

# 兼顾电力系统新能源消纳和小干扰稳定支撑的 跟网型与构网型储能联合规划

冯建洲, 胡泽春

(清华大学电机工程与应用电子技术系, 北京市 海淀区 100084)

## A Grid-following and Grid-forming Energy Storage Co-planning Method for Enhancing Renewable Energy Accommodation and Small-signal Stability of Power Systems

FENG Jianzhou, HU Zechun

(Department of Electrical Engineering, Tsinghua University, Haidian District, Beijing 100084, China)

**ABSTRACT:** Many wind and photovoltaic power sources are integrated into the grid via grid-following power electronic converters, which may induce small-signal oscillations and threaten the secure operation of power systems. Emerging energy storage systems not only mitigate the volatility of renewable energy but also enhance system stability through grid-forming control. This paper first derives the generalized operational short-circuit ratio (gOSCR) and its critical value for the coordinated planning of grid-following and grid-forming energy storage systems, serving as indicators of small-signal stability. To address the highly nonlinear characteristics of gOSCR and its critical threshold, a machine learning-based surrogate model is developed and embedded into a multi-type energy storage planning model that simultaneously considers the integration of renewable energy. Furthermore, the proposed joint planning model is reformulated as a mixed-integer linear programming (MILP) problem to improve computational efficiency. Finally, simulations on a 4-bus system and the IEEE 39-bus system validate the effectiveness of the proposed method.

**KEY WORDS:** grid-following energy storage; grid-forming energy storage; renewable energy accommodation; generalized operational short-circuit ratio (gOSCR); small-signal stability

**摘要:**大量风力光伏发电通过跟网型电力电子变流器接入电网,容易引起小干扰振荡问题,威胁电力系统安全运行。新型储能系统既可平抑新能源波动,又能通过构网型控制增强系统稳定性。首先推导了面向跟/构网型储能联合规划的广义运行短路比及其临界值,以衡量系统的小干扰稳定程度。针对广义运行短路比及其临界值的高度非线性问题,采用机器学习方法构建代理模型,并将其嵌入同时考虑新能源消纳

的多类型储能联合规划模型中。进一步地,将所构建的联合规划模型转换为混合整数线性优化问题,以提高求解效率。最后,针对4节点和IEEE-39节点系统进行仿真,结果验证了所提方法的有效性。

**关键词:**跟网型储能;构网型储能;新能源消纳;广义运行短路比;小干扰稳定

**DOI:** 10.13335/j.1000-3673.pst.2025.0672

## 0 引言

随着可再生能源的发展,风电、光伏机组在电力系统中的占比逐年升高。另一方面,大量电力电子接口接入交流电力网络,其控制策略可分为跟网型(grid-following, GFL)和构网型(grid forming, GFM)2种<sup>[1]</sup>。可再生能源和电力电子设备的大规模接入给电力系统规划、运行带来了巨大挑战。一方面,可再生能源的随机性、波动性要求系统保持足够的调峰能力,给电力系统运行经济性带来挑战。在系统中配置多类型不同平衡周期的储能能够满足电力系统不同时间尺度的能量平衡需求<sup>[2-5]</sup>,有利于新能源消纳。另一方面,目前并网变流器主要采用GFL变流器,大量跟网型并网变流器采用的锁相环控制容易在弱电网中引发小干扰失稳的现象<sup>[6-12]</sup>,给系统安全运行带来挑战。GFM变流器因其控制方式的不同,在弱电网下有利于提高系统的小干扰稳定性。当前GFM和GFL配置成本存在差异,因此有必要兼顾经济性和安全性考虑GFL/GFM储能的联合配比。

虽然已经有很多文献研究了面向新能源消纳的各类储能规划方法<sup>[2-5]</sup>,但是这些研究鲜有考虑GFL/GFM变流器的配比。虽有文献分析了跟/构网型储能对系统小干扰稳定性的影响机理<sup>[13-14]</sup>,但未

基金项目:国家重点研发计划项目(2022YFB2403000)。

Project Supported by the National Key Research and Development Program of China under Grant 2022YFB2403000.

给出考虑系统小干扰稳定支撑的变流器配置方法。另外有研究使用逐步增加 GFM 变流器的方法估算 GFL/GFM 容量配比<sup>[15-16]</sup>, 但并非优化方法, 难以保证最优性。文献[17]基于参与因子及广义短路比进行 GFL/GFM 储能规划, 该方法无法考虑变流器运行工况, 同时也是启发式的求解思路。文献[18]基于广义运行短路比进行 GFL/GFM 规划并采用启发式方法求解, 难以嵌入已有的储能规划模型以兼顾其他优化目标。文献[19]对小干扰稳定域进行分段线性化研究 GFM 的配比, 可以考虑变流器的全运行域, 但是仅能在给定 GFL 容量的情况下规划 GFM 的容量。文献[20]利用特征值优化进行 GFM 规划, 无法考虑变流器运行工况, 也无法实现 GFL/GFM 联合规划。

综上所述, 已有的跟/构网型储能规划研究存在以下几个问题: 1) 已有研究大多在给定 GFL 容量的情况下配置 GFM, 无法实现联合优化, 同时已有研究仅规划功率容量并未配置对应的能量容量; 2) 已有大部分研究无法考虑变流器的运行工况对于小干扰稳定的影响; 3) 已有研究大多采用启发式方法求解优化问题, 无法嵌入到兼顾其他优化目标的电力系统规划模型当中。

为解决以上所提的问题, 本文主要贡献如下:

1) 基于广义运行短路比, 构建面向跟/构网型储能联合规划的多类型电力电子馈入电力系统小干扰稳定安全指标和小干扰稳定域, 并基于此提出系统强度约束。

2) 提出基于深度神经网络的小干扰稳定域拟合方法, 基于训练好的神经网络, 构建代理模型以精确表示小干扰稳定域。所提代理模型是混合整数线性模型, 可嵌入兼顾其他目标的规划模型中高效求解。

3) 提出兼顾新能源跨季节消纳、提升系统小干扰稳定性的多类型储能联合规划方法, 方法可以考虑多种不同持续充/放电时长储能的联合规划。不同于已有研究在给定 GFL 容量的前提下规划 GFM 容量, 本文所提方法能够在小干扰稳定域内进行 GFL 和 GFM 储能的联合优化配置。

