

引用格式: 翟保豫, 梁树超, 徐志, 等. 计及暂态稳定性及动态支撑的跟/构网储能混联系统配比方法[J]. 电力科学与技术学报, 2026, 41(1): 23-35.

Citation: ZHAI Baoyu, LIANG Shuchao, XU Zhi, et al. Hybrid configuration method for grid-forming and grid-following energy storage systems considering transient stability and dynamic support[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2026, 41(1): 23-35.

计及暂态稳定性及动态支撑的跟/构网储能混联系统配比方法

翟保豫^{1,2}, 梁树超¹, 徐志¹, 江欢¹, 吴海洋¹

(1. 国网新疆电力有限公司电力科学研究院, 新疆 乌鲁木齐 830011; 2. 新疆大学电气工程学院, 新疆 乌鲁木齐 830046)

摘要: 随着可再生能源占比的大幅增加, 电力系统呈现出低惯量和弱阻尼的特征, 使得系统面临暂态稳定性问题。传统的跟网型储能系统缺乏自主支撑电力系统运行的能力, 需要配置构网型储能系统以增强电压支撑能力以及系统稳定性。为解决这一问题, 探讨了配置何种比例的构网型储能单元能够实现系统暂态稳定性和动态支撑能力增强。首先, 建立跟/构网混联系统的暂态模型, 分析接入构网型储能对混联系统暂态同步稳定性的影响机理并提出表征暂态稳定性变化的评价指标; 其次, 基于跟/构网混联系统暂态模型的时域目标特征, 提出表征动态支撑能力的评价指标, 并以暂态稳定性和动态支撑能力指标值作为输入, 比例配置结果作为输出, 提出一种基于改进灰色关联分析 (grey relational analysis, GRA)-VIKOR 的跟/构网配比方法; 最后, 以中国西部实际电力系统为案例进行分析, 验证所提配置方法的有效性。

关键词: 暂态稳定性; 动态支撑能力; 跟/构网混联系统; 跟/构网配比方法

DOI: 10.19781/j.issn.1673-9140.2026.01.003 中图分类号: TM712 文章编号: 1673-9140(2026)01-0023-13

Hybrid configuration method for grid-forming and grid-following energy storage systems considering transient stability and dynamic support

ZHAI Baoyu^{1,2}, LIANG Shuchao¹, XU Zhi¹, JIANG Huan¹, WU Haiyang¹

(1. Electric Power Research Institute, State Grid Xinjiang Electric Power Co., Ltd., Urumqi 830011, China;

2. School of Electrical Engineering, Xinjiang University, Urumqi 830046, China)

Abstract: With the significant increase in the proportion of renewable energy, power systems exhibit characteristics of low inertia and weak damping, posing challenges to transient stability. Traditional grid-following energy storage systems (GFL-ESS) lack the capability to autonomously support the operation of power systems, necessitating the configuration of grid-forming energy storage systems (GFM-ESS) to provide voltage support and enhance system stability. To address these issues, this paper investigates the proportion of GFM-ESS units required to effectively improve the transient stability and dynamic support capabilities of the system. First, a transient model of the hybrid grid-following (GFL) and grid-forming (GFM) system is developed to analyze the mechanism by which GFM-ESS integration affects the transient synchronization stability of the hybrid system, and evaluation indicators are proposed to characterize changes in transient stability. Second, based on the time-domain target characteristics of the transient model of the hybrid system, evaluation indicators are proposed to characterize dynamic support capabilities. Using the values of transient stability and dynamic support indicators as inputs and the configuration ratio as output, a GFL/GFM ratio configuration method based on an improved grey relational analysis (GRA)-VIKOR approach is proposed. Finally, the effectiveness of the proposed configuration method is verified through a case study of an actual power system in western China.

Key words: transient stability; dynamic support capability; hybrid GFL and GFM system; GFL/GFM ratio configuration method

收稿日期: 2024-12-20; 修回日期: 2025-04-22

基金项目: 新疆维吾尔自治区科技厅重大科技专项(2022A01004-1), 国家重点研发计划(2021YFB1507005)

通信作者: 徐志(1989—), 男, 硕士, 工程师, 主要从事新能源并网技术、电力系统运行与控制分析等研究; E-mail: 1024427075@qq.com

随着风电、光伏等新能源渗透率不断增加,越来越多的电力电子变换器取代了同步发电机,导致传统发电机不足以继续维持电力系统的稳定运行^[1]。目前,大多数新能源发电单元采用跟网型(grid following, GFL)控制,依赖锁相环(phase locked loop, PLL)跟随交流电网电压的频率/相位角来实现与电网的同步,难以在弱电网下稳定运行,且不具有电网主动支撑能力^[2-4]。基于构网型(grid forming, GFM)控制的新能源发电单元不依赖PLL即可实现电网自主同步,能够解决传统发电单元在弱电网下的稳定运行问题^[5-6],还具备电网惯量/频率和电压支撑的能力^[7-11],但其在强电网下稳定性较差,容易引起类似传统同步发电机组具有的低频振荡问题^[12-14]。

尽管目前电力系统中的新能源变流器主要采用GFL控制,但可以预见在不久的将来,系统中将有更多的GFM变流器运行^[15-18]。因此,需要对GFM变流器与基于PLL的GFL变流器之间的相互作用进行分析^[19],进一步明确在一个新能源场站中,GFL与GFM变流器的比例配置问题。文献[20-21]对GFM控制改善次同步振荡的机理进行了分析,指出GFM控制在无功环控制下变为“正电阻”,能够抵消部分由GFL控制带来的负阻尼的影响。文献[22]指出,在规划初期充分考虑GFM的动态响应特性是GFM技术亟待解决的挑战之一。基于此,文献[23-24]界定了GFM新能源接入电力系统对电网强度的影响,从短路比入手,研究了GFM设备个数与短路比的关系,但GFM设备在系统中的最优占比问题未得到解决。文献[25-27]主要研究了GFM设备占比对电力系统电压和频率的影响,以及对配电网和输电网之间电力交换的影响,但所使用的数值法只给出了GFM设备占比范围,并未精确给出GFM设备占比数值。文献[28]建立了GFM设备的优化模型,以确定GFM设备的最优数量和位置,但是除了考虑构网型储能系统(GFM-energy storage system, GFM-ESS)对电网稳定性的贡献外,还需要考虑其固有电压和频率的支撑能力。文献[29]在研究GFM-ESS调频方法的基础上,建立了考虑经济性和调频效果的优化模型,旨在得到GFM-ESS的最优容量和位置,然而其并未研究跟/构网混合系统中的配比问题。配置GFM-ESS能有效增大交流电网强度,其在加强稳定性的同时增强了场站的支撑能力^[30]。因此,出于确保系统稳定运行和降低投入成本的考虑,在对现有GFL

场站的构网改造过程中,需要解决如何配置GFL与GFM变流器设备间的比例问题。

针对上述文献研究的不足,本文首先通过建立跟/构网混联系统的暂态模型,分析GFM接入对原有GFL系统的影响,并进一步改变有功功率指令值,分析不同GFM接入容量下混联系统暂态稳定性的变化趋势;其次,将上述变化趋势转化为对GFM输出角频率的影响,得到表征GFM-ESS接入容量变化对系统暂态稳定性影响的等效指标,结合GFM-ESS场站动态支撑能力的量化指标,提出一种计及暂态稳定性和动态支撑能力的跟/构网混联系统中GFM-ESS占比配置方法;最后,基于中国西部某地区的电力系统对本文所提方法进行了有效验证。

