

引用格式:杨振奥,陈俊儒,刘雨姗,等.基于博弈论和改进TOPSIS的跟网型和构网型场站并网性能对比及评估[J].电力科学与技术学报,2025,40(2):206-216.

Citation: YANG Zhenao, CHEN Junru, LIU Yushan, et al. Comparison and evaluation of grid-connected performance of grid-following and grid-forming stations based on game theory and improved TOPSIS[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2025, 40(2): 206-216.

基于博弈论和改进TOPSIS的跟网型和构网型 场站并网性能对比及评估

杨振奥¹, 陈俊儒¹, 刘雨姗¹, 郭佳俊¹, 常喜强²

(1. 新疆大学电气工程学院, 新疆维吾尔自治区 乌鲁木齐 830047; 2. 国网新疆电力有限公司, 新疆维吾尔自治区 乌鲁木齐 830000)

摘要:为定量评估跟网型和构网型场站频率与电压的支撑效果,在考虑功率支撑密度和能量支撑密度的前提下,提出一套量化场站性能的评价指标体系。首先,基于新能源场站中跟网型、构网型控制发电单元输出响应特性,从电压和频率稳定性的角度出发,观察多时间尺度下功率、电压、频率的特征量;其次,综合考虑指标间的耦合关系,利用贝叶斯(Bayesian best-worst method, BWM)和CRITIC法(criteria importance through intercriteria correlation, CRITIC),求出指标基础权重,并借助博弈组合赋权法,将这两种指标结果融入至改进的TOPSIS(technique for order preference by similarity to ideal solution, TOPSIS)评估模型,实现跟网型和构网型场站并网性能的分级评估;最后,采用DIgSILENT仿真软件,搭建新疆维吾尔自治区南部某地区的电网模型进行场站仿真测试。研究结果表明,所提评价指标体系能从多方面对跟网型和构网型场站的并网性能进行有效对比与评价。

关键词:新能源场站;博弈论;功率支撑密度;能量支撑密度;分级评估

DOI: 10.19781/j.issn.1673-9140.2025.02.022 中图分类号: TM72 文章编号: 1673-9140(2025)02-0206-11

Comparison and evaluation of grid-connected performance of grid-following and grid-forming stations based on game theory and improved TOPSIS

YANG Zhen'ao¹, CHEN Junru¹, LIU Yushan¹, GUO Jiajun¹, CHANG Xiqiang²

(1. School of Electrical Engineering, Xinjiang University, Urumqi 830047, China; 2. State Grid Xinjiang Electric Power Co., Ltd., Urumqi 830000, China)

Abstract: In order to quantitatively assess the frequency/voltage support effects of grid-following and grid-forming stations, an evaluation index system to quantify the performance of the stations is proposed, considering the power support density and energy support density. First, based on the output response characteristics of grid-following and grid-forming controlled generating units in renewable energy stations, the characteristic quantities of power, voltage, and frequency are observed over multiple time scales in terms of voltage and frequency stability. Second, the coupling relationship between the indicators is considered comprehensively, and the base weights of the indicators are derived using the best-worst method (BWM) and the criteria importance through the inter-criteria correlation (CRITIC) method. The results of both indicator types are integrated into an improved technique for order preference by similarity to ideal solution (TOPSIS) evaluation model using the game-theory-based combinatorial assignment method to achieve a graded evaluation of the station's grid-connected performance. Finally, the DIgSILENT simulation software is used to develop a model of the power grid in southern Xinjiang for station simulation experiments. The results show that the proposed evaluation index system can effectively compare and evaluate the grid-connected performance of grid-following and grid-forming stations from various aspects.

Key words: renewable energy station; game theory; power support density; energy support density; graded evaluation

收稿日期: 2023-11-21; 修回日期: 2024-05-28

基金项目: 新疆维吾尔自治区重大科技专项(2022A01004)

通信作者: 陈俊儒(1991—), 男, 博士, 副教授, 主要从事电力电子在电力系统中的建模、控制和稳定性分析等方面的研究; E-mail: junru.chen@xju.edu.cn

为实现“双碳”目标,中国明确了在“十四五”期间将构建以新能源为主体的新型电力系统的计划^[1]。截至2022年底,中国新能源发电装机容量达到7.58亿千瓦。这种爆发式增长带来了一系列问题:随着新能源在电网中所占比例持续上升,电网固有支撑能力相对不足,电力系统在电压和频率稳定性方面面临着日益严峻的新挑战。

根据对电网电压构造的主动性情况,新能源变换器同步控制策略被分为跟网型(grid-following, GFL)和构网型(grid-forming, GFM)两类^[2-4]。目前,现有新能源场站中的发电单元均是采用跟网控制策略并网。然而大规模新能源接入导致电网强度不断被减弱。文献[5-6]指出了在低短路比下的GFL控制的发电单元存在稳定性问题。文献[7-8]也指出GFL控制策略缺乏主动适应系统频率波动所必需的惯量和阻尼特性,故其难以满足电网在频率支撑与调节方面的要求。因此,文献[9-12]提出了基于虚拟同步机控制的GFM策略。该策略具有能模拟同步发电机惯性和阻尼特性的能力。GFL和GFM变流器两者之间存在差异,也存在诸多相似性^[13]。文献[14-15]指出,配置少量基于GFM控制新能源发电单元可提升场站在弱电网下的运行能力,避免失稳问题的发生。文献[16-20]指出,采用GFL控制的发电单元在强电网条件下的运行较为平稳,而其在弱电网环境中则表现出一定的波动性,存在稳定性不够的问题。相反地,基于GFM控制的发电单元在弱电网中能保持较强的稳定性,但其在强电网中则运行状况不佳。文献[21-22]提出了一种计及新能源虚拟惯量的电力系统等效惯量评估方法,该方法可实现含新能源虚拟同步发电机(virtual synchronous generator, VSG)的电力系统等效惯量精确评估。文献[23-24]验证了虚拟同步发电机控制方式下的储能变流器与储能系统的等效转动惯量计算方法的有效性。文献[25-26]构建了一个基于“理论-可用-实际”理念的风电场站评价框架,分层构建了风电运行消纳的指标体系与评价方法,实现了指标的精确定量并深入解析了风电从资源到电能转化的全过程。文献[27]针对光伏发电的最佳倾角、年均效率与容量因子等关键参数,建立了一套涵盖资源评估与电站性能分析的综合指标体系与计算方法,为光伏发电的规划和可持续消纳提供了宏观支持。文献[28]提出了一种新能源场站分布式并网性能评估框