## 1 问题描述

多类型电力电子变流器馈入的交流电网如附录图 A1 所示, 其中包含  $n$  台 GFL 变流器,  $m$  台 GFM 变流器以及  $N_{th}$  台同步机, 分别连接在节点  $1, 2, \dots, N_{node}$  上。其中节点 1 至  $n$  为 GFL 节点,  $m$  台 GFM 可布置在任意一个非同步机节点, 此外系统

还包含  $n_{arg}$  个中间节点, 最后  $N_{th}$  个节点为同步机节点。

在这个基础上, 要在储能待选节点集  $\Omega_{ess}$  中的任意位置处配置一定能量容量和功率容量同时具有不同平衡周期的 GFL/GFM 储能, 使得系统在满足小干扰稳定约束的前提下, 最小化系统的投资成本以及年度运行成本, 同时尽可能地提高新能源消纳水平。为考虑系统跨季节能量平衡, 将储能按平衡周期划分为年平衡、月平衡和日平衡储能, 它们可以分别对应不同的具体储能种类和技术路线。整个问题可以建模如式(1)所示:

$$\begin{cases} \min_x C_{inv} + C_{op} + C_{om} \\ \text{s.t.} \begin{cases} \psi(x) \in \Omega_{SS} \\ x \in \chi \end{cases} \end{cases} \quad (1)$$

式中:  $C_{inv}$ 、 $C_{op}$  和  $C_{om}$  分别为投资、运行和维护成本;  $\psi(x)$  描述决策变量  $x$  与小干扰稳定性分析之间的映射关系;  $\Omega_{SS}$  为系统小干扰稳定域;  $\chi$  为决策变量可行域。

该问题的挑战主要体现在: 一方面, 系统的小干扰稳定性不仅受储能系统的功率容量、控制方式、选址及运行状态的影响, 还受到电网结构约束。这一特性导致稳定性分析呈现出高度非线性, 难以直接嵌入优化模型求解。另一方面, 储能系统的选址将影响电网潮流分布, 同时储能的功率/能量容量决定其削峰填谷的能力, 进而影响系统运行的经济性和新能源消纳水平。图 1 展示了 2 个子目标之间的耦合及相关关系, 规划、运行、稳定 3 个子模块分别属于年度、小时、短时 3 个时间尺度, 但相互关联耦合。同时考虑这 3 个问题有助于挖掘储能多重功能, 同时令规划结果更具实用性。

为解决上述耦合问题, 本文提出基于广义运行短路比进行小干扰稳定域建模, 并利用神经网络对稳定域进行拟合, 进而构建高效的代理模型。基于训练完成的代理模型, 可将小干扰稳定约束嵌入储能优化规划模型中, 从而构建多类型储能系统选址定容优化问题的数学模型。该模型能够兼顾储能对新能源消纳与系统小干扰稳定的支撑。

## 2 面向跟/构网型储能联合规划的小干扰稳定域构建

为表征异构电力电子设备多馈入系统在不同运行工况下的小干扰稳定指标, 本节面向储能规划, 推导含 GFL/GFM 交流电网的广义运行短路比, 并基于广义运行短路比及其临界值构建系统小干扰稳定域。

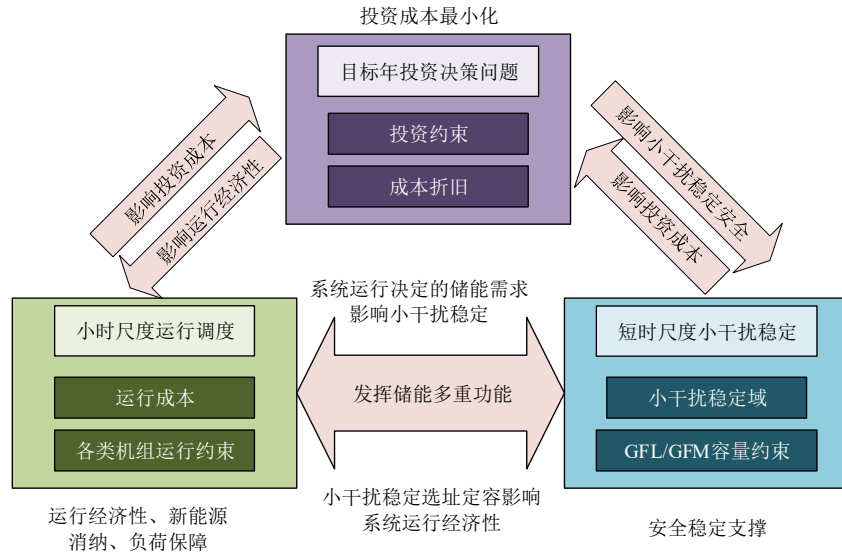


图1 本研究考虑的主要问题及其关联关系

Fig. 1 Considered major issues and their relationship of this research

2.1 考虑运行工况的多馈入跟/构网型变流器系统建模

由于节点 1 至  $n$  处已有 GFL 变流器,不失一般性,考虑  $\Omega_{\text{ess}}$  中共有  $N_{\text{ess}}$  个节点,其中不与  $n$  个原有 GFL 节点重叠的节点有  $N_{\text{ess},1}$  个。在这  $N_{\text{ess},1}$  个节点中,有  $N_{\text{ess},2}$  个节点将配置 GFL 储能。

2.1.1 变流器导纳建模

对于第  $i$  个 GFL 变流器(包含原有的  $n$  个以及新规划的  $N_{\text{ess},2}$  个 GFL 储能),其导纳模型在  $xy$  坐标系下可以表示为式(2)的形式。

$$\begin{bmatrix} \Delta I_{\text{GFL},ix} \\ \Delta I_{\text{GFL},iy} \end{bmatrix} = - \underbrace{\begin{bmatrix} Y_{L11i}(s) & Y_{L12i}(s) \\ Y_{L21i}(s) & Y_{L22i}(s) \end{bmatrix}}_{Y_{\text{GFL}}(s)} \begin{bmatrix} \Delta U_{ix} \\ \Delta U_{iy} \end{bmatrix} \quad (2)$$

式中:  $\Delta I_{\text{GFL},ix/iy}$  和  $\Delta U_{ix/iy}$  为在  $xy$  坐标系下第  $i$  个变流器的注入电流和端电压变化量。由于每个 GFL 可以采用不同的控制参数,其等效导纳矩阵  $Y_{\text{GFL}}(s)$  是各不相同的。

