

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.241009

基于熵权-TOPSIS模型的构网型储能性能评估系统的开发测试

魏于凯, 贺春, 陈卓, 李宗原, 郭寅远

(许昌开普检测研究院股份有限公司, 河南 许昌 461000)

摘要: 针对构网型储能(grid-forming energy storage, GFES)市场的快速发展和产品质量的不均衡性, 提出了一种基于熵权-TOPSIS (technique for order preference by similarity to an ideal solution)模型的 GFES 系统性能评估方法, 设计并开发了融合产品性能测试与多维度评价的 GFES 评估系统平台。首先, 选取惯量支撑、一次调频、低电压穿越和能量转换 4 项关键性指标作为 GFES 性能评估体系, 并给出了相应的测试方法和量化指标。然后, 详细介绍了测试评估系统的硬件环境和软件平台, 通过简化传统的人工测试方法提高检测效率。最后, 利用 GFES 的实测波形作为样本数据对评估系统平台进行实验验证, 并通过对不同类型和功率等级的 GFES 进行量化对比分析, 证明了评估系统检测的准确性和评价体系模型的有效性, 为推动 GFES 技术的应用和发展提供了有力的支撑。

关键词: 熵权-TOPSIS 模型; 构网型储能; 指标体系; 性能检测; 评估系统

Development and testing of grid forming energy storage performance evaluation system based on entropy-weight TOPSIS model

WEI Yukai, HE Chun, CHEN Zhuo, LI Zongyuan, GUO Yinyuan

(Xuchang KETOP Testing Research Institute Co., Ltd., Xuchang 461000, China)

Abstract: In response to the rapid development of the grid forming energy storage (GFES) market and the inconsistency in product quality, this paper proposes a performance evaluation method for GFES based on the entropy-weight TOPSIS (technique for order preference by similarity to an ideal solution) model. A GFES evaluation system platform that integrates product testing and multi-dimensional evaluation is designed and developed. First, four key indicators are selected to construct the performance evaluation system for GFES, including inertia support, primary frequency regulation, low-voltage ride through, and energy conversion. Corresponding testing methods and quantitative indicators are provided. Then, the hardware environment and software platform of the testing and evaluation system are introduced in detail, and the detection efficiency is improved by simplifying traditional manual testing methods. Finally, real waveform from GFES are used as sample data to experimentally verify the evaluation system platform, and a quantitative comparative analysis is conducted across different GFES types and power levels, demonstrating the accuracy of the evaluation system and the effectiveness of the evaluation model. The system provides strong support for the advancement and adoption of GFES technologies.

This work is supported by the Scientific and Technological Project of Henan Province (No. 232102240102).

Key words: entropy-weight TOPSIS model; GFES; indicator system; performance testing; evaluation system

0 引言

随着全球能源结构的转型和对可持续能源需求的不断增长, 构网型储能(grid-forming energy storage,

GFES)作为构建新型电力系统的关键技术之一, 其重要性日益凸显^[1-3]。GFES 不仅能够为新型电力系统提供必要的电网支撑服务, 如频率调节、电压支撑和电能质量改善^[4], 还在促进可再生能源的整合和提高电网的可靠性方面发挥着重要作用^[5-6]。然而, 随着 GFES 技术的快速发展和市场应用的不断扩展,

基金项目: 河南省科技攻关项目资助 (232102240102)

如何准确评估其性能成为了一个亟待解决的问题。

目前,对 GFES 的性能研究大多集中于优化控制方面。文献[7]以调频为控制目标,应用模型预测控制(model predictive control, MPC)对储能系统的输入功率进行自适应控制,进一步改善了扰动时的系统频率响应;文献[8]针对构网型并网逆变器容易产生暂态失稳的问题,分析了单电压环构网型逆变器关键控制参数对暂态稳定性的影响,刻画了功角的暂态响应特性,给出了减小有功和无功下垂系数的参数优化方法;文献[9]提出了考虑系统频率稳定性与小干扰稳定性的 GFES 参数优化策略,建立了相应的目标函数与优化模型;文献[10]深入研究了针对直接电压控制构网型变流器暂态失稳模式的控制参数对暂态稳定的影响,为指导控制参数的优化整定提供了重要参考;文献[11]开发了适用于 GFES 的移动式调试平台,为满足快速响应需求,提出了一种复合控制策略,实现了惯量调节、一次调频等运行工况。

尽管以上文献从不同角度探讨了提升 GFES 性能的方法,但它们往往侧重于特定技术或策略的改进,而忽视了对这些改进效果进行客观评价的标准化测试方法。这可能导致性能提升的评估结果受到主观判断的影响,缺乏普遍性和可比性。文献[12-13]基于某次 GFES 并网性能现场测试,系统阐述了电网适应性、低电压穿越、惯量响应及充放电转换等测试方法,并对结果进行了分析。然而,该文献仅呈现了特定测试项目的结果,并未构建评价指标体系对结果进行量化评估,也缺乏不同 GFES 系统间的对比分析。文献[14]基于构建的跟网型和构网型变流器仿真模型,提出了一套构网型新能源并网性能指标及其测试方法。然而,其研究仅通过仿真验证,且仅定量评估了电压和频率支撑性能,缺乏对 GFES 在实际运行中不同工况下的综合指标评估。文献[15]采用 AHP-CRITIC 法建立了一套针对大规模新能源接入电网性能指标评价体系,考虑了接入水平、承载水平等多个维度的指标体系,但该体系并未涉及 GFES 的性能测试。

可以看出,在现有文献中,对 GFES 并网性能的研究主要集中在测试方法的改进和结果分析上,缺乏对测试结果的深入评价和对不同 GFES 系统间的综合对比分析。因此,本文开发了一种基于熵权-TOPSIS 模型的 GFES 性能评估系统,优化了 GFES 评价指标体系。该体系不仅考虑了关键性评估参数,还纳入了反映 GFES 不同类型和功率等级的指标,从而使评估结果更符合实际。另外,熵权-TOPSIS 模型的应用不仅能够提供综合的评估结