架。目前,对新能源场站评估的研究鲜见,对跟网型和构网型控制的场站并网性能研究则更少,面对新能源场站中出现的诸多状况,建立系统性的评估体系,准确量化跟网型和构网型控制场站并网性能至关重要。

《虚拟同步机第1部分:总则》(GB/T 38983.1—2020)主要围绕虚拟机的功能和性能指标展开,但该标准未涉及电网支撑性能的评估方法。在国际上,国际电工委员会(International Electrotechnical Commission, IEC)等机构开始关注构网型控制并网变换器的测试技术,但对那些控制结构或关键参数尚未明确的变换器,其关键性能往往难以得到准确表征^[29]。总的来说,现有指标体系缺乏专门反映构网型独特能力的评价内容,其特性评估体系仍待进一步深入探讨。新型电力系统需求的改变对新能源变换器控制技术提出了新的挑战,进而也对新能源场站并网性能的评价提出了新的要求。

本文侧重电压与频率的稳定性,构建了面向新能源场站的评价指标体系及其计算方法,实现了对其动态支撑能力的量化。并借助DIgSILENT仿真平台,构建新疆维吾尔自治区南部某区域电网模型,通过在不同场景和工况下开展仿真试验,全面收集了相关指标数据,根据所构建场站并网性能评估指标体系,利用贝叶斯(Bayesian best-worst method, BWM)方法赋予指标主观权重,结合CRITIC(criteria importance though intercriteria correlation, CRITIC)法衡量指标客观权重,并借助博弈组合赋权法实现这两种指标结果的融合,最终确定了指标的综合权重与基于改进TOPSIS(technique for order preference by similarity to ideal solution, TOPSIS)算法建立评估模型,利用相对贴近度的概念,结合指标间的关联度,实现了GFL和GFM控制场站并网性能的分级评估,同时从多方面对比了GFL及GFM控制场站的性能,以期为实际工程应用提供参考。

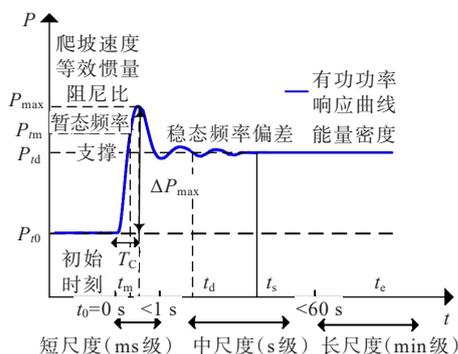
1 跟网型和构网型场站并网性能评价指标体系建立

对场站而言,涉网检测机构在评估变换器所提供的动态支撑能力时,可以参考PCC点处的涉网性能指标。本文提出计及场站对电网频率与电压支撑效果的系列指标,该指标考虑了电网中频率和电

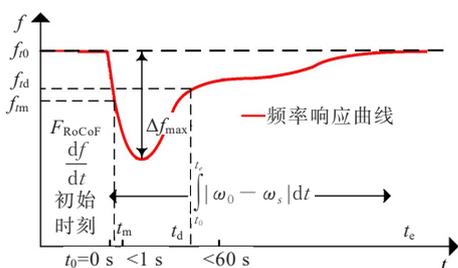
压的分布性,这里的功率为新能源输出功率,频率与电压测量点为PCC点,采用标么值进行计算。

1.1 有功调频动态响应

从时间尺度来看,场站为电网提供频率支撑的方式主要分为3种:首先是1 ms级的响应速度,其次是100 ms级的功率支撑,最后是以1~60 s为单位的能量支撑。图1展示了一般频率事件下有功功率的动态响应过程。从图1中可以看出该动态过程中的关键特征。



(a) 有功功率响应曲线



(b) 频率响应曲线

图1 有功调频动态响应曲线

Figure 1 Dynamic response curve of active power frequency modulation

1.1.1 功率变化率

定义功率变化率 P_{RoCoP} , 将其作为爬坡速度的评价指标。 P_{RoCoP} 值越大, 场站响应电网频率骤变的支撑速度越快。其计算式为

$$P_{RoCoP} = \frac{P_{\max} - P_{t,0}}{T_C} \quad (1)$$

式中, P_{\max} 为第一次响应故障时新能源场站输出的有功功率最大值; $P_{t,0}$ 为初始状态有功功率值; T_C 为初始功率上升至 P_{\max} 的时间。

1.1.2 等效惯量因子

定义等效惯量因子 M , 将其作为惯量支撑能力的评价指标。该指标描述场站响应 F_{RoCoF} 而产生的功率变化量, 反映场站短时有功功率支撑能力(ms级), 并为电网长时(s级以上)调频争取时间。其计

算式为

$$M = \frac{(P_{t,m} - P_{t,0})}{\omega_{t,m} - \omega_{t,0}} \quad (2)$$

式中, $P_{t,m}$ 为 t_m 时刻测得的有功功率值; $\omega_{t,m}$ 为 t_m 时刻测得的角频率值; $\omega_{t,0}$ 为初始角频率。

1.1.3 阻尼比

定义阻尼比 ζ , 将其作为阻尼效果的评价指标。其值为一定时间周期内频率的衰减量与等效惯量因子的比值。阻尼比 ζ 与惯量具有一定关系, 该值越小, 阻尼效果越好。

$$\zeta = \frac{\int_{t=t_0}^{t=t_0+1} |\omega - \omega_{t,0}| dt}{M\omega_{t,0}} \quad (3)$$