1 GFM储能接入对系统暂态稳定性的影响

1.1 跟/构网储能混联系统数学模型

跟/构网储能混联系统拓扑结构如图1所示。 m 台GFL储能变流器与 n 台GFM储能变流器分别经LC滤波器和线路阻抗接入公共耦合点(point of common coupling, PCC),再通过输电线路与电网连接。其中, i_{abc1} 、 i_{abc2} 分别表示GFL和GFM变流器滤波电感上的电流; u_{abc1} 、 u_{abc2} 分别表示两类变流器的输出电压; L_{f1} 、 C_{f1} 和 L_{f2} 、 C_{f2} 分别表示其滤波电感与滤波电容; L_1 、 L_2 分别表示两类变流器与PCC之间连接线路的等效电感; R_1 和 R_2 分别表示两类变流器与PCC之间连接线路的等效电阻; U_{dc} 表示直流侧恒定电压源; U_{pcc} 表示PCC处的电压; R_g 、 L_g 分别表示连接到电网的电阻和电感。本文主要聚焦于变流器交流侧的特性分析,仅关注储能单元功率或容量的变化,而对直流侧DC-DC变换器的控制过程不做详细讨论。

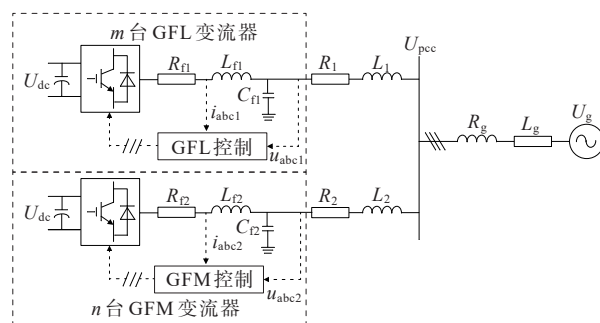


图1 跟/构网储能混联系统拓扑结构

Figure 1 Topology of hybrid system of GFL/GFM for energy storage

值 $P_{\text{ref,eq}}$, 其角频率 $(\omega_{\text{GFL}}/\omega_{\text{GFM}})$ 将逐渐降低, 但功角仍持续增大, 直至角速度差 $\Delta\omega_{\text{GFL}}/\Delta\omega_{\text{GFM}}$ 降为零。在此期间, $P_{\text{ref,eq}}$ 与 P'' 之间形成的区域称为减速面积。当角速度差归零时, 若减速面积等于加速面积, 则功角达到最大值 δ_{max} 。系统保持暂态同步稳定的条件是 δ_{max} 小于不稳定平衡点 δ_{u} , 否则将发生失稳。

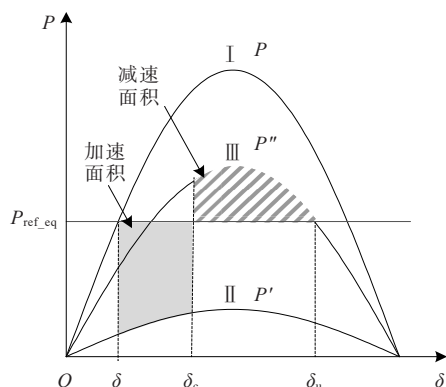
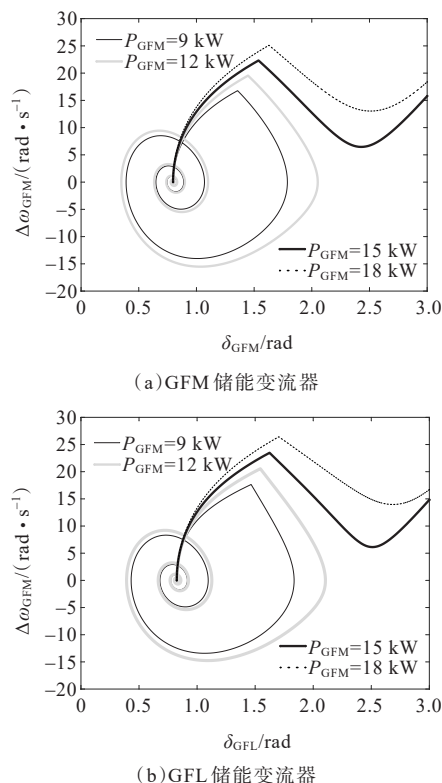


图3 功角曲线

Figure 3 Power angle curves

由于基于虚拟同步发电机控制的 GFM 变流器具备附加惯性环节, 其角速度 ω_{GFM} 变化较 GFL 更缓慢, 这使得 δ_{GFM} 的变化也更为平缓。因此, $\delta_{\text{GFM}} - \delta_{\text{GFL}} - \varphi_{\text{pq}}$ 会逐渐变为负值, 处于区间 $[-\pi/2, 0]$ 。在该区间中, 对应的正弦函数取负值, 余弦函数取正值。因此, 式(5)中等效机械功率项的值将减小, 相较于等效机械功率数值变化, 等效互阻尼项数值变化的影响较小, 则此时可忽略其对 GFL 储能变流器暂态特性的影响。因此, 在故障期间减小 GFM 储能的有功环的有功功率指令值可以减缓 ω_{GFM} 的加速过程, 降低故障期间 δ_{GFM} 的增幅。 δ_{GFL} 与 δ_{GFM} 的差越大, $\delta_{\text{GFM}} - \delta_{\text{GFL}} - \varphi_{\text{pq}}$ 的值越接近 $-\pi/2$, 正弦函数的值越小, GFL 储能等效机械功率项的值越小, ω_{GFL} 的偏移越小。依据等面积准则可知, 此时 GFM 储能的加入会减小故障期间 GFL 储能的加速面积, 增大故障切除之后的减速面积, GFL 储能的暂态稳定性变好。不同 GFM 储能有功指令值 P_{GFM} 下的并联系统相平面图如图 4 所示。

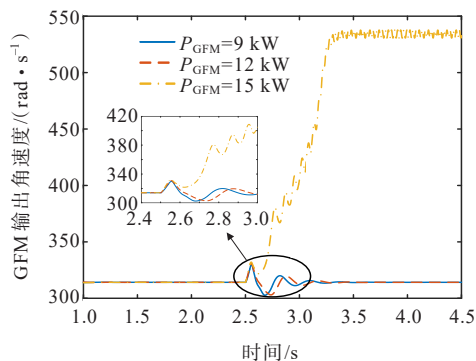
由图 4 还可以知道, 在故障期间, 减小 P_{GFM} 可以同时减缓 ω_{GFM} 和 ω_{GFL} 的加速过程, P_{GFM} 越小, ω_{GFM} 和 ω_{GFL} 的加速越小, 混联系统在面临动态扰动时展现出越优越的暂态稳定性。

图4 不同 GFM 储能有功指令值 P_{GFM} 下的并联系统相平面图Figure 4 Phase plan of parallel system with different active command values P_{GFM} for GFM energy storage

1.3 机理仿真验证

本文基于 MATLAB/Simulink 软件搭建如图 1 所示的跟/构网储能混联系统模型进行仿真分析。仿真时长设置为 4.5 s, GFL 输出纯有功电流, 系统在 2.5 s 时发生三相短路故障, 电网电压降为 0.2 p.u., 在 0.04 s 时故障清除, 电网电压逐渐恢复至 1.0 p.u。