果,还能够分解出各个指标的贡献度,这对于理解 GFES 的性能和优化方向提供了更丰富的信息。

综上,本文首先选取惯量支撑、一次调频、低电压穿越和能量转换效率等 4 项关键性指标和 GFES 的额定电压、功率等级作为性能评估体系,并给出了相应的测试方法和量化指标;然后详细介绍了测试评估系统的硬件环境和软件平台;最后利用 GFES 的实测波形作为样本数据对评估系统平台进行了实验验证,并通过对不同类型的 GFES 进行量化对比分析,证明了评估系统检测的准确性和评价体系模型的有效性,为 GFES 技术的进一步发展和优化提供了理论依据和实践指导。

1 构网型储能技术性能测试评估方法

1.1 构网型储能性能测试指标

当前储能变流器(power conversion system, PCS)主要有两种控制技术:跟网型(grid-following, GFL)控制技术和构网型(grid-forming, GFM)控制技术^[6]。与跟网型储能技术的电流源特性最大的不同是,构网型储能系统本质为电压源,具有频率调节和电压控制的能力,使其可以像同步发电机一样提供惯量支撑^[7]。因此可选取惯量支撑和一次调频两项指标作为 GFES 测试的关键性指标,这也是评价 GFES 性能优劣的主要参数。

除 GFES 应具备的基础性能指标外,低电压穿越(low voltage ride through, LVRT)能力是衡量储能系统能否并网的必测指标。低电压穿越能力,即当电网发生故障时,储能系统需维持一段时间与电网连接而不解列,甚至要求储能系统在这一过程中能够提供无功功率以支持电网电压的恢复^[8]。若 GFES 不具备该能力,在电网发生故障时电压突然跌落,PCS 的快速脱网会导致电网失去部分或全部的发电能力,从而加剧电网的不稳定性,尤其是在含有高比例新能源的配电网系统,这可能导致电压进一步下降,甚至电网崩溃。

另外,除要求储能变流器具备并网性能外,能量转换效率更是确保 GFES 实现高效能量转换的核心指标。能量转换效率的高低,从一定角度反映了 PCS 优化控制策略的先进性和整体 GFES 系统设计时的精细化程度。

因此,本文选取惯量支撑、一次调频、低电压穿越能力和能量转换效率 4 项关键指标构建 GFES 性能指标体系。尽管功率控制、电压适应性、频率适应性以及充放电转换时间等其他测试指标未被直接纳入评估参数,但这些指标在 4 项关键指标的实际测试过程中会得到间接体现。这种聚焦核心指标

的方式, 有助于在优化指标体系的基础上获得更直接、准确的评估结果。

具体 4 项关键性指标的测试过程如下。

1) 惯量支撑性能

GFES 惯量支撑测试分重载、轻载功率两种情况, 一般重载功率为 $0.8P_N$, 轻载功率为 $0.3P_N$ (P_N 为系统额定功率)。在进行惯量响应测试时, 需关闭一次调频功能。设置电网输出频率测试曲线如图 1 所示, 频率变化率保持 0.5 Hz/s , t_3 至 t_4 时间段频率至少维持 2 min 不变, t_1 至 t_2 、 t_5 至 t_6 两个时间段的频率均需维持 1 min 不变。

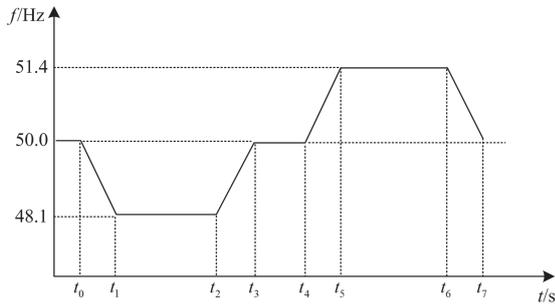


图 1 测试曲线

Fig. 1 Test curves

通过采集 PCS 交流侧电压、电流数据, 计算响应于惯量的有功功率响应时间 T_r^G 和调节时间 T_c^G 。响应时间为 PCS 检测到系统频率变化时, 储能输出功率至功率响应增量 90% 所需的时间; 调节时间是指从功率响应起始时刻开始, 到功率输出达到目标值时, 功率输出偏差在 $\pm 1\%P_N$ 稳定范围内的时间。

$$\begin{cases} \Delta_p = \frac{(P_0 + \Delta P_g^G) - P_{\text{mes}}}{P_N} \times 100\% \\ \Delta P_g^G = -\frac{T_j}{f_N} \times \frac{df}{dt} \times P_N \end{cases} \quad (1)$$

式中: Δ_p 为功率输出偏差; P_0 为储能初始功率; ΔP_g^G 为功率响应增量; P_{mes} 为实际测量储能功率稳定时间内的平均值; f 为储能变流器交流端口检测到的频率; T_j 为惯性时间常数, 可在 $4\sim 14 \text{ s}$ 范围内取值; f_N 为系统额定频率。

在稳定运行状态下, 储能系统功率控制程度可由功率控制精度 δ^G 表示, 如式(2)所示。

$$\delta^G = \left| \frac{P_{\text{mes}} - P_0 - \Delta P_g^G}{\Delta P_g^G} \right| \quad (2)$$

2) 一次调频性能

一次调频性能测试需要从系统额定频率(一般

取 50 Hz)开始分别进行暂降、暂升测试。测试频率的阶跃点见表 1。

表 1 频率测试点

Table 1 Frequency test points

频率暂降 f/Hz	48.60	49.80	49.90	49.95
频率暂升 f/Hz	50.05	50.10	50.20	50.40

通过采集 PCS 交流侧电压、电流数据, 计算一次调频响应的响应时间 T_r^F 、调节时间 T_c^F 。功率响应增量 ΔP_g^F 、功率控制精度 δ^F 如式(3)所示。

$$\begin{cases} \Delta P_g^F = -\frac{1}{\delta} \times \frac{\Delta f}{f_N} \times P_N \\ \delta^F = \left| \frac{P_{\text{mes}} - P_0 - \Delta P_g^F}{\Delta P_g^F} \right| \end{cases} \quad (3)$$

式中: δ 为一次调频调差率; Δf 为当前检测频率与额定频率 f_N 的偏差。

3) 低电压穿越性能

LVRT 可分为三相对称故障和不对称故障, 其性能测试与惯量支撑测试相似, 分轻载、重载两种情况。通常情况下, 三相对称故障是构网型储能系统的主要工况, 因此以三相对称故障测试为主。故障穿越电压跌落点可选取额定电压 U_N 的 0% 、 20% 、 40% 、 60% 和 80% , 跌落时间按照图 2 曲线进行选取。