式中, ω 为定时间周期内频率实测值。

1.1.4 暂态频率支撑系数

定义暂态频率支撑系数 K_{delf} , 将其作为瞬时功率支撑能力的评价指标。 K_{delf} 的值越大, 场站应对频率变化的暂态支撑能力越强。该指标反映了场站在频率暂态变化过程中, 通过响应功率调整来对系统进行短期的支撑的能力。其计算式为

$$K_{delf} = \frac{\Delta P_{\max} / S_N}{\Delta \omega_{\max}} \quad (4)$$

式中, ΔP_{\max} 为第一次响应故障时输出最大功率偏差; $\Delta \omega_{\max}$ 为第一次响应故障时输出最大频率偏差; S_N 为新能源的装机容量。

1.1.5 稳态频率偏差系数

定义稳态频率偏差系数 R_{delf} , 将其作为反映场站下垂控制效果的评价指标, 评价系统的一次调频能力。该指标关注场站在短时间内对频率变化的响应, 反映了场站对频率偏差的即时控制能力。其计算式为

$$R_{delf} = \frac{\text{avg}_{t_d}^t |P_{t,d} - P_{t,0}| / S_N}{\text{avg}_{t_d}^t |\omega_{t,d} - \omega_{t,0}|} \quad (5)$$

式中, t_d 为有功功率变化的第一个时间周期, 如图1所示; $\text{avg}_{t_d}^t |P_{t,d} - P_{t,0}|$ 为有功功率变化量在 t_d 内的平均值; $P_{t,d}$ 为 t_d 时刻测得的有功功率值; $\text{avg}_{t_d}^t |\omega_{t,d} - \omega_{t,0}|$ 为 t_d 内频率变化量的平均值; $\omega_{t,d}$ 为 t_d 时刻测得的角频率值。

1.1.6 能量密度

定义能量密度 λ_P , 将其作为反映场站长时—能量支撑特性的评价指标。 λ_P 值越高, 场站响应系统频率偏差所提供持续有功功率支援的能力越强。该指标关注场站在长时间内对系统频率偏差的支撑情况, 反映了场站长期稳定运行所提供的有功功

率支撑能力。其计算式为

$$\lambda_p = \frac{\int_{t_0}^{t_e} (P - P_{t,0}) dt}{\int_{t_0}^{t_e} |\omega - \omega_{t,0}| dt} \quad (6)$$

式中, P 为 t_0 与 t_e 之间的测得的有功功率值; ω 为 t_0 与 t_e 之间的测得的角速度值; t_e 为机组完成二次调频所需的控制响应时间, 其计算方法会根据不同的工况而有所差异。

1.2 无功调压动态响应

在评估场站无功调节和电压控制能力时, 电压支撑指标作为一个关键评判工具发挥着重要作用。图2为一般电压事件中无功功率与电压轨迹的响应曲线。

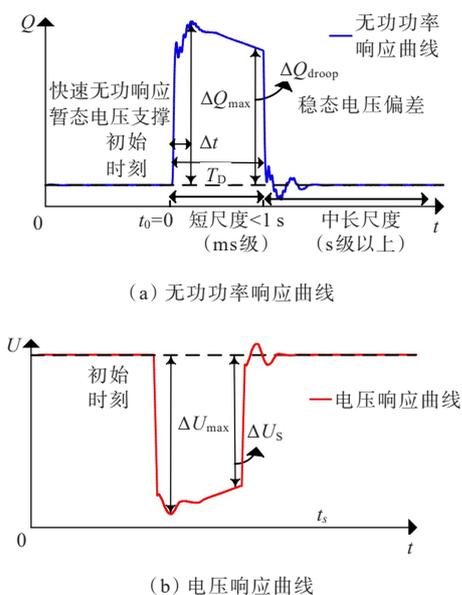


图2 无功调压动态响应曲线

Figure 2 Dynamic response curve of reactive power voltage modulation

1.2.1 快速无功响应常数

定义快速无功响应常数 γ , 将其作为评估场站应对电压变化时所提供的暂态无功功率响应速度的指标。该指标可评估场站对电压变化的快速响应能力, 反映电网出现瞬时变化时场站的快速调节能力。其计算式为

$$\gamma = \frac{(Q - Q_{t,0})/S_N}{U - U_{t,0}} \quad (7)$$

式中, Q 为响应故障时提供的无功功率; U 为故障瞬间电压; $Q_{t,0}$ 为初始无功功率; $U_{t,0}$ 为初始运行电压。

1.2.2 暂态电压支撑系数

定义暂态电压支撑系数 K_{deltu} , 将其作为评估场

站应对电压骤降时提供的支撑能力的评价指标。该指标评估场站在电压骤降时提供的支撑能力, 反映了场站在电网电压波动变化时, 系统提供的暂态无功功率支撑能力。其计算式为

$$K_{\text{deltu}} = \frac{\Delta Q_{\text{max}}/S_N}{\Delta U_{\text{max}}} \quad (8)$$

式中, ΔQ_{max} 为暂态过程中最大无功功率偏差; ΔU_{max} 为相对应的最大电压偏差。

1.2.3 稳态电压偏差系数

定义稳态电压偏差系数 R_{deltu} , 将其作为评估新能源场站 $U-Q$ 下垂响应的评价指标。在不集中安装无功补偿设备的情况下, R_{deltu} 值越高, 场站在稳态时提供的无功补偿能力越强。该指标可评估场站在稳态工况下提供的无功补偿能力, 反映了场站在长时间内对电压偏差的补偿能力。

$$R_{\text{deltu}} = \frac{\text{avg}_{t_0}^{t_d} |Q - Q_{t,0}|}{\text{avg}_{t_0}^{t_d} |U - U_{t,0}|} \quad (9)$$

式中, t_d 为无功功率变化的第一个时间周期, 如图2所示; $\text{avg}_{t_0}^{t_d} |Q - Q_{t,0}|$ 为 t_d 内无功功率变化量的平均值; $\text{avg}_{t_0}^{t_d} |U - U_{t,0}|$ 为 t_d 内电压变化量的平均值。

1.2.4 新能源多场站短路比

短路比用来评估设备并网后, 其输出电压与系统额定电压之间存在比例关系。本文参考文献[30]中提出的定义, 给出了新能源多场站短路比 (multiple renewable energy stations short circuit ratio, MRSCR) 的计算式。其中, 对于系统中第 i 个新能源并网母线, 新能源多场站短路比 $x_{\text{MRSCR}, i}$ 的计算公式为

$$x_{\text{MRSCR}, i} = \frac{|\dot{U}_{N,i}|}{|\dot{U}_{\text{RE},i}|} = \frac{|\dot{U}_{N,i}|}{\left| \dot{Z}_{\text{eq}i} \dot{I}_i + \sum_{j=1, j \neq i}^n \dot{Z}_{\text{eq}ij} \dot{I}_j \right|} \quad (10)$$