对于 GFM 变流器,考虑其经过升压变压器接入电网。构网型变流器在锁相环主导频段可以近似为一个含内电抗的电压源,其导纳模型如式(3)所示。式中,  $\Delta I_{\text{GFM},i} = [\Delta I_{\text{GFM},ix}, \Delta I_{\text{GFM},iy}]$ ,  $\Delta U_i = [\Delta U_{ix}, \Delta U_{iy}]$ ;  $Y_{\text{GFM}}(s)$  为构网型变流器的等效导纳矩阵;  $B_T$  为单位变流器容量下升压变压器的导纳值;  $S_{\text{GFM},i}$  为构网型变流器  $i$  的额定容量;  $s$  为拉普拉斯算子;  $\omega_0$  为同步角速度。式(4)是将时域信号转换为频域信号的转换矩阵。当 GFM 处于功率同步控制,或者内阻抗较小的虚拟同步机控制时,升压变压器的阻抗将远大于 GFM 内阻抗,此时 GFM 的导纳可近似于升压变压器导纳<sup>[15]</sup>。

$$\Delta I_{\text{GFM},i} = -S_{\text{GFM},i} \{Y_{\text{GFM},i}^{-1}(s) + [B_T F(s)]^{-1}\}^{-1} \Delta U_i \quad (3)$$

$$F(s) = \frac{\omega_0}{(s^2 + \omega_0^2)} \begin{bmatrix} s & \omega_0 \\ -\omega_0 & s \end{bmatrix} \quad (4)$$

2.1.2 交流电网导纳模型

交流电网的电压响应如式(5)所示,其中  $Y_{\text{net}}(s)$  为导纳矩阵的频域模型<sup>[21]</sup>,  $B \in \mathbf{R}^{(N_{\text{node}} - N_{\text{th}})(N_{\text{node}} - N_{\text{th}})}$ ,即完整节点导纳矩阵消去所有同步机节点后的降阶导纳矩阵。 $\Delta I$ 、 $\Delta U$  为  $xy$  坐标系下各节点注入电流和端电压的变化值。 $\otimes$  为 Kronecker 积。

$$\Delta I = Y_{\text{net}}(s) \Delta U = B \otimes F(s) \Delta U \quad (5)$$

2.1.3 系统闭环传递函数

由于构网型储能可以视为理想电压源串联一个阻抗(包含内电抗和升压变压器电抗),因此可以直接在导纳矩阵  $B$  对应行的对角元处增加这部分导纳。同时大量的中间节点与变流器控制动态无关,可以通过舒尔消去(Schur elimination)<sup>[22]</sup>,仅保留系统中包含 GFL 变流器的  $n_1 = n + N_{\text{ess},2}$  个节点。

首先通过节点重排,将包含 GFL 变流器的节点排到节点 1 至节点  $n_1$ ,其他  $n_2$  个不含 GFL 的节点顺次排列。如附录式(C1)所示,接着利用舒尔消去消除掉不含 GFL 的  $n_2$  个节点,如附录式(C2)所示。

用  $\text{diag}(Y_{\text{GFL}}(s))$  来表示以  $Y_{\text{GFL}}(s)$  为对角元素构建的块对角矩阵。则最终由 GFL/GFM,同步机以及网络构成的系统的闭环特征方程如式(6)所示。接下来将在下一节推导不同运行工况和系统强度对特征根的影响。

$$\det(Y_{\text{net,GFL}}(s) + \text{diag}(Y_{\text{GFL},i}(s))) = 0, \forall i \in [1, n_1] \quad (6)$$

2.2 基于广义运行短路比的小干扰稳定域

根据现代控制理论,式(6)的特征根存在正实

部, 则系统不稳定, 全部为负实部, 则系统小干扰稳定。直接求解式(6)对实际电力系统是相当耗时的。文献[23]提出的广义运行短路比, 通过构造加权等效系统来处理异构 GFL 的动态特性, 并利用 GFL 实际运行工况以及约简网络矩阵来估算系统的稳定程度。这为衡量配置 GFL 对系统强度的影响提供了简单的量化工具。广义运行短路比基于以下 3 个基本假设<sup>[23]</sup>: 1) 忽略电压前馈滤波器, 因为它的带宽在高频波段。2) 由于锁相环的响应速度远低于电流控制环, 电流控制环的快速动态可以忽略。3) 交流等值网络为感性占优网络。

首先通过忽略电压前馈环节的影响, GFL 的导纳模型可以表示成附录式(D1)。基于附录式(D1)的导纳模型, 定义系统的广义运行短路比  $V_{\text{gOSCR}}$  如式(7), eig 为求特征值。具体的推导过程见文献[23]。

$$V_{\text{gOSCR}} = \min \text{eig} \left\{ \text{diag} \left( \frac{U_i^2}{P_i} \right) \mathbf{B}' \right\} \quad (7)$$

广义运行短路比衡量了系统最弱子系统的稳定性, 进一步定义极限广义运行短路比来衡量全系统稳定程度。极限广义运行短路比式(8)通过计算系统主导特征根实部为 0 时的特征值, 给出系统广义运行短路比的稳定临界值, 式中  $s_c$  为纯虚数。

$$\begin{cases} \det(A(s_c) + \lambda^* \cdot \mathbf{I}_2) = 0 \\ V_{\text{CgOSCR}} = \lambda^* \end{cases} \quad (8)$$

$$\begin{cases} \mathbf{G}(s) = \sum_{i=1}^n p_{li} \hat{\mathbf{Y}}_{\text{GFL},i}(s) \\ p_{li} = \mathbf{u}_{i1} \mathbf{v}_{i1} \\ A(s) = \mathbf{G}(s) \mathbf{F}^{-1}(s) \end{cases} \quad (9)$$

式中:  $\mathbf{u}_{i1}$  和  $\mathbf{v}_{i1}$  为矩阵最小特征值的左右特征向量;  $A(s)$ 、 $\mathbf{G}(s)$  为中间变量, 在式(9)中定义;  $\mathbf{I}_2$  为 2 阶单位矩阵;  $\lambda^*$  为使得行列式为 0 的特征根取值;  $V_{\text{CgOSCR}}$  为极限广义运行短路比;  $V_{\text{gOSCR}}$  为广义运行短路比。