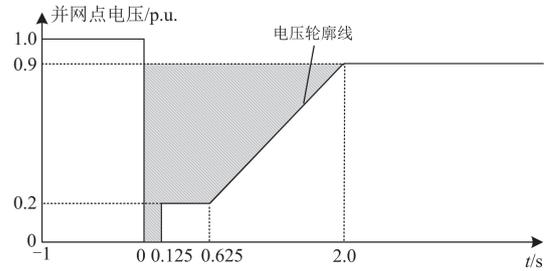


图 2 低电压穿越曲线

Fig. 2 Curves of low voltage ride through

在电压跌落期间, GFES 需具有动态无功功率支撑能力, 动态无功电流增量 ΔI 需满足式(4)。

$$\Delta I = K \times (C - U_t) \times I_N \quad (0 \leq U_t \leq C) \quad (4)$$

式中: K 为比例系数, 取值范围为 $1.5\sim 3$; C 为常数, 不同额定电压取值不同; U_t 为 PCS 交流端口实际电压与额定电压比值; I_N 为系统额定输出电流。

在电网电压跌落的瞬间, GFES 检测到系统电压变化, 开始发出动态无功电流增量 ΔI 。计算从电压跌落起, 至 GFES 输出无功电流 $90\% \Delta I$ 时的响应时间 T_r^I 和输出 $100\% \Delta I$ 稳定时的调节时间 T_c^I 。计算

GFES 输出动态无功电流增量的控制偏差 Δ_I ，如式(5)所示。

$$\Delta_I = \left| \frac{(I_0 + \Delta I)}{I_N} - 1 \right| \times 100\% \quad (5)$$

式中： I_0 为 GFES 在电压跌落前正常运行时的无功电流。

另外，还要求 GFES 有功功率在故障清除后能快速恢复，自故障清除时刻开始，GFES 需以一定的功率变化率 v_p 恢复至故障前的值，如式(6)所示。

$$v_p = \left| \frac{P_0}{P_N \cdot T_s} \right| \times 100\% \quad (6)$$

式中： T_s 为电网故障清除时 GFES 的有功恢复至故障前的持续时间。

4) 能量转换效率

在 GFES 以额定功率充电至充电终止条件的测试过程中，得到本次充电过程中直流端口、交流端口和外部辅助供电有功功率的平均值；然后在 GFES 以额定功率放电至放电终止条件的测试过程中，计算直流端口、交流端口和外部辅助供电有功功率的平均值。重复上述过程 N 次，计算充电转换效率 η_c 和放电转换效率 η_d ，如式(7)所示。

$$\begin{cases} \eta_c = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N \left(\frac{P_{DC}^c}{P_{AC}^c + P_{AU}^c} \right) \\ \eta_d = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N \left(\frac{P_{AC}^d}{P_{DC}^d + P_{AU}^d} \right) \end{cases} \quad (7)$$

式中： P_{DC}^c 、 P_{AC}^c 和 P_{AU}^c 分别为充电过程中直流端口、交流端口和外部辅助供电的有功功率； P_{DC}^d 、 P_{AC}^d 和 P_{AU}^d 分别为放电过程中直流端口、交流端口和外部辅助供电的有功功率。

1.2 熵权-TOPSIS 性能评估模型的构建

1) 性能指标体系

参考由中国电力企业联合会提出的国家标准《GB/T 34120—2023 电化学储能系统储能变流器技术要求》^[19]和电工技术协会发布关于构网型储能测试的团体标准《T/CES 244—2023 构网型储能系统并网测试规范》^[20]，并结合 1.1 节的分析，本文选取惯量支撑、一次调频、低电压穿越和能量转换效率 4 项关键性指标对 GFES 系统的并网性能进行综合评估。

另外，为综合评估不同设备型号之间的性能差异，还需考虑基础参数对设备性能的影响，如设备的额定电压、额定功率等级。额定电压直接影响设备的安全稳定性，还关系到整个系统的电压匹配问题，额定功率则反映了设备的输出能力和满载条件

下的工作状态。

性能评估体系如图 3 所示。

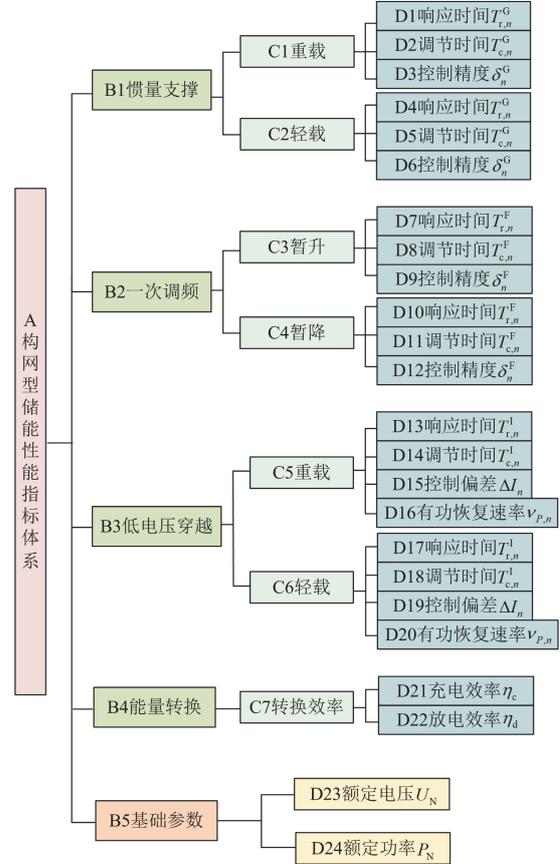


图 3 性能指标评价体系

Fig. 3 Performance indicator evaluation system

2) 评估模型

依据图 3 所示指标评价体系可知，在基于不同工况下或对不同储能型号设备进行测试得到性能参数之后，各种指标结果存在差异性，难以通过对比单个指标评估 GFES 系统的整体性能，因此需要对指标体系进行综合评价。

逼近理想解排序法(technique for order preference by similarity to an ideal solution, TOPSIS)是根据评价对象与理想化目标接近程度进行排序的一种综合评价方法^[21]。基本思想是通过设定正、负理想解，测算各样本与正、负理想解的距离，得到其与理想解的相对贴近度。鉴于本文旨在对 GFES 的性能进行评估，因此可以采用一种明确的设定方法来定义评估标准。可将负理想解设定为国家或行业标准中对于 GFES 性能的最低要求。这一标准反映了 GFES 必须满足的基本性能门槛，确保其安全、可靠地运行。与此同时，正理想解则可以设定为各评估指标所能达到的最优值，这一理想状态代表了 GFES 在