式中, $\dot{U}_{N,i}$ 为第 i 个并网母线的额定电压; $\dot{U}_{\text{RE},i}$ 为在第 i 个节点上新能源设备发电功率产生的电压; 下标 RE 为新能源发电设备或场站的符号; \dot{I}_i 为第 i 个新能源发电设备或场站提供的短路电流。

综上所述, 本文从跟网型和构网型控制场站并网运行这一过程中场站侧的角度出发, 建立场站涉网性能的评估指标体系, 其结构如图3所示。该指标体系综合考虑了跟构网型场站的电压、频率支撑能力特性, 其指标种类更全面, 评估角度更多元化, 评估结果更准确。

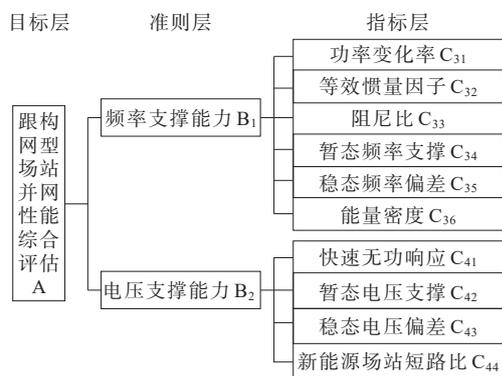


图3 跟网型和构网型场站并网性能评估指标体系

Figure 3 Evaluation index system for grid-connected performance of GFL and GFM stations

2 基于博弈组合赋权法和改进TOPSIS跟网型和构网型场站并网性能分级评估模型

2.1 单一权重计算

2.1.1 BWM

BWM法的基本思想是结合变量的随机概率分布与层次分析法,求得群体决策的最佳聚合权重向量。

首先,确定评估对象的目标层、准则层和指标层,建立如图3所示的层次结构;并邀请 k 位专家从评估指标体系($A = \{A_1, A_2, \dots, A_n\}$)中确定最优指标 A_B 和最劣指标 A_W ,采用1-9标度法,将 A_B 和 A_W 作为参考比较对象,构建最优最劣比较矩阵 $C_B = (\alpha_{B1}, \alpha_{B2}, \dots, \alpha_{Bn})^T$, $C_W = (\alpha_{1W}, \alpha_{2W}, \dots, \alpha_{nW})^T$ 。其次,使用多项式分布,对输入 A_B, A_W 建模(BWM法可以将矩阵看作多个满足多项式分布假设的向量的集合)。最后,基于该模型的输入和输出,采用贝叶斯分层模型,通过最佳权重向量后验分布的概率估计来确定并网性能指标权重,并计算 k 位专家确定的综合权重 w_1^T 。BWM法可综合利用专家经验,动态地更新权重,精确量化不确定性。但BWM法的缺点是仅根据专家经验获取群体决策的最佳权重值,这可能会造成评估结果缺乏足够的客观性。

2.1.2 CRITIC法

CRITIC法基于指标数据信息的对比强度和冲突性量化指标对评估结果的影响力^[31-32]。该方法能综合考虑指标之间的相互关联性,来解决数据一致性不够的问题。然而,CRITIC法存在屏蔽专家经验获取权重值的缺陷,这可能会造成评价结果不准确,使评估结果存在一定的片面性。

2.2 博弈组合赋权法

本文采用联合BWM法、CRITIC法的博弈组合赋权法来计算权重,使计算结果兼具专家主观性与客观性,其步骤可分为4步。

1) 构建组合权重向量。

$$w_3^T = A_1 w_1^T + A_2 w_2^T \quad (11)$$

式中, w_1^T 为主观权重向量; w_2^T 为客观权重向量; w_3^T 为最优组合权重; A_1, A_2 均为主观客观权重的组合系数。

2) 引入博弈论计算权重。

$$\min \left\| \sum_{h=1}^2 A_h w_h^T - w_z^T \right\|_2, z = 1, 2 \quad (12)$$

求解式(12),得到最后组合系数 $A_h (h = 1, 2)$

3) 对系数进行归一化处理。

$$A_h^* = \frac{|A_h|}{\sum_{h=1}^2 |A_h|} \quad (13)$$

式中, A_h^* 为归一化后的权重系数。

4) 得到最优组合权重。

$$w_3^T = A_1^* w_1^T + A_2^* w_2^T \quad (14)$$

2.3 改进的TOPSIS评估方法

改进TOPSIS法将灰色关联度与传统TOPSIS法的欧氏几何距离融合,解决了传统TOPSIS仅用单一的欧氏距离作为距离测度所造成的评估对象的正、负理想解均相近的情况^[31]。在评估矩阵中加入构网型变换器并网性能分级矩阵,解决待评价设备的分级评估问题。

基于改进TOPSIS的具体步骤可分为5步。

1) 构建加权评估矩阵。

选取 m 个评价对象, n 个评价指标,依据计算得到的指标数据,确定原始标准矩阵 $X = (x_{ij})_{m \times n}$,将 X 进行归一化处理,并将归一化后的结果与指标的组合权重相乘,即可得到加权评估矩阵 Z ,即

$$Z = (z_{ij})_{m \times n} = (x_{ij} w_3^T)_{m \times n} \quad (15)$$

2) 确定正、负理想解。

采用改进TOPSIS法,利用各指标实际数据中最优、最劣极限值集合,构建最优最劣值序列,并对其进行归一化处理,将归一化后的结果分别作为各指标的正、负理想解 z_j^+, z_j^- 。