由分析以上分析可知, 当  $V_{\text{gOSCR}} > V_{\text{CgOSCR}}$  时系统小干扰稳定。为了构建面向规划的小干扰稳定域, 首先要分析不等式左右两端各和哪些决策变量有关, 并建立这些决策变量与广义运行短路比的映射关系。由式(2)–(9)的推导可知, 系统  $V_{\text{gOSCR}}$  主要和变流器电压、输出功率以及系统结构有关。 $V_{\text{CgOSCR}}$  则与每个子系统的权重以及各子系统的控制方式有关, 而权重的计算则与  $V_{\text{gOSCR}}$  的决定因素相关。具体映射关系可以表示如式(10)(11)所示。则系统小干扰稳定域可以表示为式(12),  $\theta$  表示为系统安全运行预留的裕度。

$$V_{\text{gOSCR}} = \psi_1(\mathbf{S}_{\text{gfl}}, \mathbf{S}_{\text{gfm}}, \mathbf{U}_{\text{gfl}}, \mathbf{P}_{\text{gfl}}, \mathbf{B}') \quad (10)$$

$$V_{\text{CgOSCR}} = \psi_2(\mathbf{S}_{\text{gfl}}, \mathbf{S}_{\text{gfm}}, \mathbf{U}_{\text{gfl}}, \mathbf{P}_{\text{gfl}}, \mathbf{B}', \hat{\mathbf{Y}}_{\text{GFL}}) \quad (11)$$

$$\Omega_{\text{SS}} := \{V_{\text{gOSCR}} > V_{\text{CgOSCR}} + \theta\} \quad (12)$$

式中:  $\mathbf{S}_{\text{gfl}}$ 、 $\mathbf{S}_{\text{gfm}}$ 、 $\mathbf{U}_{\text{gfl}}$ 、 $\mathbf{P}_{\text{gfl}}$  分别为 GFL/GFM 的额定容量以及 GFL 的端电压和输出功率向量。

映射式(10)(11)为高度非线性映射, 以往研究中通常使用启发式<sup>[17]</sup>或特征值优化<sup>[20,24]</sup>求解, 难以嵌入电力系统优化问题中。

### 3 兼顾新能源消纳和提升小干扰稳定的多类型储能联合规划模型

本节首先介绍考虑多种不同持续充/放电时长储能联合运行的电力系统年度运行仿真模型, 然后通过引入虚拟支路解决在原有 GFL 节点上规划不同控制参数的 GFL 储能时出现的 gOSCR 难以计算的问题, 进而提出小干扰稳定约束。最后, 提出兼顾新能源消纳和小干扰稳定提升的多类型储能联合规划模型。

#### 3.1 电力系统年度运行模拟

电力系统年度运行模型主要考虑火电机组运行、可再生能源机组运行、系统备用、系统功率平衡、网络潮流以及多平衡周期储能联合运行。模型基于随机规划考虑新能源和负荷的不确定性, 以下是具体约束条件:

$$\begin{cases} \bar{p}_{d,t,\omega}^k - \bar{p}_{d,t-1,\omega}^k = s_{d,t,\omega}^k - u_{d,t,\omega}^k, \\ s_{d,t,\omega}^k, u_{d,t,\omega}^k, \bar{p}_{d,t,\omega}^k \in \{0,1\} \\ \underline{\mu}^k \bar{p}_{d,t,\omega}^k \leq P_{d,t,\omega}^{\text{th},k} \leq \bar{\mu}^k \bar{p}_{d,t,\omega}^k \end{cases} \quad (13)$$

$$\begin{cases} P_{d,t,\omega}^{\text{th},k} - P_{d,t-1,\omega}^{\text{th},k} \leq v_{\text{RUK}} \bar{p}_{d,t,\omega}^k \\ P_{d,t-1,\omega}^{\text{th},k} - P_{d,t,\omega}^{\text{th},k} \leq v_{\text{RDk}} \bar{p}_{d,t,\omega}^k \end{cases} \quad (14)$$

$$\begin{cases} \bar{p}_{d,t,\omega}^k \geq \sum_{o=1}^{T_{\text{on},k}} s_{d,t-o,\omega}^k \\ \bar{p}_{d,t,\omega}^k \leq 1 - \sum_{o=1}^{T_{\text{off},k}} u_{d,t-o,\omega}^k \end{cases} \quad (15)$$

$$E_{d,t+1,k,\omega}^{\text{intra},z} = E_{d,t,k,\omega}^{\text{intra},z} (1 - \eta_{\text{self}}^z) + (p_{d,t,k,\omega}^{\text{cha},z} \eta_{\text{ch}}^z - p_{d,t,k,\omega}^{\text{dis},z} / \eta_{\text{dis}}^z) \Delta t \quad (16)$$

$$0 \leq p_{d,t,k,\omega}^{\text{cha},z}, p_{d,t,k,\omega}^{\text{dis},z} \leq S_{\text{ess},k}^z \quad (17)$$

$$0 \leq E_{d,t,k,\omega}^{\text{inter},z} + E_{d,t,k,\omega}^{\text{intra},z} \leq E_{\text{ess},k}^z \quad (18)$$

$$E_{d,1,k,\omega}^{\text{intra},z} = S_{\text{SOC0}} E_{\text{ess},k}^z \quad (19)$$

$$E_{d,t+1,k,\omega}^{\text{inter},z} = E_{d,t,k,\omega}^{\text{inter},z} (1 - \eta_{\text{self}}^z)^{|T|} + E_{d,t,k,\omega}^{\text{intra},z} - S_{\text{SOC0}} E_{\text{ess},k}^z \quad (20)$$

$$\begin{cases} E_{d,k,\omega}^{\text{inter},z} = E_{d+1,k,\omega}^{\text{inter},z}, z \in \Omega_d \\ E_{d=M_{\text{start}}(m),k,\omega}^{\text{inter},z} = E_{d=M_{\text{end}}(m),k,\omega}^{\text{inter},z}, z \in \Omega_m \\ E_{1,k,\omega}^{\text{inter},z} = E_{365,k,\omega}^{\text{inter},z}, z \in \Omega_y \end{cases} \quad (21)$$

$$\begin{cases} 0 \leq P_{w,k,d,t,\omega} \leq P_{w,k,d,t,\omega}^* \\ 0 \leq P_{PV,k,d,t,\omega} \leq P_{PV,k,d,t,\omega}^* \end{cases} \quad (22)$$