理论上的最佳性能。通过设定这一目标, 能够为评估提供清晰的方向, 激励相关技术的研究与开发, 以不断推动 GFES 向更高性能水平迈进。

此外, 鉴于各指标存在竞争关系且量纲不统一, 在对指标进行综合评价前, 需先对其进行归一化处理并赋予权重, 可采用熵权法(entropy weight method, EWM)^[22]。EWM 是基于信息熵的概念, 通过计算每个指标的信息熵和权重, 来确定各个指标的重要程度。并且 EWM 可以适应不同类型和功率等级 GFES 的动态变化, 通过实时更新权重, 提供动态的评估结果。

综上, EWM 在处理多源异构数据时的优势与 TOPSIS 在处理多属性决策问题上的有效性相结合, 为 GFES 性能评估提供了一种全面而精准的方法。

熵权-TOPSIS 模型的具体算法步骤如下所述。

(1) 首先构建 $m \times n$ 的评价矩阵, 其中 m 为评价方案个数, n 为评价指标个数。

(2) 对评价矩阵进行归一化处理, 使用 EWM 计算评价指标的权值。

$$\begin{cases} E_j = -\frac{1}{\ln(m)} \sum_{i=1}^m \frac{x_{ij} \ln(x_{ij})}{\sum_{i=1}^m x_{ij} \ln(x_{ij})} \\ w_j = \frac{1 - E_j}{\sum_{i=1}^n (1 - E_j)} \end{cases} \quad (8)$$

式中: x_{ij} 为第 i 个评价方案的第 j 个指标值; E_j 为第 j 个指标的信息熵; w_j 为第 j 个指标的权重。重新构造加权的标准化评价矩阵 X 。

(3) 设定正理想解 X^+ 与负理想解 X^- 。

$$\begin{cases} X^+ = (X_1^+, X_2^+, X_3^+, \dots, X_n^+) \\ X^- = (X_1^-, X_2^-, X_3^-, \dots, X_n^-) \end{cases} \quad (9)$$

(4) 计算评价方案与正理想解、负理想解的欧式距离 s_i^+ 、 s_i^- 。

$$\begin{cases} s_i^+ = \sqrt{\sum_{j=1}^n (x_{ij} - X_j^+)^2} \\ s_i^- = \sqrt{\sum_{j=1}^n (x_{ij} - X_j^-)^2} \end{cases} \quad (10)$$

(5) 计算相对贴近度。

$$D_i = \frac{s_i^-}{s_i^+ + s_i^-} \quad (11)$$

式中: D_i 是与理想解的相对贴近度, 即为各评价对象的综合评价得分, D_i 值越大, 证明性能越好。

2 评估系统的组成架构

评估系统由两部分组成: 硬件环境和软件平台。硬件环境是专门为测试 GFES 系统而设计的电

网模型, 包含三相交流模拟电源、直流模拟电源、负载模拟装置、数据采集系统以及一系列高精度传感器。软件平台则负责对硬件环境收集的测试数据进行深入的分析和计算, 包含通信系统、实时监控、用户界面和数据管理。

2.1 硬件环境搭建

搭建硬件拓扑结构如图 4 所示。图 4 中展示了搭建硬件环境的详细视图。直流源部分采用了可控直流电源供应器, 其最大输出功率可达 4 MW, 确保了强大的电力供应能力。电网模拟部分则采用了先进的可回收式交流模拟电源, 它不仅支持单相或三相输出, 还具备电压、频率及谐波的精确调节功能, 以模拟各种电网工况。此外, 高精度传感器被用于实时采集交、直流侧的电压、电流数据, 这些数据可以通过功率分析仪进行实时监控和采集, 为系统的稳定运行和精确测试提供有力的数据支持。信号发生、采集装置属于 GFES 的上位机系统, 制造商可将其用于控制 PCS 产生与测试项目相匹配的测试信号并记录设备运行状态, 从而便于评估其动态性能和稳定性。

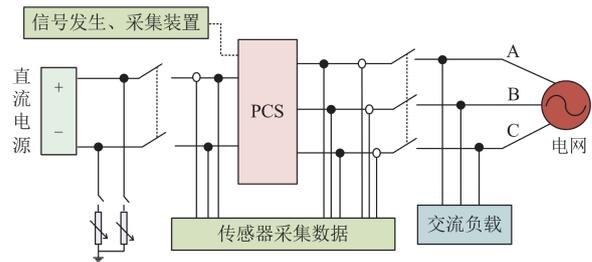


图 4 性能检测拓扑结构

Fig. 4 Topology structure for performance test

测试样品与硬件设备如图 5 所示^[23]。



图 5 测试样品与硬件设备

Fig. 5 Tested sample and hardware devices

测试所用的数据采集设备型号及精度如表 2 所示, 为避免测量设备误差, 测量设备均经过校准, 精度符合国标, 使用日期在校准有效时间内。

2.2 软件设计

软件设计的重点是数据处理, 对采集的波形进

行分析，并计算出相对应的指标。软件采用模块化编程，整体结构如图 6 所示。

表 2 数据采集装置

Table 2 Data acquisition equipment

设备名称	功率分析仪/示波器	电流传感器
型号	WTS5000/DL850	LEM/IT605-S
精度	—	0.03%

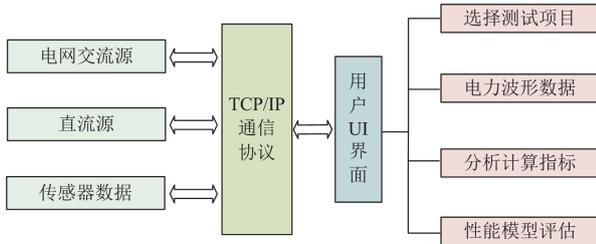


图 6 软件整体结构

Fig. 6 Software overall structure

软件应用程序采用 TCP/IP 通信协议与各个设备进行高效、稳定的数据交换。每台设备都拥有一个独立的 IP 地址，一旦通过以太网接口接入网络，便能自动建立连接。软件 APP 具备双重功能：一方面，它能够精确下发直流源和电网交流源的控制指令，根据不同测试项目的需求，灵活设置 GFES 系统的并网条件；另一方面，它能够实时采集传感器数据，记录详细的波形信息，并进行深入的分析和计算。