以 3 kW 为间隔逐步增大 P_{GFM} , 则不同 P_{GFM} 下的输出角速度如图 5 所示。

图5 不同 GFM 有功指令值 P_{GFM} 下的输出角速度Figure 5 Plot of output angular velocity for different active command values P_{GFM} of GFM

由图 5 可知, 随着 P_{GFM} 的减小, GFM 储能变流器输出角速度得到改善, 即当系统发生故障时, 减

小 P_{GFM} 有助于减缓 ω_{GFM} 和 ω_{GFL} 的加速过程,从而增强跟/构网储能混联系统对电网暂态稳定性的响应能力,特别地, P_{GFM} 越小,电网暂态稳定性的改善效果越显著。

2 暂态稳定性及动态支撑能力评价指标

GFM 储能变流器容量的变化不仅影响跟/构网储能混联系统的暂态稳定性,同时也影响系统的动态支撑能力^[25]。为了综合考虑这两个方面的影响,本文提出了表征跟/构网储能混联系统暂态稳定性及动态支撑能力的评价指标,以确定 GFM 储能变流器的占比。

2.1 计及 GFM 储能影响的暂态稳定性评价指标

由 GFM 储能容量变化对暂态稳定性的影响机理分析可知, GFM 储能接入原有的跟网型储能系统(GFL-energy storage system, GFM-ESS)后,其暂态稳定性受 GFM 储能有功功率参考值 P_{ref} 的影响, P_{ref} 越小,暂态稳定性越好。由机理仿真验证结果进一步得到,随着 P_{ref} 的减小, ω_{GFM} 的加速过程得到减缓,间接降低了 GFL-ESS 输出角频率 ω_{GFL} 的振荡幅度。基于此,本文通过对比不同 GFM 储能容量占比下扰动过程中 ω_{GFM} 的振荡幅度,提出一种表征 GFM 储能接入后针对原有 GFL-ESS 的暂态稳定性的影响评价指标,以量化 GFM 储能容量改变对系统暂态稳定性的影响:

$$I = \int_0^{\Delta t} (\omega_{\text{GFM}} - \omega_0) dt \quad (6)$$

式中, Δt 为扰动过程中角频率达到稳定值时对应的的时间区间; ω_0 为初始角频率; I 为频率偏差的积分量,其值越小,跟/构网储能混联系统的暂态稳定性越好。

2.2 动态频率支撑能力评价指标

在频率事件扰动过程中,跟/构网储能混联系统的角频率首先下降到最低点 ω_{max} ,然后经过一次频率调节作用使角频率恢复到低于额定值的 ω_{id} ,最后通过自动发电控制将角频率恢复到额定值。因此,频率的演变可以分为 3 个时间尺度,即惯性响应、一次频率控制和二次频率控制。这 3 个尺度内的跟/构网储能混联系统频率支撑类指标^[31-32]如下。

1) 功率变化率。

R_{RoCoP} 被定义为评价功率爬坡速度的指标,其值越高,代表场站对电网频率突变的响应速度越快:

$$R_{\text{RoCoP}} = \frac{P_{\text{max}} - P_{t_0}}{T_C} \quad (7)$$

式中, P_{max} 为扰动期间达到的有功功率峰值; P_{t_0} 为初始功率; T_C 为功率上升至 P_{max} 所需的时间。

2) 等效惯量因子。

M 被定义为评估惯量支撑能力的指标,其值越大,表征场站毫秒级有功功率支撑能力越强:

$$M = \frac{(P_{t_m} - P_{t_0})}{\omega_{t_m} - \omega_N} \quad (8)$$

式中, P_{t_m} 为 t_m 时刻的有功功率; ω_{t_m} 为对应时刻的角频率; ω_N 为额定角频率; t_m 取值为 0.5 s。

3) 暂态频率支撑系数。

K_{deltf} 被定义为评价瞬时功率支撑能力的指标,其值越大,代表场站在频率变化时的暂态支撑能力越强:

$$K_{\text{deltf}} = \frac{\Delta P_{\text{max}}/S_N}{\Delta \omega_{\text{max}}} \quad (9)$$

式中, ΔP_{max} 、 $\Delta \omega_{\text{max}}$ 分别为第一个摆动周期内的最大功率偏差和最大频率偏差; S_N 为储能的装机容量。

4) 稳态频率偏差系数。

R_{deltf} 被定义为评估场站下垂控制效果的指标,其值越大,表明一次调频能力越优异:

$$R_{\text{deltf}} = \frac{\text{avg}(|P_{t_d}|) \Big|_{t_0}^{t_d} / S_N}{\text{avg}(|\omega_{t_d}|) \Big|_{t_0}^{t_d}} \quad (10)$$

式中, t_d 为有功功率发生变化的第一个时间周期;

$\text{avg}() \Big|_{t_0}^{t_d}$ 表示相关变量在 t_d 到 t_0 的平均值。

5) 能量密度。

λ_p 被定义为评价场站长时-能量支撑特性的指标,其值越高,表征场站对系统频率偏差的持续有功功率支援能力越强:

$$\lambda_p = \frac{\int_{t_0}^{t_c} (P - P_{t_0}) dt}{\int_{t_0}^{t_c} |\omega - \omega_N| dt} \quad (11)$$

式中, t_c 为机组执行二次调频所允许的控制时长。

2.3 动态电压支撑能力评价指标

GFM 储能可以等效为一个电压源,其具有使电压保持恒定的功能,因此跟/构网储能混联系统中的动态电压支撑能力评价指标包括故障期间的无功支持和故障清除后的电压恢复。跟/构网储能混联系统的各项电压支撑能力评价指标如下。

1) 快速无功响应常数。

γ 被定义为评价场站快速无功响应能力的指标,其值越大,代表无功功率的变化速率越高:

$$\gamma = \frac{(Q - Q_0)/S_N}{U - U_0} \quad (12)$$

式中, Q_0 为初始无功功率; U_0 为初始电压。

2) 暂态电压支撑系数。

K_{deltu} 被定义为表征场站暂态电压支撑能力的指标, 其值越大, 表明该能力越强:

$$K_{\text{deltu}} = \frac{\Delta Q_{\text{max}}/S_N}{\Delta U_{\text{max}}} \quad (13)$$

式中, ΔQ_{max} 、 ΔU_{max} 分别为最大无功功率偏差及对应的最大电压偏差。

3) 稳态电压偏差系数。

R_{deltu} 被定义为衡量场站 U - Q 下垂响应能力的指标, 其值越大, 表明电压调节性能越强:

$$R_{\text{deltu}} = \frac{\text{avg}(|Q - Q_0|) \Big|_0^{T_D}}{\text{avg}(|U - U_0|) \Big|_0^{T_D}} \quad (14)$$

式中, T_D 表示无功功率发生变化的第一个时间周期; $\text{avg}() \Big|_0^{T_D}$ 表示相关变量在 T_D 内的平均值。综上所述,

本文从暂态稳定性和动态支撑能力两个方面提出跟/构网储能混联系统的占比配置指标, 以暂态稳定性最好和动态支撑效果最佳为目标, 得到跟/构网储能混联系统中 GFM 储能占比的配置。

3 基于改进 GRA-VIKOR 的跟/构网储能混联系统配比评估方法

本文基于 GFM 储能对 GFL 系统暂态稳定性的影响以及动态支撑指标, 构建了跟/构网混联系统储能变流器协同配置评价模型。采用贝叶斯最佳-最差方法 (Bayesian best-worst method, BWM) 确定专家权重, 利用基于准则间相关性的准则重要性 (criteria importance though intercriteria correlation, CRITIC) 刻画指标冲突, 经博弈论求解得组合权重 ω_i , 并引入基于改进灰色关联分析 (grey relational analysis, GRA)-VIKO 模型, 实现 GFM 储能占比优化, 兼顾系统暂态稳定性与动态支撑能力。