3) 计算灰色关联系数和欧氏距离。

第 i 个待评价设备的第 j 个指标与正、负理想解的灰色关联系数 $\gamma_{ij}^+, \gamma_{ij}^-$ 分别为

$$\begin{cases} \gamma_{ij}^+ = \frac{\min_{1 \leq i \leq m} \min_{1 \leq j \leq n} |z_{ij} - z_j^+| + \rho \max_{1 \leq i \leq m} \max_{1 \leq j \leq n} |z_{ij} - z_j^+|}{|z_{ij} - z_j^+| + \rho \max_{1 \leq i \leq m} \max_{1 \leq j \leq n} |z_{ij} - z_j^+|} \\ \gamma_{ij}^- = \frac{\min_{1 \leq i \leq m} \min_{1 \leq j \leq n} |z_{ij} - z_j^-| + \rho \max_{1 \leq i \leq m} \max_{1 \leq j \leq n} |z_{ij} - z_j^-|}{|z_{ij} - z_j^-| + \rho \max_{1 \leq i \leq m} \max_{1 \leq j \leq n} |z_{ij} - z_j^-|} \end{cases} \quad (16)$$

式中, ρ 为分辨系数, $\rho \in [0, 1]$ 。

由式(16), 可进一步得到灰色关联度, 即

$$\begin{cases} R_i^+ = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n \gamma_{ij}^+ \\ R_i^- = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n \gamma_{ij}^- \end{cases} \quad (17)$$

式中, n 为指标总数; R_i^+ 为正灰色关联度; R_i^- 为负灰色关联度。

则第 i 个待评价设备的第 j 个指标与正、负理想解的欧氏距离分别为

$$\begin{cases} E_i^+ = \sqrt{\sum_{j=1}^n (z_{ij} - z_j^+)^2} \\ E_i^- = \sqrt{\sum_{j=1}^n (z_{ij} - z_j^-)^2} \end{cases} \quad (18)$$

式中, E_i^+ 为与正理想解的欧氏距离; E_i^- 为与负理想解的欧氏距离。

4) 构建改进 TOPSIS 的距离测度。

由式(18)、(19)可知, R_i^+ 与 E_i^- 与正理想解呈正相关, 当这二者值均较大时, 该设备性能值更接近最优解; R_i^- 与 E_i^+ 与负理想解呈正相关, 当这二者值均较大时, 该设备性能值更接近最劣解。

$$\begin{cases} S_i^+ = kE_i^- + (1 - k)R_i^+ \\ S_i^- = kE_i^+ + (1 - k)R_i^- \end{cases} \quad (19)$$

式中, k 为相对位置的偏重程度, $k=0.5$; S_i^+ 为正距离测度; S_i^- 为负距离测度。

5) 计算相对贴近度。

结合式(20)的距离测度, 计算待评价设备同正负理想解的相对贴近度 D_i , 即

$$D_i = \frac{S_i^+}{S_i^+ + S_i^-} \quad (20)$$

基于步骤4)和步骤5), 计算出分级矩阵的相对贴近度 D_i , 根据设备 D_i 值的大小与所属分级矩阵 D_i 值的关系明确设备所属等级, 计算设备各层级指标所对应的 S_i 及 D_i 。以设备涉网性能指标的相对贴近度 D_i 值作为设备性能评分。 D_i 值越大, 该层级指标反映的并网性能越好; 反之, D_i 值越小, 该层级指标反映的并网性能越差。

2.4 跟网型和构网型场站并网性能综合评估步骤

综上所述, 跟网型和构网型场站并网性能综合评估步骤(图4)具体可分为5步。

1) 从电压和频率稳定性的角度出发, 观察多时间尺度下功率、电压、频率的特征量, 选取涵盖电压和频率支撑能力这2个方面的综合评价指标, 并对这些指标进行量化处理, 以便后续分析。

2) 对新能源场站的原始数据实施标准化, 以消除不同量纲带来的影响。

3) 根据文2.1中的算法, 确定各单项指标的权重, 并结合文2.2的内容, 通过式(14), 计算得到最终的组合权重。

4) 利用式(15)构建加权评估矩阵, 可得新能源场站并网性能的各指标的正、负理想解。

5) 根据式(20), 求得分级矩阵的相对贴近度, 即可评价跟网型和构网型控制场站并网性能的相对优劣性和实现跟网型和构网型控制场站并网性能的分级评估。

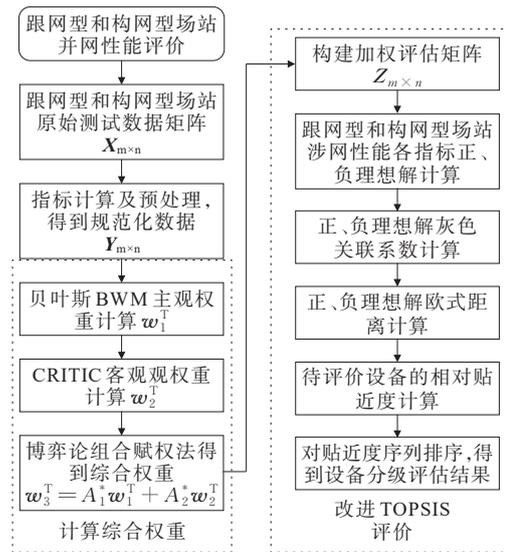


图4 跟网型和构网型场站并网性能分级评估流程

Figure 4 Graded evaluation process for GFL and GFM stations' grid-connected performance

3 案例分析

3.1 场站侧指标值获取

本研究采用 DIgSILENT 仿真平台, 构建了新疆维吾尔自治区南部某地区电网架构模型, 并开展了场站级仿真试验。在该仿真过程中, 依据实际光伏电站数据, 在该平台上建立了光伏电站模型。其中, 输电线路及变压器选用了软件内置的模型。所分析的该区域电网具有高比例新能源和弱电网特征, 其骨干网电压分别为 750、220 kV, 输配电网的

电压等级则为 110、35 kV,区域内新能源装机容量达到 1 790 MW,占新能源比例 45%,其网架结构如图 5 所示。在图 5 中,字母 H 代表 750 场站线路,字母 L 代表 220 场站线路,字母 W 代表水电站,字母 E 代表发电厂。