$$\sum_{k=1}^{N_{th}} [\bar{\mu}^k \bar{p}_{d,t,\omega}^k - P_{d,t,\omega}^{th,k}] + P_{curt,d,t,\omega}^W + P_{curt,d,t,\omega}^{PV} \geq \beta_{up} P_{load,d,t,\omega} + \alpha_{up} (P_{w,d,t,\omega}^* + P_{PV,d,t,\omega}^*) \quad (23)$$

$$\sum_{k=1}^{N_{th}} [P_{d,t,\omega}^{th,k} - \underline{\mu}^k \bar{p}_{d,t,\omega}^k] \geq \beta_{dn} P_{load,d,t,\omega} + \alpha_{dn} (P_{w,d,t,\omega}^* + P_{PV,d,t,\omega}^*) \quad (24)$$

$$P_{d,t,\omega}^{th,k} + P_{w,k,d,t,\omega} + P_{PV,k,d,t,\omega} + \sum_{z=1}^Z (p_{d,t,k,\omega}^{dis,z} - p_{d,t,k,\omega}^{cha,z}) + \sum_{l \in \Omega_{line,k}} P_{l,d,t,\omega} = P_{load,d,t,k,\omega} - P_{shed,d,t,k,\omega} \quad (25)$$

$$P_{l,d,t,\omega} = (\delta_{k1,d,t,\omega} - \delta_{k2,d,t,\omega}) / X_{k1,k2} \quad (26)$$

$$P_{l,d}^{\min} \leq P_{l,d,t,\omega} \leq P_{l,d}^{\max}, \delta_{k,d}^{\min} \leq \delta_{k,d,t,\omega} \leq \delta_{k,d}^{\max} \quad (27)$$

$$\delta_{0,d,t,\omega} = 0 \quad (28)$$

式中：上标或下标  $k$  表示节点编号； $m$  表示月； $d$  表示天； $t$  表示最小时间间隔； $T$  表示 1 天中的时间间隔数； $z$  表示储能种类； $\omega$  表示给定风、光、负荷场景下对应的变量，若无特殊情况，不再解释这些上下标含义； $s_{d,t,\omega}^k$ 、 $u_{d,t,\omega}^k$ 、 $\bar{p}_{d,t,\omega}^k$  分别为表征火电机组启动、关停和在线状态的 0-1 变量； $P_{d,t,\omega}^{th,k}$  代表节点  $k$  处火电机组的实际出力； $\underline{\mu}^k$  和  $\bar{\mu}^k$  表示位于节点  $k$  的机组的最大、最小发电功率； $v_{RUk}$  和  $v_{RDk}$  是最大的上/下坡速率； $T_{on,k}$  和  $T_{off,k}$  是机组的最小启停持续时间； $\eta_{self}^z$ 、 $\eta_{ch}^z$ 、 $\eta_{dis}^z$  分别是储能的自放电、充电和放电效率； $S_{ess,k}^z$  和  $E_{ess,k}^z$  分别为储能的功率容量和能量容量； $p_{d,t,k,\omega}^{cha,z}$ 、 $p_{d,t,k,\omega}^{dis,z}$  是储能的充放电功率； $E_{d,t,k,\omega}^{intra,z}$  和  $E_{d,t,k,\omega}^{inter,z}$  分别为储能的日内能量和日间能量； $\Omega_m$ 、 $\Omega_y$ 、 $\Omega_d$  分别为月平衡、年平衡、日平衡储能的集合； $M_{start}(m)$  和  $M_{end}(m)$  分别为第  $m$  个月的第一天和最后一天； $S_{SOC0}$  为储能起始荷电状态； $P_{w,k,d,t,\omega}$  和  $P_{PV,k,d,t,\omega}$  分别为风电和光伏机组的实际出力，带\*上标的符号代表风光出力的潜力； $\beta_{up}$ 、 $\alpha_{up}$ 、 $\beta_{dn}$ 、 $\alpha_{dn}$  为与负荷以及可再生能源相关的上下调峰备用系数； $P_{load,k,d,t,\omega}$  和  $P_{shed,k,d,t,\omega}$  分别为负荷功率和弃负荷功率； $\Omega_{line,k}$  代表与节点  $k$  相连的所有线路的集合； $P_{l,d,t,\omega}$  为线路  $l$  的功率； $\delta_{k,d,t,\omega}$  为节点  $k$  的功角；带 min 和 max 上标的为对应变量的最小/最大值； $X_{k1,k2}$  为  $k1$  和  $k2$  节点之间联络线的电抗； $\delta_{0,d,t,\omega}$  为平衡节点的功角。

式(13)–(15)为火电机组组合，式(13)规定了机组在线状态和机组启停变量之间的关系，式(14)规

定了火电最大上下爬坡功率，式(15)限制机组最小启停时间。式(16)–(21)为多平衡周期储能联合运行模型。储能的能量被分为日内能量和日间能量，日内能量每天平衡一次，日间能量则根据储能类型按照其平衡周期进行平衡。式(16)描述了储能充放电功率与日内能量的关系，式(17)(18)限制了储能的功率上下限和能量上下限。式(19)描述了储能日内能量的日平衡特性。式(20)表征了日内能量和日间能量之间的关系，式(21)规定了每类储能日间能量的平衡周期。式(22)为可再生能源发电约束，式(23)–(24)为系统上下调峰备用约束。式(25)为系统节点功率平衡约束。式(26)–(28)为直流潮流约束。

### 3.2 小干扰稳定约束

在广义运行短路比的计算中，需要通过舒尔约简将系统导纳矩阵约简到只剩 GFL 变流器，并分析每个 GFL 的阻抗模型和电力网络强度之间关系。因此，在原有 GFL 的节点(通常是原有风电光伏并网变流器)增加运行工况和控制参数不同的 GFL 储能时，难以直接计算广义运行短路比。此处需要通过引入一个虚拟节点和一个阻抗极小的虚拟支路与原 GFL 节点连接，并认为新规划的 GFL 储能布置在虚拟节点上。如附录图 A2 所示，要在已有 GFL 的节点 1 处规划 GFL 储能，则增加节点 1' 以及一个电抗极小的线路。通过引入  $n$  个虚拟节点和支路，在共有  $N_{node}+n$  的扩展网络上进行  $V_{gOSCR}$  的计算。