3.1 BWM 主观权重计算

为充分体现 GFL 与 GFM 储能在混联系统中对暂态稳定性和动态支撑能力的不同作用, 本文采用 BWM 方法确定评估指标体系 ($A = \{A_1, A_2, \dots, A_n\}$) 中各指标的主观权重。具体步骤如下: 邀请 k 位专家在综合考虑各指标对系统性能影响的基础上, 分别选定最优指标 A_B 和最劣指标 A_W , 依据 1-9 标度法构

建最优、最劣比较矩阵 $C_B = \{a_{B1}, a_{B2}, \dots, a_{Bn}\}$ 和 $C_W = \{a_{1W}, a_{2W}, \dots, a_{nW}\}$ 。利用多项式分布对输入数据进行建模, 将目标层视为随机事件, 指标权重视为事件发生的概率, 进而基于贝叶斯分层模型将权重确定问题转化为最佳权重向量后验分布的概率估计, 最终获得群体主观权重 α_i 。该方法充分整合了专家意见, 提高了混合储能配置评价体系的科学性与适用性。

3.2 CRITIC 客观权重计算

为客观反映各指标在混合储能系统评价中的信息量与冲突性, 本文采用 CRITIC 方法进行计算。首先, 对各方案下的指标数据进行归一化处理, 构成标准矩阵 X'' ; 其次, 通过计算各指标的标准差获得变异系数 V_i (反映评价强度), 并利用相关系数刻画指标间的冲突性系数 S_i ; 最后, 将 V_i 与 S_i 相乘, 即可得到第 i 项指标的信息量, 信息量越大, 其客观权重 β_i 应越高。

为融合专家主观判断与客观数据特性, 本文进一步引入博弈论中纳什均衡思想, 构建组合赋权模型, 通过求解式 (7) 的目标函数得到主客观权重的组合权重 ω_i , 从而实现权重分配的最小异质性, 为后续改进 GRA-VIKOR 多目标决策模型提供合理的指标权重基础:

$$\begin{cases} \min J(\omega) = \sum_{i=1}^n \left(\omega_i \ln \frac{\omega_i}{\alpha_i} + \omega_i \ln \frac{\omega_i}{\beta_i} \right) \\ \text{s.t. } \sum_{i=1}^n \omega_i = 1, \omega_i \geq 0, i = 1, 2, \dots, n \end{cases} \quad (15)$$

式中, $J(\omega)$ 为权重 α_i 、 β_i 之间求得的折中权重; α_i 为各指标的主观权重; β_i 为各指标的客观权重; n 为指标的数量; ω_i 为基于博弈论得到的组合权重。

3.3 改进 VIKOR 评估模型

为弥补传统 VIKOR 法在有限信息条件下存在的信息遗漏问题^[33], 本文提出了将 GRA 与 VIKOR 方法相融合的改进模型, 针对暂态稳定性、电压支撑及频率支撑等关键指标, 对不同占比下 GFL 与 GFM 储能变流器的组合配置进行评价和排序, 从而确定最优的 GFM 储能占比。具体步骤如下。

1) 构建加权评估矩阵与理想序列。

选取 m 个评价对象和 n 个评价指标, 根据计算所得指标数据建立原始标准矩阵 $X = (x_{ij})_{m \times n}$ 。将 X 归一化后, 与各项指标的组合权重相乘, 得到加权评估矩阵 Z :

$$Z = (z_{ij})_{m \times n} = (x_{ij} \omega_i)_{m \times n} \quad (16)$$

在 GRA-VIKOR 方法中, 通过提取各指标实际

数据中的最优与最劣极限值构建参考序列,将其经归一化处理分别作为各指标的正理想解 Z^+ 和负理想解 Z^- 。

2) 计算备选方案所评估的群体效用值 Q_i 和个体遗憾值 R_i 。

以正理想解为参照对象时,各预选址方案的群体效用值和个体遗憾值为

$$\begin{cases} Q_i = \frac{\sum_{j=1}^n \omega_j (z_j^+ - z_{ij})}{(z_j^+ - z_j^-)}, & i = 1, 2, \dots, n \\ R_i = \max_j \left\{ \frac{\omega_j (z_j^+ - z_{ij})}{(z_j^+ - z_j^-)} \right\}, & i = 1, 2, \dots, n \end{cases} \quad (17)$$

式中, ω_j 为 z_j 的权重;当群体效用值 Q_i 和个体遗憾值 R_i 越小时,表明预选占比的方案越优; z_j^+ 、 z_j^- 分别为第 j 个评估指标正、负理想解。

3) 确定灰色关联系数。

本文采用 GRA 方法,分别将正、负理想解作为参考队列,待预选占比方案作为比较队列,在指标 z_j 下对象 Z_i 与正、负理想解的灰色关联度分别为

$$\begin{cases} \xi_{ij}^+ = \frac{\min_i \min_j |z_{ij} - z_j^+| + \rho \max_i \max_j |z_{ij} - z_j^+|}{|z_{ij} - z_j^+| + \rho \max_i \max_j |z_{ij} - z_j^+|} \\ \xi_{ij}^- = \frac{\min_i \min_j |s_{ij} - s_j^-| + \rho \max_i \max_j |s_{ij} - s_j^-|}{|z_{ij} - z_j^-| + \rho \max_i \max_j |z_{ij} - z_j^-|} \\ i = 1, 2, \dots, n \\ j = 1, 2, \dots, m \end{cases} \quad (18)$$

式中, ξ_{ij}^+ 、 ξ_{ij}^- 分别为第 i 种 GFM 储能变流器占比案例的第 j 个评估指标与正、负理想解的灰色关联系数。

4) 引入灰色关联度,确定最终的群体效用值 Q_i 和个体遗憾值 R_i 。

$$\begin{cases} Q_i = Q_i \sum_{j=1}^m \xi_{ij}^+ \omega_j, & i = 1, 2, \dots, n, j = 1, 2, \dots, m \\ R_i = R_i \max_j \xi_{ij}^- \omega_j, & i = 1, 2, \dots, n, j = 1, 2, \dots, m \end{cases} \quad (19)$$

5) 基于改进 VIKOR 的待评估占比方案的综合评价指标 T_i 。

$$T_i = \theta \left(\frac{Q_j - Q^+}{Q^- - Q^+} \right) + (1 - \theta) \left(\frac{R_j - R^+}{R^- - R^+} \right) \quad (20)$$

式中, $i = 1, 2, \dots, n$; $Q^+ = \min Q_i$, $Q^- = \max Q_i$, $R^+ = \min R_i$, $R^- = \max R_i$; θ 为决策机制系数,

$\theta \in [0, 1]$ 。当 $\theta \in [0, 0.5]$ 时,表示更侧重于追求个体遗憾值;当 $\theta \in [0.5, 1]$ 时,表示更看重群体效用值;由于本文不对 θ 做深度研究,因此 θ 取折中系数值为 0.5,意味着既要满足群体效用值最大化,又要使个体遗憾值最小。

6) 确定预选占比方案的排名。

假设最佳占比方案为 P_1 ,次佳占比方案为 P_2 ,按最大群体效用值 Q_i 对不同 GFM 占比方案进行排序。当最佳 GFM 占比方案满足以下 2 个条件时,其为最佳解:条件 1 为 $T(P_1) - T(P_2) \geq 1/n - 1$;条件 2 为最佳占比方案 P_1 在群体效用值 Q_i 和个体遗憾值 R_i 中排序最靠前。