在 H2-H3 输电线路中,假设系统在 10 s 时发生

$N-1$ 故障,记录 L11 站 PCC 点处 GFL 与 GFM 控制的无功功率出力和电压的变化,获取电压支撑系列指标数值;在 L11 站处,假设在 10 s 时投入负荷,记录 L11 站 PCC 点处 GFL 与 GFM 控制的有功功率出力和频率的变化,获取频率支撑系列指标数值。该仿真结果如图 6 所示。

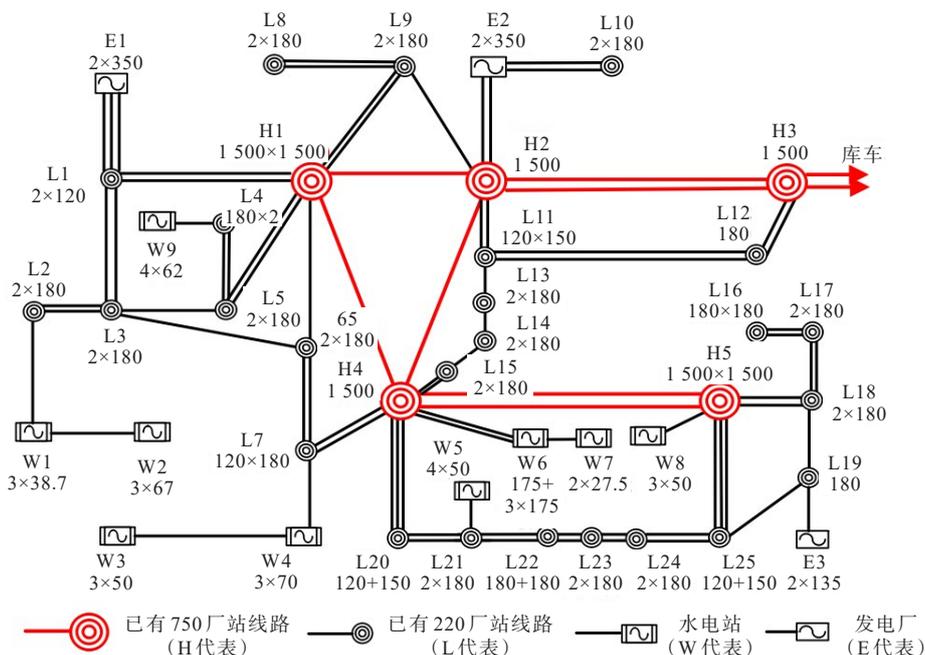


图 5 新疆南部某区域电网网架结构示意图

Figure 5 Power grid structure in a region of southern Xinjiang

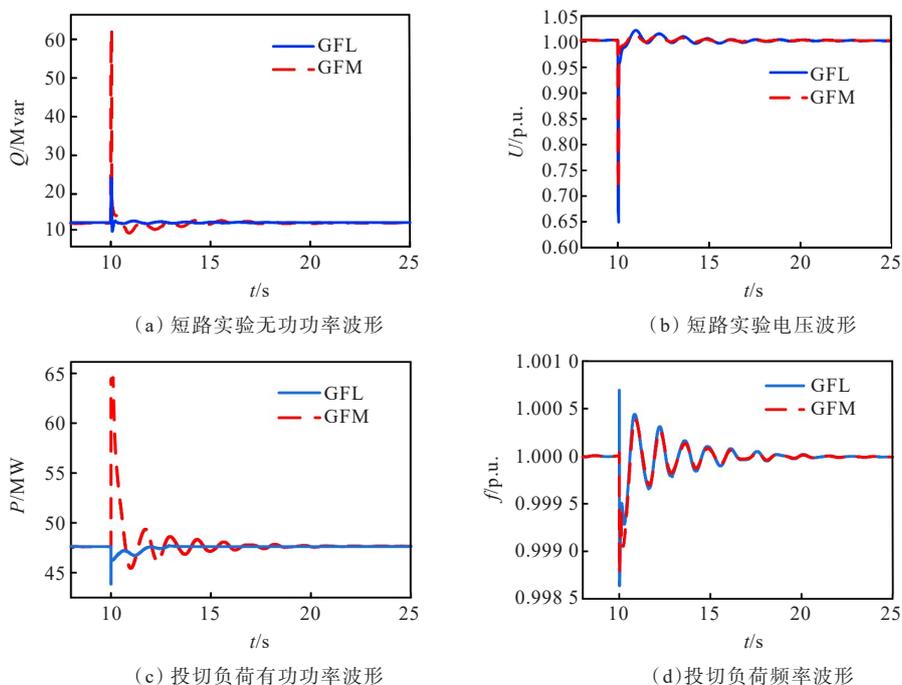


图 6 L11 站仿真对比结果

Figure 6 Simulation comparison results of L11 Station

表 3 改进 TOPSIS 分级评估结果

Table 3 Improved TOPSIS graded evaluation results

评价对象	S^+	S^-	D
GFL	0.484	0.124	0.796
GFM	0.552	0.093	0.856

表明基于 GFM 控制的场站并网性能更接近最优理想解,其并网运行时将表现出更好的支撑性能。在优秀、良好级界限时对 S^+ 、 S^- 、 D 的评估结果分别为 0.643、0.069、0.903;良好、一般级界限时对 S^+ 、 S^- 、 D 的评估结果分别为 0.538、0.095、0.850;一般、合格级界限时对 S^+ 、 S^- 、 D 的评估结果分别为 0.474、0.116、0.804;合格、不合格级界限时对 S^+ 、 S^- 、 D 的评估结果分别为 0.418、0.139、0.751。

根据表 3 中涉网性能等级界限对应相对贴近度值可知,当 $D \geq 0.903$ 时,该场站为优秀级, $D \geq 0.850$ 时,该场站为良好级, $D \geq 0.804$ 时,该场站为一般级, $D \geq 0.751$ 时属合格级, $D < 0.751$ 时属于不合格级。因此,基于 GFL 控制的场站并网性能等级为四级,涉网性能表现为合格;基于 GFM 控制的场站并网性能等级为二级,涉网性能表现为良好。