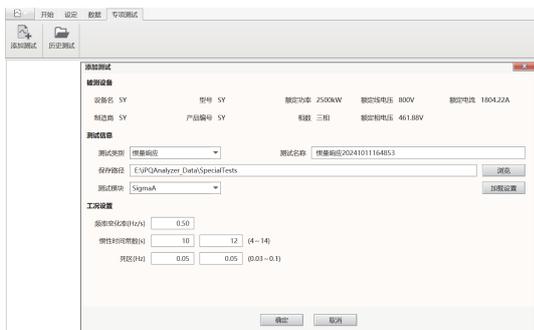
在完成所有预定的测试项目并计算出关键的评价指标之后，APP 软件能够对 GFES 系统进行性能评估，生成评估报告。

软件 UI 界面如图 7 所示。

3 实验验证

3.1 测试平台验证

首先，为确保性能评估系统对各种测试项目的性能指标分析计算的准确性，利用国内某知名 A 厂家生产的额定功率为 2.5 MW、额定电压为 800 V



(a) 测试项目选择



(b) 硬件设备控制

图 7 软件 UI 界面

Fig. 7 Software UI interface

的 GFES 系统的测试波形作为样本。采集样本数据时需固定采样率，防止数据传输和存储过程中的丢失或损坏。在导出波形数据时，软件系统可以剔除异常值并处理缺失数据。除此之外，还要求检测的环境条件(温度、湿度和气压)应符合标准规定范围。

为简化分析，将储能系统固定于放电模式，选取重载工况下的惯量支撑测试、一次调频暂降测试及轻载工况下的低电压穿越测试。为最大限度地降低测量误差，还需对 GFES 进行重复性测试，并对比人工分析与系统自动分析的结果。

1) 惯量支撑指标测试波形如图 8 所示。

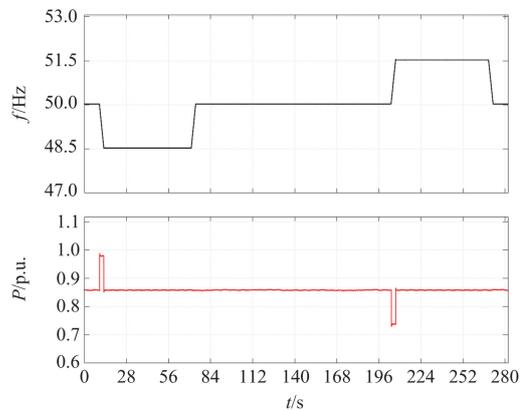


图 8 频率和有功功率波形

Fig. 8 Frequency and active power waveform

图 8 清晰地展示了设备惯量支撑性能响应特性。在第一阶段设置电网频率以 0.5 Hz/s 变化率下降时，设备立即响应，向电网释放有功功率以提供惯量支撑，直至电网频率稳定时，第一阶段惯量响应结束；在第一阶段电网频率上升至额定频率 50 Hz 阶段，设备不应动作。在第二阶段设置电网频率以 0.5 Hz/s 变化率上升时，该设备向电网吸收有功功率以提供惯量支撑；在第二阶段电网频率下降至额定频率 50 Hz 阶段，设备不应动作。设备的上述响应特性符合标准。具体设备的响应时间、调

节时间和功率控制精度如表 3 所示。

表 3 分析结果对比

Table 3 Comparison of analysis results

类型	响应时间/ms	调节时间/ms	控制精度/%
人工分析	99	102	1.52
系统分析	100	100	1.57

2) 一次调频的暂降测试波形如图 9 所示。

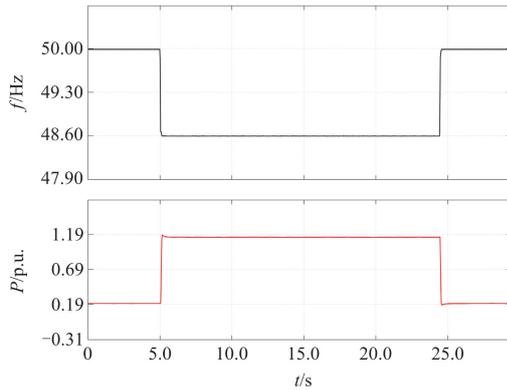


图 9 频率和有功功率波形

Fig. 9 Frequency and active power waveforms

从图 9 可以看出, 在第 5 s 时, 设置交流模拟电源频率从额定频率 50 Hz 阶跃至 48.60 Hz, 设备迅速反应, 发出约 $1.19 P_N$ 的有功功率抵抗电网频率下降。在该时刻, 有功功率输出出现超调, 随后波动稳定在 $\pm 1\% P_N$ 范围内。在大概 24 s 时设置电网频率恢复至额定频率, 设备有功功率也恢复至最初设置值。具体设备的响应时间、调节时间和功率控制精度如表 4 所示。

表 4 分析结果对比

Table 4 Comparison of analysis results

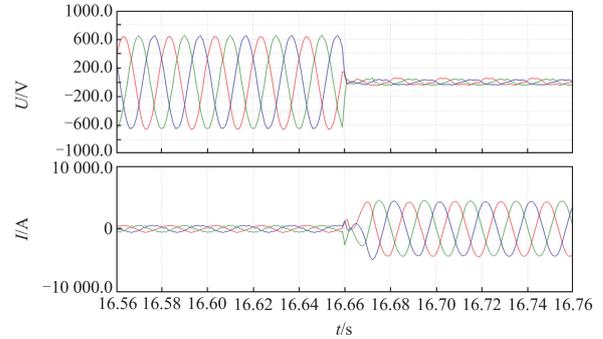
类型	响应时间/ms	调节时间/ms	控制精度/%
人工分析	102	124	0.82
系统分析	100	120	0.81