基于上述两个条件选择最佳占比方案的标准如下。

标准 1:当条件 1 和条件同时满足时, P_1 为最佳占比方案。

标准 2:当仅满足条件 1 时, P_1 和 P_2 为最佳占比方案。

标准 3:当仅满足条件 2 时,任何不满足条件 1 的预选占比方案都是最佳占比方案。

3.4 跟/构网储能混联系统配比流程

GFM 储能变流器容量优化占比评估流程如图 6 所示。

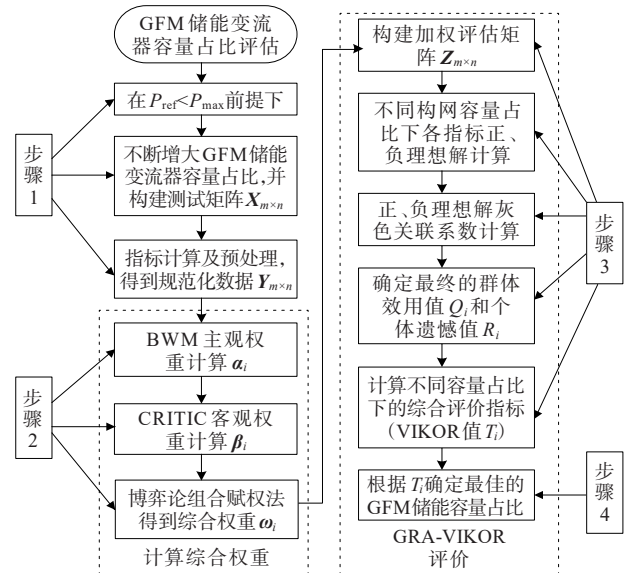


图 6 GFM 储能变流器容量优化占比评估流程

Figure 6 Flowchart for estimating optimal capacity share of GFM energy storage converters

1) 步骤 1:在 GFM 储能变流器有功功率参考 P_{ref} 小于其最大输出有功功率极限 P_{max} 的前提下,不断增大 GFM 储能变流器容量;对不同 GFM 储能变

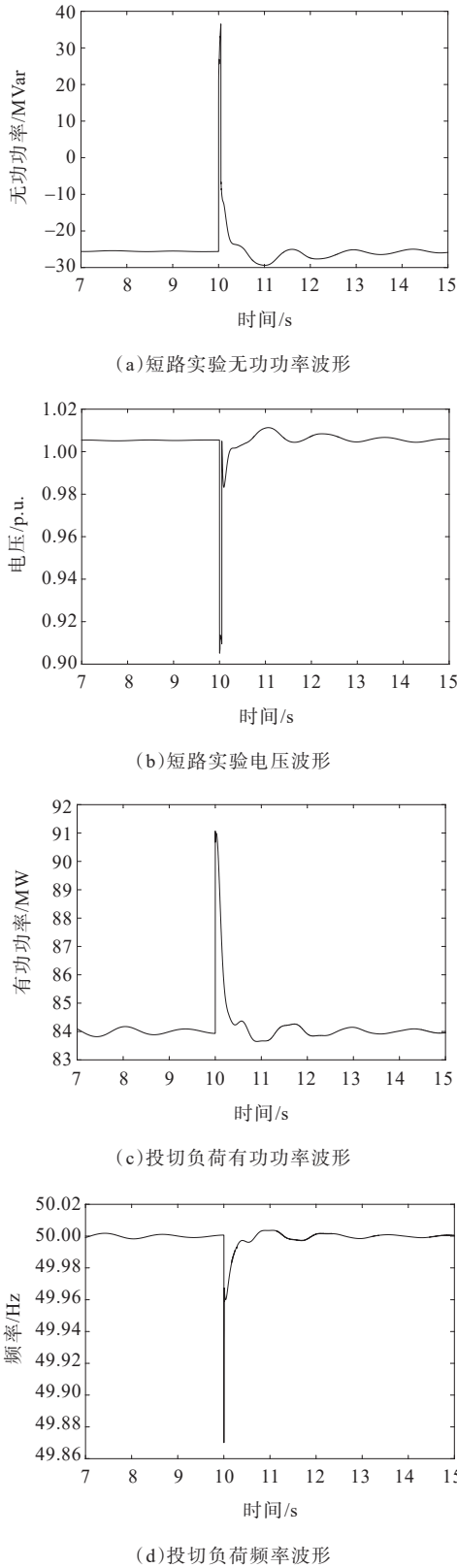


图 8 L16 站仿真结果

Figure 8 L16 station simulation results

组合权重通过BWM-CRITIC法获取主客观权重后,采用改进博弈论组合赋权方法,按式(15)计算得跟/构网储能混联系统各性能指标的组合权重

向量: $\omega_i = [0.153, 0.110, 0.158, 0.101, 0.098, 0.117, 0.073, 0.097, 0.093]^T$ 。由权重结果可知,暂态稳定性及惯量相关指标的权重较高,反映出该南疆区域电网对相关性能具有较强依赖性。跟/构网储能混联系统性能指标权重如图 9 所示。

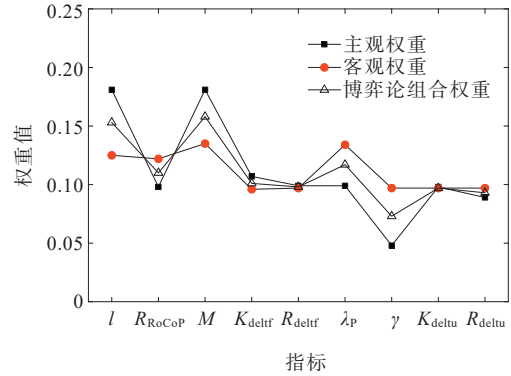


图 9 跟/构网储能混联系统性能指标权重

Figure 9 Weight of performance indicators of hybrid system of GFL/GFM for energy storage

4.2.2 改进 VIKOR 评估结果

根据文 4.3 中的 GRA-VIKOR 评估方法,结合式(8)将标准矩阵 X'' 与指标的组合权重相乘得到加权评估矩阵 Z ,并利用各评估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,得到各评估指标的正负理想解 Z^+ 、 Z^- 。其中,场景 1 中 $Z^+ = [0.116 6, 0.039 3, 0.134 0, 0.029 7, 0.029 1, 0.018 6, 0.025 1, 0.029 1, 0.028 3, 0.023 6]$, $Z^- = [0.002 4, 0.003 5, 0.012 1, 0.001 5, 0.001 5, 0.018 5, 0.003 9, 0.002 7, 0.001 1, 0.018 9]$ 。由式(18)可以得到正、负灰色关联系数,由式(17)可以得到群体效用值 Q_i 与个体遗憾值 R_i ,结合灰色关联系数得到修正后的群体效用 Q_i 与个体遗憾 R_i 。最后,根据式(20)得到不同 GFM 储能变流器容量占比下跟/构网储能混联系统的综合评估指标 T_i ,场景 2、3 同理,计算结果如表 1 所示,3 种场景下的综合评估指标 T_i 如图 10 所示,其中 Case 1~19 分别对应不同储容量占比情况。