为验证改进 TOPSIS 方法的有效性,依据这些基础数据,采用传统 TOPSIS 方法重新评估。先计算出 GFL 和 GFM 控制场站的欧氏距离;再利用式 (21),求得各监测点的接近度,GFL 控制场站评估等级为合格,GFM 控制场站评估等级为良好。可见,改进的 TOPSIS 评估方法是可行的,且采用改进的 TOPSIS 可以避免评估对象对正、负理想解均相近的情况,即

$$D = \frac{E^+}{E^+ + E^-} \quad (21)$$

跟网型和构网型控制场站并网性能评估体系中,场站频率或电压支撑能力以两类指标相对贴近度值来表征,如图 7 所示。

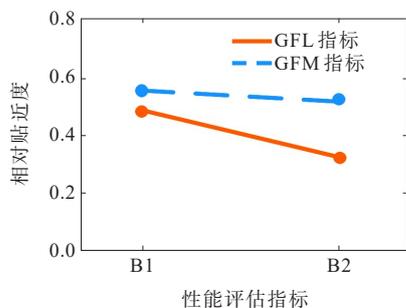


图 7 跟网型和构网型场站并网性能两类指标对比

Figure 7 Comparison of two types of indicators for GFL and GFM stations' grid-connected performance

从图 7 中可以看出,GFM 控制特性为主动支持,相较于 GFL 控制特性的被动响应,GFM 控制场站频率/电压支撑方面拥有明显的优越性。

4 结语

本文利用博弈论计算组合权重,有效克服了单一权重确定方法的局限性;同时,借助改进的 TOPSIS 方法进行量化评估,使评估结果更加精确。对 GFL 和 GFM 控制场站并网性能进行分级评估,并对比两类综合指标贴近度,得出 GFM 控制场站并网性能等级为良好,GFL 控制场站并网性能等级为合格的结论。跟网型和构网型场站并网性能综合对比评估表明:在高占比新能源并网背景下,GFM 比 GFL 具有更快的响应和更好的支撑能力。

参考文献:

- [1] 李晖,刘栋,姚丹阳.面向碳达峰碳中和目标的我国电力系统发展研判[J].中国电机工程学报,2021,41(18):6245-6259.
LI Hui,LIU Dong,YAO Danyang.Analysis and reflection on the development of power system towards the goal of carbon emission peak and carbon neutrality[J].Proceedings of the CSEE,2021,41(18):6245-6259.
- [2] 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.
- [3] 许诤翔,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):3586-3595.
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):3586-3595.
- [4] 刘威,于飞,董霜,等.基于多电平变流器模块的直流输电系统控制[J].电网与清洁能源,2024,40(9):47-53.
LIU Wei,YU Fei,DONG Shuang,et al.The DC transmission system control based on the multilevel converter module[J].Power System and Clean Energy,2024,40(9):47-53.
- [5] 辛焕海,甘德强,鞠平.多馈入电力系统广义短路比:多样化新能源场景[J].中国电机工程学报,2020,40(17):5516-5527.
XIN Huanhai,GAN Deqiang,JU Ping.Generalized short circuit ratio of power systems with multiple power

- electronic devices: analysis for various renewable power generations[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2020, 40(17): 5516-5527.
- [6] 石振江,岳云力,岳昊,等. 计及可再生能源时序出力重构的电力系统时序生产模拟[J]. *供用电*, 2023, 40(12): 87-96.
- SHI Zhenjiang, YUE Yunli, YUE Hao, et al. Time series production simulation of power system with renewable energy time series output reconstruction[J]. *Distribution & Utilization*, 2023, 40(12): 87-96.
- [7] 马宁嘉,谢小荣,李浩志,等. 计及频率动态分布性的新能源机组惯量需求分析[J]. *中国电机工程学报*, 2024, 44(9): 3500-3508.
- MA Ningjia, XIE Xiaorong, LI Haozhi, et al. Inertial requirements for renewable energy units considering the space-time distribution characteristics of frequency[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2024, 44(9): 3500-3508.
- [8] 王凡,胥国毅,邵冲,等. 基于灵敏度分析的新能源电力系统同步机组调差系数优化方法[J]. *电测与仪表*, 2024, 61(3): 145-152.
- WANG Fan, XU Guoyi, SHAO Chong, et al. Optimization method of synchronous generator adjustment coefficient for new energy power system based on sensitivity analysis[J]. *Electrical Measurement & Instrumentation*, 2024, 61(3): 145-152.
- [9] ZHONG Q C, WEISS G. Synchronverters: inverters that mimic synchronous generators[J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2011, 58(4): 1259-1267.
- [10] SAKIMOTO K, MIURA Y, ISE T. Stabilization of a power system with a distributed generator by a Virtual Synchronous Generator function[C]//8th International Conference on Power Electronics - ECCE Asia. Jeju, Korea (South). IEEE, 2011: 1498-1505.
- [11] 冯梓彬,张后谊,谢宇哲,等. 直流微电网中电压源型变流器故障穿越控保协同策略[J]. *电力建设*, 2023, 44(7): 70-76.
- FENG Yibin, ZHANG Houyi, XIE Yuzhe, et al. Control and protection cooperation strategy for a voltage source converter in a DC microgrid during a fault ride-through [J]. *Electric Power Construction*, 2023, 44(7): 70-76.
- [12] 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): 2339-2359.
- 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): 2339-2359.
- [13] LI Y T, GU Y J, GREEN T C. Revisiting grid-forming and grid-following inverters: a duality theory[J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2022, 37(6): 4541-4554.
- [14] 周于清,姚伟,宗启航,等. 基于运行短路比的新能源场站中跟/构网可切换单元的最优配置方法[J]. *电网技术*, 2024, 48(3): 1091-1104.
- ZHOU Yuqing, YAO Wei, ZONG Qihang, et al. Optimal configuration of grid-following/grid-forming switchable units in new energy stations based on operating short-circuit ratio[J]. *Power System Technology*, 2024, 48(3): 1091-1104.
- [15] 刘志伟,马悦,沙志成,等. 考虑新能源多重相关性的柔性配电网分布鲁棒优化策略[J]. *中国电力*, 2024, 57(12): 97-108.
- LIU Zhiwei, MA Yue, SHA Zhicheng, et al. Distributionally robust operation for flexible distribution networks considering multi-correlation of renewable power generation[J]. *Electric Power*, 2024, 57(12): 97-108.
- [16] WANG X F, TAUL M G, WU H, et al. Grid-synchronization stability of converter-based resources: an overview[J]. *IEEE Open Journal of Industry Applications*, 2020, 1: 115-134.
- [17] 王东泽,孙海顺,黄碧月,等. 基于虚拟同步控制的电压源型直驱风电机组并网稳定性分析[J]. *高电压技术*, 2022, 48(8): 3282-3294.
- WANG Dongze, SUN Haishun, HUANG Biyue, et al. Analysis of grid-connected stability of voltage-source-type PMSG-based wind turbine based on virtual synchronous control[J]. *High Voltage Engineering*, 2022, 48(8): 3282-3294.
- [18] 李辉,王坤,胡玉,等. 双馈风电系统虚拟同步控制的阻抗建模及稳定性分析[J]. *中国电机工程学报*, 2019, 39(12): 3434-3443.
- LI Hui, WANG Kun, HU Yu, et al. Impedance modeling and stability analysis of virtual synchronous control based on doubly-fed wind generation systems[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2019, 39(12): 3434-3443.
- [19] 王进钊,严干贵,刘侃. 基于交替方向隐式平衡截断法的直驱风电场次同步振荡分析模型降阶研究[J]. *发电技术*, 2023, 44(6): 850-858.
- WANG Jinzhao, YAN Gangui, LIU Kan. Research on model reduction of direct drive wind farm subsynchronous oscillation analysis based on alternating direction implicit balanced truncation method[J]. *Power Generation Technology*, 2023, 44(6): 850-858.
- [20] 王岑峰,王蕾,孙飞飞,等. 基于模糊逻辑控制的混合储能辅助风电调频的双层优化配置模型[J]. *高压电器*, 2024, 60(10): 54-63.
- WANG Cenfeng, WANG Lei, SUN Feifei, et al. Two-layer optimal configuration model of hybrid energy storage assisted wind power frequency regulation based on fuzzy logic control[J]. *High Voltage Apparatus*, 2024, 60(10): 54-63.
- [21] 蒋小亮,李元臣,郝元钊,等. 计及新能源虚拟惯量的电力系统等效惯量评估[J]. *电力科学与技术学报*, 2023, 38(4): 169-176.