对于储能规划问题，可以认为在规划时系统结构  $\mathbf{B}'$ ，原有及待规划 GFL 的控制参数矩阵  $\hat{\mathbf{Y}}_{GFL}$  是已知变量，原有的 GFL/GFM 容量也已知。因此，对于映射  $\psi$ ，与规划运行相关的决策变量仅剩待规划 GFL/GFM 储能容量及各子系统端电压和功率。进一步，由文献[25]可知，GFL 端电压越低，输出功率越高，则构成的闭环系统的稳定性越差。为了保证所规划系统在全运行域内的稳定性，可以令  $\mathbf{U}_{gfl} = \mathbf{U}_{gfl,min}$ ， $\mathbf{P}_{gfl} = \mathbf{S}_{gfl}$ 。忽略稳定域式(10)–(12)中的确定值，仅考虑其中的决策变量，则小干扰稳定约束可以表示为式(29)–(32)。至此，系统小干扰稳定域仅与待规划 GFL/GFM 储能的容量有关。

$$V_{gOSCR} = \psi_1(\mathbf{S}_{gfl}, \mathbf{S}_{gfm}) \quad (29)$$

$$V_{CgOSCR} = \psi_2(\mathbf{S}_{gfl}, \mathbf{S}_{gfm}) \quad (30)$$

$$V_{gOSCR} > V_{CgOSCR} + \theta \quad (31)$$

$$S_{gfl,k,z} + S_{gfm,k,z} = S_{ess,k}^z \quad (32)$$

式中： $S_{gfl,k,z}$  和  $S_{gfm,k,z}$  为节点  $k$  处第  $z$  类跟网型/构网型储能的装机功率容量， $\mathbf{S}_{gfl}$ 、 $\mathbf{S}_{gfm}$  为  $S_{gfl,k,z}$  和  $S_{gfm,k,z}$  构成的向量。式(32)表示节点  $k$  处跟网型/构网型储

能的总装机容量与对应节点处规划储能系统装机容量相等。设置此约束是为提高系统运行经济性而规划各类储能的同时, 考虑小干扰稳定约束式(31)进行 GFL/GFM 变流器配比优化。

### 3.3 多类型跟/构网型储能联合规划

在 3.1 节和 3.2 节的基础上, 站在社会效益最优的角度, 以最小化总成本为目标进行多类型跟/构网型储能联合规划。在规划决策层考虑各类型储能的成本、运维成本以及系统年度运行成本。投资成本又细分为适配不同平衡周期储能的 GFL/GFM 变流器单位投资成本  $C_{\text{gfl,inv}}^{\text{P},z}$  和  $C_{\text{gfm,inv}}^{\text{P},z}$ , 单位能量容量成本  $C_{\text{ess,inv}}^{\text{E},z}$ , 站点建设成本  $C_{k,\text{sta}}$ 。单位运维成本为带下标 om 的对应变量。同时, 考虑投资上下限约束, 构建的规划模型如下。

$$\min C_{\text{inv}} + C_{\text{om}} + C_{\text{op}} \quad (33)$$

s.t.

$$\begin{cases} 0 \leq S_{\text{ess},k}^z \leq x_k S_{\text{ess,max},k}^z \\ 0 \leq E_{\text{ess},k}^z \leq x_k E_{\text{ess,max},k}^z \\ 0 \leq S_{\text{gfl},k,z} \leq x_k S_{\text{gfl,max},k}^z \\ 0 \leq S_{\text{gfm},k,z} \leq x_k S_{\text{gfm,max},k}^z \end{cases} \quad (34)$$

$$C_{\text{inv}} = \sum_{k \in \Omega_{\text{ess}}} A_{y,z} (C_{\text{gfl,inv}}^{\text{P},z} S_{\text{gfl},k,z} + C_{\text{gfm,inv}}^{\text{P},z} S_{\text{gfm},k,z} + C_{\text{ess,inv}}^{\text{E},z} E_{\text{ess},k}^z + C_{k,\text{sta}} x_k) \quad (35)$$

$$C_{\text{om}} = \sum_{k \in \Omega_{\text{ess}}} [C_{\text{ess,om}}^{\text{P},z} S_{\text{ess},k}^z + C_{\text{ess,om}}^{\text{E},z} E_{\text{ess},k}^z + C_{k,\text{sta}} x_k] \quad (36)$$

$$C_{\text{op}} = \sum_{\omega} P_{\omega} \sum_d \sum_t \sum_k [C_{d,t,\omega}^{\text{th},k} + C_{d,t,\omega}^{\text{w},k} + C_{d,t,\omega}^{\text{pv},k} + C_{d,t,\omega}^{\text{shed},k}] \quad (37)$$

$$\begin{cases} C_{d,t,\omega}^{\text{th},k} = C_{\text{gen},k} P_{d,t,\omega}^{\text{th},k} + C_{\text{start},k} S_{d,t,\omega}^k \\ C_{d,t,\omega}^{\text{w},k} = \gamma_{\text{w}} P_{\text{curt},d,t,\omega}^{\text{w},k}; C_{d,t,\omega}^{\text{pv},k} = \gamma_{\text{pv}} P_{\text{curt},d,t,\omega}^{\text{pv},k} \\ C_{d,t,\omega}^{\text{shed},k} = P_{\text{shed},d,t,k,\omega} C_{\text{shed},k} \end{cases} \quad (38)$$

$$A_y = \frac{r_d (1 + r_d)^{N_{y,z}}}{[(1 + r_d)^{N_{y,z}} - 1]} \quad (39)$$

式(13)–(32)

式中:  $x_k$  是表征是否在节点  $k$  处建设储能电站的 0-1 变量; 带下标 “max” 的变量为对应变量可规划的最大值;  $C_{\text{gen},k}$  和  $C_{\text{start},k}$  分别为火电单位发电成本和启动成本;  $\gamma_{\text{w}}$  和  $\gamma_{\text{pv}}$  为风光的单位弃电成本;  $C_{\text{shed},k}$  为单位切负荷成本;  $A_{y,z}$  为等年值系数, 其中  $r_d$  为贴现率,  $N_{y,z}$  为储能寿命;  $P_{\omega}$  为场景  $\omega$  的发生概率。