结合表 1 和图 10 可知,场景 1 中最佳占比方案的 GFM 储能为 25%,次佳占比方案的 GFM 储能为 35%,其满足条件 2,但不满足条件 1,属于第 3 条标准,即当满足条件 2 时,任何不满足条件 1 的预选占比方案都是最佳占比方案。即 GFM 占比为 25%、35% 时都不满足条件 1,短路比为 2.5(弱电网)的南疆某地区 L16 站跟/构网储能混联系统场

表 1 GRA-VIKOR 评估结果
Table 1 GRA-VIKOR assessment results

不同储容量占比情况	场景 1					场景 2					场景 3				
	GFM 储能容量占比/%	GFL 容量占比/%	修正的群体效用值	修正的个体遗憾值	T_i	GFM 储能容量占比/%	GFL 容量占比/%	修正的群体效用值	修正的个体遗憾值	T_i	GFM 储能容量占比/%	GFL 容量占比/%	修正的群体效用值	修正的个体遗憾值	T_i
Case 1	5	95				5	95	5.04	0.14	0.30	5	95	5.28	0.11	0.26
Case 2	10	90				10	90	6.49	0.21	0.69	10	90	5.89	0.13	0.44
Case 3	15	85	5.55	0.15	0.66	15	85	5.12	0.15	0.31	15	85	6.54	0.17	0.65
Case 4	20	80	5.91	0.14	0.66	20	80	5.39	0.15	0.31	20	80	6.60	0.20	0.73
Case 5	25	75	5.41	0.11	0.41	25	75	5.83	0.16	0.45	25	75	6.61	0.23	0.83
Case 6	30	70	4.83	0.14	0.47	30	70	5.26	0.21	0.49	30	70	6.37	0.26	0.85
Case 7	35	65	4.32	0.15	0.43	35	65	5.00	0.24	0.52	35	65	5.47	0.27	0.71
Case 8	40	60	4.85	0.16	0.59	40	60	4.86	0.26	0.55	40	60	5.35	0.27	0.70
Case 9	45	55	4.78	0.16	0.62	45	55	4.74	0.28	0.56	45	55	5.05	0.28	0.66
Case 10	50	50	4.66	0.17	0.63	50	50	4.61	0.29	0.57	50	50	5.06	0.29	0.68
Case 11	55	45	4.40	0.17	0.62	55	45	4.78	0.30	0.63	55	45	5.27	0.29	0.73
Case 12	60	40	4.26	0.18	0.61	60	40	4.46	0.31	0.60	60	40	4.99	0.29	0.68
Case 13	65	35	4.19	0.18	0.62	65	35	4.20	0.31	0.56	65	35	4.44	0.29	0.59
Case 14	70	30	3.93	0.18	0.58	70	30	3.96	0.32	0.53	70	30	5.13	0.29	0.72
Case 15	75	25	3.94	0.18	0.59	75	25	3.65	0.32	0.49	75	25	4.72	0.30	0.64
Case 16	80	20	3.69	0.19	0.56	80	20	3.55	0.32	0.48	80	20	4.35	0.30	0.58
Case 17	85	15	3.51	0.19	0.53	85	15	4.81	0.32	0.70	85	15	3.89	0.30	0.50
Case 18	90	10	3.46	0.19	0.53	90	10	4.69	0.33	0.69	90	10	4.42	0.30	0.60
Case 19	95	5	3.24	0.19	0.50	95	5	4.59	0.33	0.68	95	5	4.06	0.30	0.53

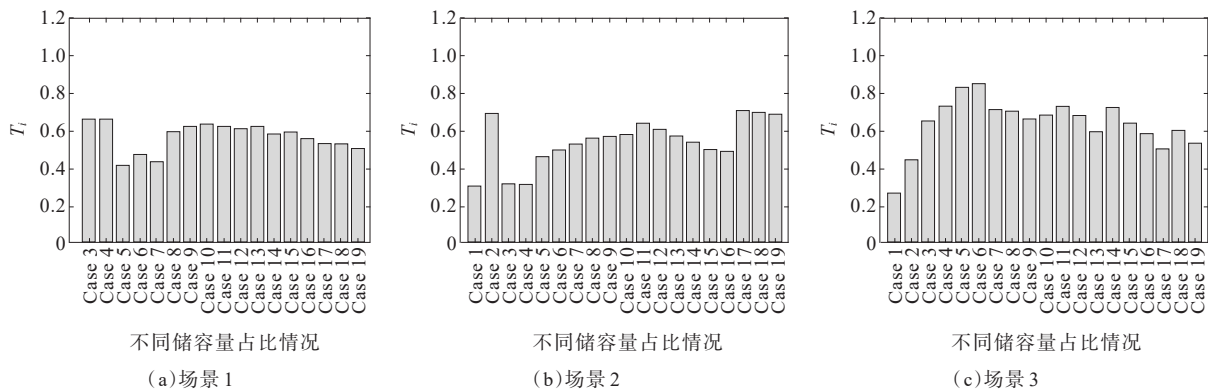


图 10 3 种场景下的综合评估指标 T_i 结果

Figure 10 Comprehensive evaluation indicator T_i results in three scenarios

景下,最优占比中 GFM 储能占比范围为 25%~35%。同理可得,在短路比为 4(较强电网)时南疆某地区 L16 站跟/构网储能混联系统场景下,最优占比中 GFM 储能占比范围为 5%~20%。在短路比为 7(强电网)时南疆某地区 L16 站跟/构网储能混联系统场景下最优占比中 GFM 储能占比为 5%。

为验证所提方法的有效性,本文采用不同的多准则决策方法,对各场景下所配 GFM 储能容量占比进行评估分析,多准则决策方法对比如表 2 所示。

表 2 多准则决策方法对比
Table 2 Comparison of multi-criteria decision-making methods

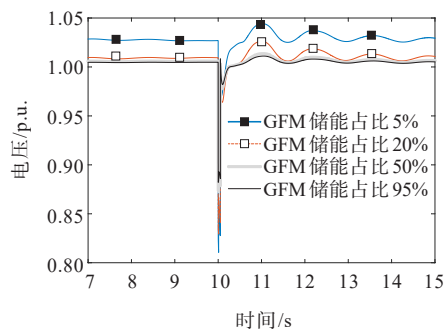
场景	储能容量占比/%		
	本文方法	传统 VIKOR 法	TOPSIS 法
1	25~35	25~40	35
2	5~20	5~20	20
3	5	5	5

由表 2 可知,本文所提基于博弈论和 GRA-VIKOR 的 GFM 储能变流器占比的评估结果与其他评估方法的评估结果基本一致,验证了该模型的适应性。在传统 VIKOR 评估法中,场景 1 的评估结

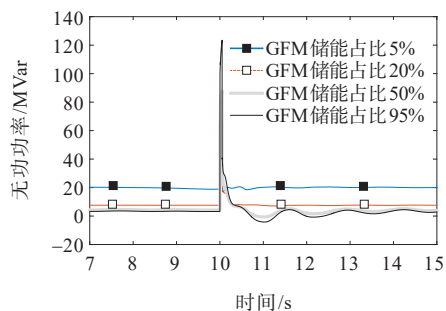
果存在误差。该方法在有限信息条件下存在信息遗漏问题,可能导致 GFM 储能变流器占比结果判断错误。