- JIANG Xiaoliang, LI Yuanchen, HAO Yuanzhao, et al. Evaluation of power system equivalent inertia considering new energy virtual inertia[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2023, 38(4): 169-176.
- [22] 赵鹏臻,谢宁,殷佳敏,等.适应新型电力系统发展趋势的配电网集中-分布式形态及其分层分区方法[J].智慧电力,2023,51(1):94-100.
- ZHAO Pengzhen, XIE Ning, YIN Jiamin, et al. Centralized-distributed pattern of distribution network and its hierarchical partition method adapting to development trend of new power system[J]. Smart Power, 2023,51(1):94-100.
- [23] CHASSIN D P, HUANG Z, DONNELLY M K, et al. Estimation of WECC system inertia using observed frequency transients[J]. IEEE Transactions on Power Systems,2005,20(2):1190-1192.
- [24] 胡安平,杨波,潘鹏鹏,等.基于电力电子接口的储能系统惯性特征研究[J].中国电机工程学报,2018,38(17):4999-5008+5297.
- HU Anping, YANG Bo, PAN Pengpeng, et al. Study on inertial characteristics of energy storage system with power electronic interface[J]. Proceedings of the CSEE, 2018,38(17):4999-5008+5297.
- [25] 施贵荣,孙荣富,丁华杰,等.大规模风电并网的评估指标体系构建与应用[J].电网技术,2021,45(3):841-848.
- SHI Guirong, SUN Rongfu, DING Huajie, et al. Construction and application on evaluation index system of large-scale wind power integration[J]. Power System Technology,2021,45(3):841-848.
- [26] 孙荣富,王东升,丁华杰,等.风电消纳全生产过程评价方法[J].电网技术,2017,41(9):2777-2783.
- SUN Rongfu, WANG Dongsheng, DING Huajie, et al. Whole-process evaluation methods of wind power accommodation[J]. Power System Technology, 2017, 41 (9):2777-2783.
- [27] 李芬,陈正洪,蔡涛,等.并网光伏系统性能精细化评估方法研究[J].太阳能学报,2013,34(6):974-983.
- LI Fen, CHEN Zhenghong, CAI Tao, et al. Refinement assessment method of grid-connected pv system performance[J]. Acta Energiæ Solaris Sinica,2013,34(6): 974-983.
- [28] 杨立滨,张磊,刘艳章,等.基于分布式框架的新能源场站并网性能评估[J].电力建设,2022,43(5):137-144.
- YANG Libin, ZHANG Lei, LIU Yanzhang, et al. Grid-connection performance evaluation of renewable energy station under distributed framework[J]. Electric Power Construction,2022,43(5):137-144.
- [29] Electromagnetic compatibility (EMC)-Part 4-7: Testing and measurement techniques-General guide on harmonics and interharmonics measurements and instrumentation, for power supply systems and equipment connected thereto: IEC 61000-4-7[S]. IEC, 2009.
- [30] 孙华东,徐式蕴,许涛,等.新能源多场站短路比定义及指标[J].中国电机工程学报,2021,41(2):497-506.
- SUN Huadong, XU Shiyun, XU Tao, et al. Definition and index of short circuit ratio for multiple renewable energy stations[J]. Proceedings of the CSEE,2021,41(2):497-506.
- [31] 赵洪山,李静璇,米增强,等.基于CRITIC和改进Grey-TOPSIS的电能质量分级评估方法[J].电力系统保护与控制,2022,50(3):1-8.
- ZHAO Hongshan, LI Jingxuan, MI Zengqiang, et al. Grading evaluation of power quality based on CRITIC and improved Grey-TOPSIS[J]. Power System Protection and Control,2022,50(3):1-8.
- [32] 李杰.基于合作博弈和改进TOPSIS的电能质量评估方法研究[J].电力系统保护与控制,2018,46(20):109-115.
- LI Jie. Research on evaluation method of power quality based on cooperative game theory and improved TOPSIS [J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(20): 109-115.