3) 轻载 $0.3P_N$ 设备低电压穿越至 $0\%U_N$ 测试波形如图 10 所示。

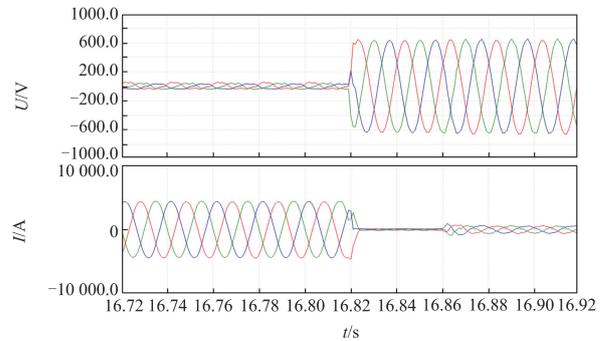
图 10 中显示了电网故障前后设备并网点电压、电流瞬时值变化情况。在开始时, 设备以 $0.3P_N$ 的有功功率稳定运行, 在大概 16.66 s 时, 设置电网电压跌落至 0 附近, 跌落持续时间为 0.125 s, 在此期间设备进行低电压穿越, 并发出动态无功功率支撑。无功电流动态响应情况见图 11。图 11 中 I^+ 、 I^- 和 I^0 分别为电流正序、负序、零序分量。具体设备发出无功电流的响应时间、调节时间、功率控制精度及故障结束后设备的有功恢复速率如表 5 所示。

通过对比表 3—表 5 的数据, 可以发现软件系

统自动分析的结果与人工手动分析的结果非常接近。两者之间的误差范围很小, 最小误差仅为 1.01%, 最大误差不超过 4.0%, 均低于 5% 的阈值。这一结果充分证明了软件系统在执行 GFES 系统测试项目时的设计是合理且有效的。



(a) 故障前



(b) 故障后

图 10 故障前后电压、电流瞬时值

Fig. 10 Instantaneous values of voltage and current before and after the fault

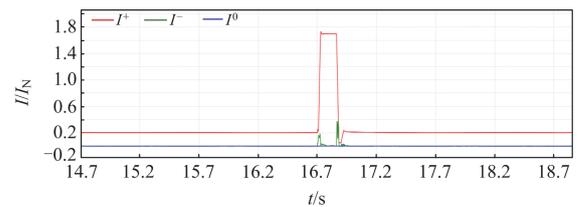


图 11 无功电流动态响应情况

Fig. 11 Dynamic response of reactive current

表 5 分析结果对比

Table 5 Comparison of analysis results

类型	响应时间/ms	调节时间/ms	控制精度/%	有功恢复速率/($\%P_N/s$)
人工分析	20	24	7.05	1569
系统分析	20	25	7.08	1565

此外, 软件系统的优势不仅体现在准确性上, 还显著提高了工作效率。它能够自动进行测试、数

据处理以及生成测试报告，从而大幅度减少人工分析所需的时间，节约了人力资源，缩短了测试周期，实现了高效、自动化的测试流程。

3.2 性能分析

为验证评估系统的全面性和通用性，本研究选取了另外3个厂家生产的GFES系统作为测试对象，编号分别为B、C、D，对A、B、C、D共4种GFES系统进行评估。各型号系统的额定电压与额定功率参数详见表6。其中A、B属于同一类型，C、D属于另一类型；且C与D的额定电压相同，但额定功率等级不同。

表6 构网型储能设备参数

Table 6 Parameters of grid-forming energy storage equipment

厂家	额定电压/V	额定功率/kW
A	800	2500
B	800	2500
C	690	2200
D	690	2000

首先使用EWM对表1中不同频率测试点的暂降、暂升分项指标以及低电压穿越 $0\%U_N$ 、 $20\%U_N$ 、 $40\%U_N$ 、 $60\%U_N$ 和 $80\%U_N$ 不同穿越深度的分项指标分配权重并进行综合计算。

经EWM归一化处理后最终得出4个厂家在性能评估体系中24项子指标对比情况，如图12所示。

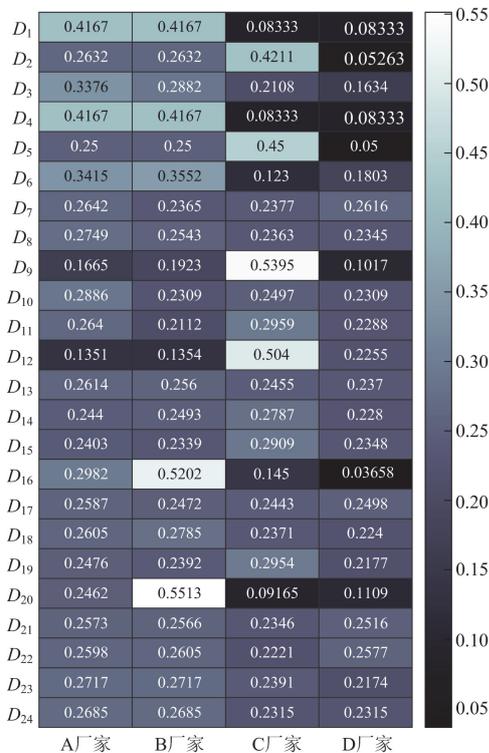


图12 评估体系量化指标

Fig. 12 Quantitative indicator for evaluation system

根据图12指标数据可以直观地看出，A、B厂家GFES系统因额定容量和电压等级相同，惯量支撑性能基本一致；一次调频与低电压穿越性能略有差异，主要体现在有功恢复速率上。相比之下，A、B厂家与C、D厂家系统性能差异显著，同时C、D厂家系统之间也存在明显区别，尤其表现在惯量支撑和一次调频方面。

若要进一步量化GFES系统性能，则需使用TOPSIS模型分别对惯量响应指标、一次调频指标、低电压穿越指标、转换效率指标和基础参数指标进行评价，得出以上各个指标的贡献度，评价结果见图13。但单个指标之间的对比并不足以全面反映GFES系统的综合性能。因此，还需对4个厂家A、B、C和D的储能系统进行整体性能评分，以期获得更为全面和客观的性能评估结果。具体的综合评分结果如表7所示。