4.2.3 DIgSILENT 仿真验证

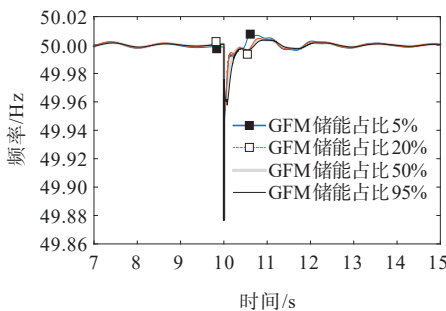
为验证所提方法的有效性,本文基于 DIgSILENT 平台验证场景 3 下 GFM 储能变流器优化占比范围是否正确,相关仿真结果如图 11 所示。



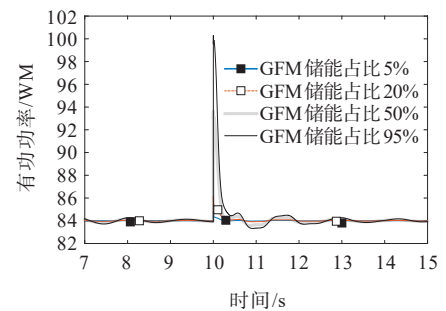
(a)L16 场站电压变化曲线



(b)L16 场站无功变化曲线



(c)L16 场站频率变化曲线



(d)L16 场站有功功率变化曲线

图 11 场景 3 下不同 GFM 储能容量占比仿真结果

Figure 11 Simulation results of energy storage capacity share of different GFMs in scenario 3

从图 11(a)、11(b)可以看出,在短路实验中,GFM 储能占比为 5% 时相较其他储能占比更能够在保证电压快速恢复和无功功率稳定支撑的同时,避免过度动态响应,从而实现更优的电压稳定性与无功支撑效果,具体表现为各项电压支撑能力指标表现均衡,快速无功响应能力适度(γ 适中),暂态电压支撑效果良好(K_{detu} 较大),稳态电压调节能力优异(R_{detu} 表现突出),且此时暂态响应指标数值最小,系统稳定性最好。从图 11(c)、11(d)可以看出,在投切负荷事件中,GFM 储能占比为 5% 时相较于其他储能占比表现出最佳动态与稳态特性,频率偏移幅度最小,恢复速度最快且无显著振荡,功率响应过程中的尖峰幅值较低且动态过渡平稳。尽管在等效惯量因子、暂态频率支撑系数和稳态频率偏差系数等指标上,GFM 占比为 5% 的配置不如其他较高占比的方案,但在 GFM 储能占比为 5% 时,依然能够满足实际系统的动态与稳态支撑需求。同时,它具备最低的资源投入和经济成本,因而成为性能和经济性最优的配置方案。场景 1 和场景 2 的结果同理,本文不再进行仿真验证。

5 结语

本文基于提升 GFM-ESS 暂态稳定性和主动支撑能力两方面的考虑,提出了一种跟/构网储能混联场站的配比方法。主要结论如下。

1) 基于跟/构网储能混联系统的暂态模型,分析了 GFM-ESS 容量变化对混联系统暂态稳定性的影响。结果表明,随着 GFM 储能的有功功率指令值的减小,混联系统在遭遇动态扰动时表现出更优的暂态稳定性。

2) 提出了表征暂态稳定性和主动支撑能力的评价指标,该评价指标既考虑了系统的暂态稳定性机理,又兼顾了 GFM 控制的多尺度主动支撑特性。

3) 基于所提评价指标,采用 GRA-VIKOR 方法求解多目标配比模型。结果显示,在短路比为 2.5 (弱电网)的场景下,混联系统中 GFM-ESS 的最优占比范围为 25%~35%;在短路比为 4 (较强电网)的场景下,最优占比范围为 5%~20%;在短路比为 7 (强电网)的场景下,最优占比为 5%。

未来的研究将考虑新能源的随机性、负荷变化和故障不确定性等因素,进一步探讨如何优化 GFM 场站的配置问题。

参考文献:

[1] 吕志鹏,盛万兴,刘海涛,等.虚拟同步机技术在电力系

- 统中的应用与挑战[J].中国电机工程学报,2017,37(2): 349-360.
- LYU Zhipeng, SHENG Wanxing, LIU Haitao, et al. Application and challenge of virtual synchronous machine technology in power system[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(2): 349-360.
- [2] 朱廷猛,孙海顺,秦世耀,等.弱电网下双馈风机并网系统的次同步振荡研究[J].电网技术,2021,45(5): 1641-1648. ZHU Tingmeng, SUN Haishun, QIN Shiyao, et al. Sub-synchronous oscillation in DFIG system connected to weak grid[J]. Power System Technology, 2021, 45(5): 1641-1648.
- [3] 闫培雷,葛兴来,王惠民,等.弱电网下新能源并网逆变器锁相环参数优化设计方法[J].电网技术,2022,46(6): 2210-2221. YAN Peilei, GE Xinglai, WANG Huimin, et al. PLL parameter optimization design for renewable energy grid-connected inverters in weak grid[J]. Power System Technology, 2022, 46(6): 2210-2221.
- [4] 闫征,赵清松,徐建源.考虑直流侧电源特性影响的跟网型变换器控制参数设计[J].电力系统保护与控制,2025, 53(5): 135-144. YAN Zheng, ZHAO Qingsong, XU Jianyuan. Control parameter design for a grid-following converter considering the influence of DC-side characteristics[J]. Power System Protection and Control, 2025, 53(5): 135-144.
- [5] 段玉,朱子民,王小云,等.基于改进粒子群算法的自适应构网型变流器控制策略[J].广东电力,2024,37(2): 10-17. DUAN Yu, ZHU Zimin, WANG Xiaoyun, et al. Adaptive grid-type converter control strategy based on improved particle swarm algorithm[J]. Guangdong Electric Power, 2024, 37(2): 10-17.
- [6] 黄全全,韦微,曾嘉成,等.基于等效内电势重塑的构网型逆变器故障穿越控制策略[J].电网与清洁能源,2025, 41(10): 14-23. HUANG Quanquan, WEI Zheng, ZENG Jiacheng, et al. Fault ride-through control strategy for GFM inverters based on equivalent internal potential reshaping[J]. Power System and Clean Energy, 2025, 41(10): 14-23.
- [7] 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.
- [8] 潘荣才,岳菁鹏,张席,等.考虑构网-跟网型单元协同的孤岛交直流混合微电网群分布式控制策略[J].供用电, 2025, 42(3): 46-57. PAN Rongcai, YUE Jingpeng, ZHANG Xi, et al. Distributed control strategy for islanded AC/DC hybrid microgrid cluster considering coordination between grid-forming and grid-following units[J]. Distribution & Utilization, 2025, 42(3): 46-57.
- [9] 袁敞,王俊杰,胡嘉琦,等.平衡频率与功率振荡的虚拟同步机惯量阻尼参数优化控制[J].电力科学与技术学报, 2023, 38(4): 15-23+56. YUAN Chang, WANG Junjie, HU Jiaqi, et al. Optimal control of inertia damping parameters of virtual synchronous machine with balance frequency and power oscillation[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2023, 38(4): 15-23+56.
- [10] 杨葆鑫,邢文奇,刘鹏飞,等.基于直流电压前馈的构网型光伏稳定性优化控制策略[J].高压电器,2024,60(12): 213-222. YANG Baoxin, XING Wenqi, LIU Pengfei, et al. Optimal control strategy of stability for grid-forming photovoltaic based on DC voltage feedforward[J]. High Voltage Apparatus, 2024, 60(12): 213-222.
- [11] 杨振奥,陈俊儒,刘雨姗,等.计及暂态响应与动态支撑能力的跟/构网型变流器容量配比方法[J].智慧电力, 2025, 53(12): 123-130. YANG Zhen'ao, CHEN Junru, LIU Yushan, et al. A capacity allocation method for grid-following/grid-forming converters considering transient response and dynamic support capability[J]. Smart Power, 2025, 53(12): 123-130.
- [12] 秦世耀,齐琛,李少林,等.电压源型构网风电机组研究现状及展望[J].中国电机工程学报,2023,43(4):1314-1334. QIN Shiyao, QI Chen, LI Shaolin, et al. Research status and prospects of voltage source grid wind turbines [J]. Proceedings of the CSEE, 2023, 43(4): 1314-1334.
- [13] 林宇轩,李威,朱玲,等.电网电压跌落下构网型变流器暂态控制策略综述[J].电力工程技术,2025,44(2): 55-68. LIN Yuxuan, LI Wei, ZHU Ling, et al. Review of transient control strategies for grid-forming converters under grid voltage sag conditions[J]. Electric Power Engineering Technology, 2025, 44(2): 55-68.
- [14] 王吉利,占领,张钢,等.提高构网型储能系统功角稳定性的附加阻尼方法[J].电力科学与技术学报,2023,38(4): 75-81+103. WANG Jili, ZHAN Ling, ZHANG Gang, et al. Additional damping method for improving the power angle stability of grid-forming energy storage system[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2023, 38(4): 75-81+103.
- [15] 严宇航.构网型储能支撑新型电力系统建设的应用展望[J].电工材料,2024(5): 71-74. YAN Yuhang. Application prospect of new power system construction supported by reticulated energy storage[J]. Electrical Engineering Materials, 2024(5): 71-74.
- [16] 李亚楼,赵飞,樊雪君.构网型储能及其应用综述[J].发电技术,2025,46(2): 386-398. LI Yalou, ZHAO Fei, FAN Xuejun. Review of grid-forming energy storage and its applications[J]. Power Generation Technology, 2025, 46(2): 386-398.
- [17] 李明,亚夏尔·吐尔洪,郑云平,等.构网型储能支撑高