所提的联合规划模型由于包含映射式(29)(30), 是一个混合整数非线性规划, 难以求解。下一节将采用机器学习方法解决这一困难。

## 4 机器学习及其代理模型

广义运行短路比的计算首先计算舒尔约简后的网络矩阵, 然后计算约简矩阵与电力电子接口导纳矩阵的行列式特征根, 难以嵌入储能的规划模型。一种高效的方法是将这个映射过程式(29)(30)封装在一个参数化的模型中, 避免复杂的特征值和行列式计算。本节提出了一种数据驱动的方法, 无需直接计算  $V_{\text{gOSCR}}$ , 并进一步提出神经网络的代理模型, 所提代理模型是一套精确描述神经网络的混合整数线性约束, 可嵌入储能规划模型高效求解。

### 4.1 基于 ReLU 神经网络的机器学习框架

本节构建了基于 ReLU(rectified linear unit)激活函数的 2 套深度神经网络框架来分别拟合映射式(29)和式(30), 以分别计算  $V_{\text{gOSCR}}$  和  $V_{\text{CgOSCR}}$ 。ReLU 神经网络以其分段线性、连续的特性, 能够在混合整数线性规划 (mixed-integer linear programming, MILP) 框架下进行精确建模。此外, 与其他激活函数相比, ReLU 网络能够根据输入数据的分布特性自适应划分特征空间, 使得模型能够在关键数据区域提供更精细的拟合, 增强对高维非线性关系的捕捉能力<sup>[26]</sup>。这些特性使得 ReLU 神经网络成为构建数据驱动优化框架的理想选择。

本研究采用的机器学习框架如图 2 所示, 由输入层、多个隐藏层和输出层组成, 整体结构为前馈神经网络, 通过层间全连接传递信息。输入层变量为向量  $[S_{\text{gfl}}, S_{\text{gfm}}]$ , 隐藏层由多个全连接层和 ReLU 激活函数组成。最终, 输出层分别为不同储能规划方案下  $V_{\text{gOSCR}}$  和  $V_{\text{CgOSCR}}$  的计算值。

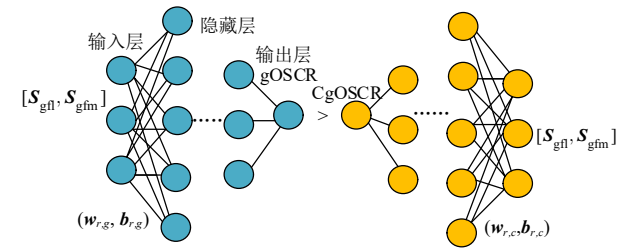


图 2 机器学习框架

Fig. 2 Machine learning framework

在数据预处理过程中, 为了提升训练稳定性并减少因不同变量取值范围不同造成的影响, 本研究采用基于均值和标准差的归一化方法。训练过程中, 采用均方误差作为损失函数, 并结合 L2 正则化约束网络权重, 以提高泛化能力, 避免过拟合。优化过程中使用基于梯度的自适应优化方法, 并采用学习率分段衰减规则以提高训练稳定性。此外, 为适应大规模数据集, 本文采用小批量随机梯度下降, 提高训练效率并降低计算成本。

## 4.2 训练数据生成和准备

在样本构造阶段,采用拉丁超立方采样方法生成不同的 GFL/GFM 配比规划方案,以确保数据在多维空间内均匀分布。为了避免边缘分布的影响,在数据集中加入一部分未规划 GFM 或未规划 GFL 的数据点。

在数据生成过程中,首先基于电网的拓扑结构构建导纳矩阵,然后根据式(7)计算对应规划方案的广义短路比,同时根据式(8)计算临界广义短路比(critical generalized operational short-circuit ratio, CgOSCR)。最终,将计算输入和输出一一对应构成神经网络的数据集合。

## 4.3 代理模型的重构和嵌入

考虑 ReLU 神经网络共有  $R$  层,将拟合式(29)和式(30)的神经网络分别用下标  $g$  和下标  $c$  表示,则每一层的参数为  $(\mathbf{w}_{r,g}, \mathbf{b}_{r,g})$ 、 $(\mathbf{w}_{r,c}, \mathbf{b}_{r,c})$ , 分别为第  $r$  层的权重矩阵和偏置向量。令  $\mathbf{X}_{r,g}$ ,  $\mathbf{X}_{r,c}$  为第  $r$  层的输入向量,神经网络输入为  $\mathbf{X}_{0,g}$  和  $\mathbf{X}_{0,c}$ 。  $\mathbf{Y}_{r,g}$ ,  $\mathbf{Y}_{r,c}$  为第  $r$  层的输出向量,  $\mathbf{Y}_{0,g}$ ,  $\mathbf{Y}_{0,c}$  为神经网络的输出向量,则输入输出的关系如式(40)所示。为简便表示,式中省略下标  $g$  和  $c$ ,式(40)对于 2 个神经网络均适用。 $\max$  为对向量中的每个元素取该元素与 0 之间的较大值。

$$\begin{cases} \mathbf{Y}_r = \mathbf{w}_r \mathbf{X}_r + \mathbf{b}_r \\ \mathbf{X}_{r+1} = \sigma(\mathbf{Y}_r) = \max(\mathbf{Y}_r, 0) \\ \mathbf{Y}_O = \mathbf{w}_R \mathbf{X}_R + \mathbf{b}_R \end{cases} \quad (40)$$

对于已经经过良好训练的神经网络参数  $(\mathbf{w}_r, \mathbf{b}_r)$ ,式(40)可以通过转化重构成一个 MILP 模型。对于  $\forall r \in [1, R-1]$ ,ReLU 神经网络可以利用大  $M$  法转换成式(41)(42)的形式。 $M$  为一个合理的较大值,  $\mathbf{X}_{2,r}$  是中间变量,代表第  $r$  层的输出。

$$\mathbf{w}_r \mathbf{X}_{r-1} + \mathbf{b}_r = \mathbf{X}_{2,r} \quad (41)$$

$$\begin{cases} \mathbf{X}_r \leq \mathbf{M} \mathbf{Z}_r \\ \mathbf{X}_{2,r} \geq -\mathbf{M}(1 - \mathbf{Z}_r) \\ \mathbf{X}_r \geq \mathbf{X}_{2,r} \\ \mathbf{X}_r \geq 0 \\ \mathbf{X}_r \leq \mathbf{X}_{2,r} + \mathbf{M}(1 - \mathbf{Z}_r) \\ \mathbf{X}_{2,r} \leq \mathbf{M} \mathbf{Z}_r, \mathbf{Z}_r \in \{0, 1\} \end{cases} \quad (42)$$