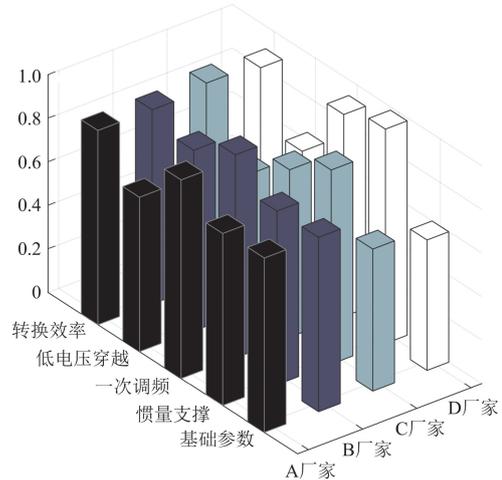


图13 指标评估结果

Fig. 13 Indicator evaluation results

表7 综合结果对比

Table 7 Comparison of comprehensive results

厂家	A	B	C	D
综合得分	0.7594	0.8128	0.7119	0.7978

由表7储能系统性能评估综合得分可知，B厂家的GFES系统性能最好，得分为0.8128(满分为1)，其次为D厂家，得分为0.7978，而C厂家则以0.7119的得分位列最后。该评估结果不仅凸显了B厂家在各项性能指标上的综合优势，也反映了C厂家在某些方面存在不足。另外，较低额定参数的D厂家之所以能够获得较高评分，得益于其在惯量支撑和低电压穿越能力方面的卓越表现，这些优势不仅提升了D厂家储能系统的可靠性和稳定性，也为电网的高效运行和新能源的深度融合提供了有力支持。

然而,相同额定参数的A和B厂家在某些性能指标上的表现相对较弱,可能与它们较高的额定电压、容量有关,还可能与控制策略或技术成熟度有关。例如,A厂家在一次调频性能上的表现不如B厂家,而B厂家在低电压穿越能力上又优于A厂家,但两者在这两项性能上又稍逊于D厂家。C厂家的惯量支撑性能虽然不如D厂家,但明显优于A、B厂家,C厂家主要劣势在于低电压穿越能力上的不足,导致了整体性能评分下降。

这些差异提示了各厂家在技术优化和系统升级方面还有进一步提升的空间。值得注意的是,虽然B厂家在整体性能上领先,但这并不意味着评分最低的C厂家的GFES不具备竞争力。在实际应用中,不同电网环境和运行条件下可能对储能系统的性能要求存在差异。因此,选择合适的储能系统不仅要考虑其整体性能,还要结合具体的应用场景和需求。

综上,结合图13和表7的评估结果,可以看出本文所构建的基于熵权-TOPSIS的GFES性能评估模型可为决策者提供一个全面且清晰的比较视角,有助于电网运营商和能源开发商根据各自的需求和条件,选择最合适的GFES系统。同时,该评估为厂家提供了宝贵反馈,指导其在后续研发与改进中更注重性能全面优化与技术创新。

4 结论

本文提出了一种基于熵权-TOPSIS的GFES系统性能评估模型,开发了融合产品测试与多维度评价的GFES评估系统平台,所得结论如下。

1) 通过GFES实测波形数据对比系统平台分析结果与人工手动计算结果,两者最大误差在4.0%以内,从而验证了软件系统设计的准确性、有效性;并且系统平台通过自动化测试流程,简化了传统的人工测试方法,显著提升了测试效率。这种效率的提升,对于快速响应市场变化和满足客户需求具有重要意义。

2) 通过建立含有惯量支撑、一次调频、低电压穿越和能量转换效率多个性能指标的评价体系,为GFES的综合性能评估提供了一套标准化和客观化的框架。该评价体系的应用,不仅能够从多个维度揭示GFES的潜在不足,还能帮助厂家深入理解产品的性能特点,指导厂家针对产品性能的不足进行优化。

未来研究可以探索集成更多与GFES性能相关的指标,构建一个更为全面的性能评价体系。此外还可以考虑将评价体系与优化算法相结合,提出更加智能化的性能评估方法。

参考文献

- [1] 王新宝,葛景,韩连山,等. 构网型储能支撑新型电力系统建设的思考与实践[J]. 电力系统保护与控制, 2023, 51(5): 172-179.
WANG Xinbao, GE Jing, HAN Lianshan, et al. Theory and practice of grid-forming BESS supporting the construction of a new type of power system[J]. Power System Protection and Control, 2023, 51(5): 172-179.
- [2] 李建林,丁子洋,游洪灏,等. 构网型储能支撑新型电力系统稳定运行研究[J]. 高压电器, 2023, 59(7): 1-11.
LI Jianlin, DING Ziyang, YOU Honghao, et al. Research on stable operation of new power system supported by grid-forming energy storage system[J]. High Voltage Apparatus, 2023, 59(7): 1-11.
- [3] 伍双喜,王晰,刘洋,等. 基于构网型储能的风电场-弱电网次同步振荡抑制方法[J]. 电力建设, 2024, 45(4): 147-155.
WU Shuangxi, WANG Xi, LIU Yang, et al. Subsynchronous damping control of grid-forming BESS in wind farms connected to a weak AC grid[J]. Electric Power Construction, 2024, 45(4): 147-155.
- [4] 谢小荣,马宁嘉,刘威,等. 新型电力系统中储能应用功能的综述与展望[J]. 中国电机工程学报, 2023, 43(1): 158-168.
XIE Xiaorong, MA Ningjia, LIU Wei, et al. Functions of energy storage in renewable energy dominated power systems: review and prospect[J]. Proceedings of the CSEE, 2023, 43(1): 158-168.
- [5] 刘旭,张国驹,裴玮,等. 构网型变流器的现状与发展趋势[J]. 太阳能学报, 2024, 45(9): 101-111.
LIU Xu, ZHANG Guoju, PEI Wei, et al. Current status and development trends of grid type converters[J]. Acta Energetica Solaris Sinica, 2024, 45(9): 101-111.
- [6] ROSSO R, WANG Xiongfei, LISERRE M, et al. Grid-forming converters: control approaches, grid-synchronization, and future trends-a review[J]. IEEE Open Journal of Industry Applications, 2021(2): 193-109.
- [7] 倪泽龙,林钰钧,王治涛,等. 基于模型预测的虚拟同步机控制储能调频研究[J]. 电力系统保护与控制, 2022, 50(14): 85-93.
NI Zelong, LIN Yujun, WANG Zhitao, et al. Research on frequency regulation of VSG controlled energy storages based on model predictive control[J]. Power System Protection and Control, 2022, 50(14): 85-93.
- [8] 王泽昆,程鹏,贾利民. 单电压环构网型并网逆变器暂态稳定性分析[J]. 电力系统保护与控制, 2024, 52(10): 118-127.
WANG Zekun, CHENG Peng, JIA Limin. Transient stability analysis of single voltage loop grid-forming inverter[J]. Power System Protection and Control, 2024, 52(10): 118-127.
- [9] 李立,王佳明,张青蕾,等. 兼顾系统频率稳定性和小干扰稳定性的构网型储能参数优化方法[J]. 电力建设,