- 比例新能源并网稳定运行技术[J].热力发电,2025,54(3):59-68.
- LI Ming, YAXAR Turgun, ZHENG Yunping, et al. Stable operation technology for high proportion of new energy connected to power grid supported by grid-forming energy storage [J]. Thermal Power Generation, 2025, 54(3): 59-68.
- [18] 刘延龙,陈晓光,姚爽爽,等.基于构网型SVG控制优化的双馈风场高频谐振抑制分析[J].电力建设,2024,45(11): 125-136.
- LIU Yanlong, CHEN Xiaoguang, YAO Shuangshuang, et al. Analysis of high-frequency resonance suppression in doubly-fed wind farms based on grid-forming SVG control optimization[J]. Electric Power Construction, 2024, 45(11): 125-136.
- [19] LI M, ZHANG X, GUO Z X, et al. Impedance adaptive dual-mode control of grid-connected inverters with large fluctuation of SCR and its stability analysis based on D-partition method[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2021, 36(12): 14420-14435.
- [20] 刘志坚,骆军,梁宁,等.虚拟同步控制对风电并网系统次同步振荡阻尼影响分析[J].电力系统自动化,2023,47(1): 135-142.
- LIU Zhijian, LUO Jun, LIANG Ning, et al. Analysis of influence of virtual synchronous control on subsynchronous oscillation damping for grid-connected wind power system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2023, 47(1): 135-142.
- [21] 刘朋印,谢小荣,李原,等.构网型控制改善跟网型变流器次/超同步振荡稳定性的机理和特性分析[J].电网技术,2024,48(3): 990-997.
- LIU Pengyin, XIE Xiaorong, LI Yuan, et al. Mechanism and characteristics of grid-forming control for improving sub/super synchronous oscillation stability of grid-following-based grid-connected converter[J]. Power System Technology, 2024, 48(3): 990-997.
- [22] 王伟,周少泽,黄萌,等.构网型技术:演进历程、功能定位与应用展望[J].电力系统自动化,2025,49(1):1-13.
- WANG Wei, ZHOU Shaoze, HUANG Meng, et al. Grid-forming technologies: evolution history, function, and application prospects [J]. Automation of Electric Power Systems, 2025, 49(1): 1-13.
- [23] LUO S, et al. Application of grid-forming control in improving the oscillation stability of power systems with high proportion renewable energy integration[J]. Southern Power System Technology, 2023, 17(5): 39-48.
- [24] WANG X, 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.
- [25] QUEDAN A, WANG W Z, RAMASUBRAMANIAN D, et al. Dynamic behavior of combined 100% IBR transmission and distribution networks with grid-forming and grid-following inverters[C]//2023 IEEE Power & Energy Society Innovative Smart Grid Technologies Conference (ISGT). Washington, DC, USA. IEEE, 2023: 1-5.
- [26] 王双双,吴雪莲,李兆伟,等.计及构网型新能源主动支撑特性的频率紧急控制适应性分析[J].电力工程技术, 2025, 44(2): 80-89.
- WANG Shuangshuang, WU Xuelian, LI Zhaowei, et al. Analysis of the adaptability of frequency emergency control considering the active support characteristics of grid-forming new energy[J]. Electric Power Engineering Technology, 2025, 44(2): 80-89.
- [27] QUEDAN A, WANG W Z, RAMASUBRAMANIAN D, et al. Behavior of a high inverter-based resources distribution network with different participation ratios of grid-forming and grid-following inverters[C]//2021 North American Power Symposium (NAPS). College Station, TX, USA: IEEE, 2021.
- [28] WU C, et al. Siting and sizing method of grid-forming converters for improving stability of power system with renewable energy[J]. Automation of Electric Power Systems, 2023, 47(12): 130-136.
- [29] 刘默斯,孙志媛,李今昭,等.基于CMMOPSO算法的构网型储能接入高比例新能源电网的优化配置[J].储能科学与技术,2025,14(1):162-171.
- LIU Mosi, SUN Zhiyuan, LI Jinzhao, et al. Research on the optimal configuration of grid-forming energy storage connected to power systems with high proportional renewable energy based on CMMOPSO[J]. Energy Storage Science and Technology, 2025, 14(1): 162-171.
- [30] 严文博,黄云辉,王栋,等.基于虚拟母线电压控制的构网型储能变流器稳定性优化研究[J].储能科学与技术, 2024, 13(5): 1532-1541.
- YAN Wenbo, HUANG Yunhui, WANG Dong, et al. Investigation of stability optimization of grid-forming energy storage converters based on virtual bus voltage control[J]. Energy Storage Science and Technology, 2024, 13(5): 1532-1541.
- [31] LIU Y S, CHEN J R, GE C C, et al. Index system for evaluating the supporting capability of the inverter-based resource[C]//2023 IEEE Power & Energy Society General Meeting (PESGM). Orlando, FL, USA. IEEE, 2023: 1-5.
- [32] 刘雨姗,陈俊儒,常喜强,等.构网型储能变流器并网性能的多层级评价指标体系及应用[J].中国电力,2025,58(3):193-203.
- LIU Yushan, CHEN Junru, CHANG Xiqiang, et al. Multi-level evaluation index system and application of grid-connected performance of grid-forming energy storage converters[J]. Electric Power, 2025, 58(3): 193-203.
- [33] WENG X J, YANG S. Private-sector partner selection for public-private partnership projects based on improved CRITIC-EMW weight and GRA-VIKOR method[J]. Discrete Dynamics in Nature and Society, 2022, 2022(1): 9374449.