensive evaluation technology of photovoltaic power generation unit based on combined weighting method of minimum discriminant information [J/OL]. Journal of Power Supply, 2022: 1-12. (2022-12-30)[2023-01-03]. https://link.cnki.net/urlid/12.1420.TM.20221229.1327.001. (in Chinese)

[15] 王淑超, 孙光辉, 俞诚生, 等. 光伏发电系统级快速功率调控技术及其应用[J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(21): 6254-6263, 6487.
Wang Shuchao, Sun Guanghui, Yu Chengsheng, et al. Photovoltaic power generation system level rapid power control technology and its application [J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(21): 6254-6263, 6487. (in Chinese)



包斯嘉

作者简介：

包斯嘉(1982—)，男，硕士，高级工程师。研究方向：新能源发电试验与检测。E-mail：baosijia@epri.sgcc.com.cn。

施志明(1996—)，男，通信作者，硕士，助理工程师。研究方向：新能源发电试验与检测。E-mail：shizhiming928@163.com。

张建(1994—)，男，硕士，助理工程师。研究方向：新能源发电试验与检测。E-mail：1508172476@qq.com。

张军军(1982—)，男，博士，研究员级高级工程师。研究方向：新能源发电试验与检测。E-mail：zhangjunjun@epri.sgcc.com.cn。

(责任编辑：郭凯凯)