- 2023, 44(12): 125-135.
- LI Li, WANG Jiaming, ZHANG Qinglei, et al. Parameter optimization method of grid-forming energy storage considering system frequency stability and small signal stability[J]. Electric Power Construction, 2023, 44(12): 125-135.
- [10] 杨可昕, 鲍颜红, 任先成, 等. 直接电压控制构网型变流器控制参数暂态稳定影响分析[J]. 电力系统保护与控制, 2024, 52(8): 20-30.
- YANG Kexin, BAO Yanhong, REN Xiancheng, et al. Analysis of transient stability effects of control parameters for direct voltage control grid-forming converters[J]. Power System Protection and Control, 2024, 52(8): 20-30.
- [11] 闫涛, 陈继忠, 闫雪生, 等. 构网型储能系统现场调试平台电网扰动控制策略研究[J]. 高压电器, 2023, 59(7): 30-38.
- YAN Tao, CHEN Jizhong, YAN Xuesheng, et al. Research on power grid disturbance control strategy for grid-forming energy storage equipment on-site commissioning system[J]. High Voltage Apparatus, 2023, 59(7): 30-38.
- [12] 武永强, 郭凯, 王宇强, 等. 构网型储能系统并网测试要求及测试实例分析[J]. 内蒙古电力技术, 2024, 42(2): 8-16.
- WU Yongqiang, GUO Kai, WANG Yuqiang, et al. Testing requirements and case analysis of grid-forming energy storage system[J]. Inner Mongolia Electric Power, 2024, 42(2): 8-16.
- [13] 李明, 亢朋朋, 亚夏尔·吐尔洪, 等. 覆盖多层次全场景的构网型储能电站并网测试方法研究[J]. 热力发电, 2024, 53(8): 124-134.
- LI Ming, KANG Pengpeng, YAXIAER·Turgun, et al. Grid connection testing methods for grid-forming energy storage power stations covering multiple levels and all scenarios[J]. Thermal Power Generation, 2024, 53(8): 124-134.
- [14] 郭佳俊, 陈俊儒, 刘雨姗, 等. 构网型新能源电网支撑性能测试评估[J]. 智慧电力, 2023, 51(12): 23-29.
- GUO Jiajun, CHEN Junru, LIU Yushan, et al. Support performance test and evaluation of grid-forming renewable energy systems[J]. Smart Power, 2023, 51(12): 23-29.
- [15] 李响, 武海潮, 王文雪, 等. 考虑大规模新能源接入的电网性能评价指标体系[J]. 电力系统保护与控制, 2024, 52(15): 178-187.
- LI Xiang, WU Haichao, WANG Wenxue, et al. Performance evaluation index system of a power grid considering large-scale new energy[J]. Power System Protection and Control, 2024, 52(15): 178-187.
- [16] 詹长江, 吴恒, 王雄飞, 等. 构网型变流器稳定性研究综述[J]. 中国电机工程学报, 2023, 43(6): 2339-2358.
- ZHAN Changjiang, WU Heng, WANG Xiongfei, et al. An overview of stability studies of grid-forming voltage source converters[J]. Proceedings of the CSEE, 2023, 43(6): 2339-2358.
- [17] 许诒翊, 刘威, 刘树, 等. 电力系统变流器构网控制技术
- 的现状与发展趋势[J]. 电网技术, 2022, 46(9): 3586-3594.
- XU Jieyi, LIU Wei, LIU Shu, et al. Current state and development trends of power system converter grid-forming control technology[J]. Power System Technology, 2022, 46(9): 3586-3594.
- [18] 符杨, 陈禹瑾, 季亮, 等. 考虑功率解耦的构网型逆变器的低电压穿越控制策略[J]. 电力系统保护与控制, 2024, 52(15): 1-13.
- FU Yang, CHEN Yujin, JI Liang, et al. Low voltage ride-through control strategy of a grid-forming inverter considering power decoupling[J]. Power System Protection and Control, 2024, 52(15): 1-13.
- [19] 电化学储能系统储能变流器技术要求: GB/T 34120—2023[S]. 北京: 国家标准化管理委员会, 2023.
- Technical requirements for power conversion system of electrochemical energy storage system: GB/T 34120—2023[S]. Beijing: National Standardization Management Committee, 2023.
- [20] 构网型储能系统并网测试规范: T/CES 244—2023[S]. 北京: 中国电工技术学会, 2023.
- Test specification for application of grid-forming energy storage system: T/CES 244—2023[S]. Beijing: China Electrotechnical Society, 2023.
- [21] 胡润泽, 吕世轩, 张灿, 等. 基于状态熵权和双轨制TOPSIS的电能质量实时综合评估方法[J]. 电力系统保护与控制, 2023, 51(23): 102-114.
- HU Runze, LÜ Shixuan, ZHANG Can, et al. Real time comprehensive evaluation method of power quality based on state entropy and dual track TOPSIS[J]. Power System Protection and Control, 2023, 51(23): 102-114.
- [22] 邓红雷, 戴栋, 李述文. 基于层次分析-熵权组合的架空输电线路综合运行风险评估[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(1): 28-34.
- DENG Honglei, DAI Dong, LI Shuwen. Comprehensive operation risk evaluation of overhead transmission line based on hierarchical analysis-entropy weight method[J]. Electric Power Construction, 2017, 45(1): 28-34.
- [23] 冯瑾涛, 陈卓, 李宗原, 等. 多电源切换变流器测试系统, 中国: CN201911267689.3[P]. 2021-11-23.
- FENG Jintao, CHEN Zhuo, LI Zhongyuan, et al. Multi power switching inverter testing system, China: CN201911267689.3[P]. 2021-11-23.

收稿日期: 2024-07-30; 修回日期: 2024-10-29

作者简介:

魏于凯(1997—), 男, 硕士, 主要从事新能源与储能在电力系统中的应用开发研究与检测工作; E-mail: weiyukai@ketop.cn

李宗原(1987—), 男, 通信作者, 高级工程师, 主要从事新能源设备检测认证与标准研究。E-mail: lizongyuan@ketop.cn

(编辑 魏小丽)