重构模型式(41)(42)的输出与训练好的神经网络输出完全一致,该方法未损失神经网络的准确度。该方法引入的 0-1 变量数量为神经网络隐藏层的总节点数,由于 2.2.2 以及 3.2 节的简化,大幅度减少了神经网络输入层的数量,因此在实际训练中无需过多的层数和节点数即可得到不错的训练效

果,引入的 0-1 变量数量是可接受的。将重构模型式(41)–(44)嵌入到联合规划模型式(33)–(39)、式(13)–(28)、(31)(32)中,替换式(29)(30)。至此,GFL/GFM 联合规划模型构建完成,所建模型是一个 MILP,可以高效求解。该模型可以实现在系统中原有各类变流器的情况下,进行多类型储能扩展规划。

在实际使用过程中,可以通过暂态仿真或特征根分析验证规划方案的小干扰稳定性是否满足需求,若不满足可增加稳定裕度  $\theta$  重新进行优化。本文所提方法仅需进行一次神经网络训练,更改规划模型的边界条件和稳定裕度  $\theta$  都无须重新训练神经网络。

$$\mathbf{X}_{0,g} = [\mathbf{S}_{gfl}, \mathbf{S}_{gfm}] \quad (43)$$

$$\mathbf{X}_{0,c} = [\mathbf{S}_{gfl}, \mathbf{S}_{gfm}]$$

$$\begin{cases} V_{gOSCR} = \mathbf{w}_{R,g} \mathbf{X}_{R,g} + \mathbf{b}_{R,g} \\ V_{CgOSCR} = \mathbf{w}_{R,c} \mathbf{X}_{R,c} + \mathbf{b}_{R,c} \end{cases} \quad (44)$$

## 5 算例分析

### 5.1 4 节点算例

为直观地说明所提基于机器学习代理模型的小干扰稳定约束的效果,首先在 4 节点系统上进行仿真,该算例不考虑新能源消纳和电力系统运行,也不考虑建设储能电站的固定成本,仅就给定的储能功率容量总量,进行 GFM、GFL 的选址定容。单位容量 GFM 的电纳为  $6.25\text{pu}^{[20]}$ 。4 节点系统的参数设置如附录图 A3 所示,线路的数值为电抗标幺值,节点 4 为同步机节点,控制参数见附录表 B1。除同步机节点外,其余节点均可配置储能,单位容量 GFM 和 GFL 的投资成本分别设置成 3 和 1,安全裕度  $\theta$  设为 1。在神经网络建模方面,本研究采用拉丁超立方抽样构建了包含 50000 个样本的训练数据集,其中设置了 5000 个无 GFM 配置的样本。网络结构均采用一个 5 层全连接神经网络,包含 3 个隐藏层,神经元数量分别为 40、20 和 10。训练过程采用小批量梯度下降法,批量大小设置为 128,以提高训练效率和稳定性。所有数值实验均在配备 Intel(R) Core(TM) i7-10700 处理器和 32GB 内存的个人电脑上完成,计算环境基于 MATLAB R2024b 和 Gurobi 10.0.0。为了展示模型的效果,设置 2 组算例:1) 3 号节点的 GFL 为 1 pu,配置 GFM。2) 配置总量为 9pu 的变流器,各节点 GFM/GFL 的配置上限均为 3pu。为保证足够的短路容量,各节点变流器总容量不得大于该节点短路容量的 50%。

算例 1、2 的优化算法求解时间分别为 0.42 和 2.89s, 神经网络的平均绝对百分比误差(mean absolute percentage error, MAPE)分别为 2.3%和 0.21%。规划结果如表 1 所示。从选址的角度看, 在算例 1 中, 需要在系统强度最弱的节点 3 上配置一定量的 GFM 以提高小干扰稳定性。算例 2 则体现出应该优先在系统强度最强的节点 1 处尽可能多地配置低成本的 GFL, 同时节点 1 系统强度高, 因此配置的 GFM 容量很小。由于受到短路容量的限制, 无法在节点 3 处配置大量储能, 因此只能在系统强度较弱的 2 节点配置大容量的 GFL 和 GFM 组合, 以保证小干扰稳定, 这一配置结果与理论推演相符。

表 1 4 节点规划结果  
Table 1 Planning result of 4-nodes system

算例编号	GFM/pu	GFL/pu
1	[0,0,0.352]	[0,0,1]
2	[0.048,1.82,0.25]	[3,3,0.87]

从配置容量上看, 2 个算例在规划配置下的主导特征根及临界广义运行短路比下的特征根如表 2 所示, 相对于临界状态, GFM 的参与使得系统阻尼比有了大幅提升, 优化了系统的动态响应。在算例 1 中神经网络预测的  $gOSCR$  和  $C_gOSCR$  分别为 3.34 和 2.3425, 真实值为 3.35 和 2.3427, 预测误差分别为 0.3%和 0.009%。算例 2 中神经网络预测的  $gOSCR$  和  $C_gOSCR$  分别为 3.30 和 2.30, 真实值为 3.22 和 2.29, 预测误差分别为 2.5%和 0.43%。因为实际规划中, 必须使得主导特征根远离虚轴, 保留足够的稳定裕度, 因此该预测误差在可接受范围内。

为进一步验证规划方案的有效性, 在 Simulink 上进行暂态仿真, 设置系统在 0.5s 时, 同步机机端电压下降 10%并在 0.05s 后恢复。图 3 展示在节点 3 处配置 1 单位 GFL 时, 按规划方案配置 GFM, 按规划方案的 50%配置 GFM 和不配置 GFM 的仿真结果。附录图 A4 展示了在节点 3 处配置 1 单位 GFL, 机端电压设置为 0.9pu 和 1pu 的仿真结果。

由图 3 可以看出, 配置 GFM 之前, 系统振荡发散, 配置少量 GFM 可以改善系统阻尼特性, 而按照神经网络输出配置足额储能则可以大幅提升系统应对小干扰的稳定性, 在前 2 次摆动后系统就

表 2 4 节点系统主导特征根对比  
Table 2 Dominant eigenvalue comparison of 4-nodes system

算例编号	$C_gOSCR$ 对应特征根	规划方案对应特征根
1	$-0.5+j81.68$	$-1.96+j83.44$
2	$-0.39+j81.52$	$-1.81+j83.30$

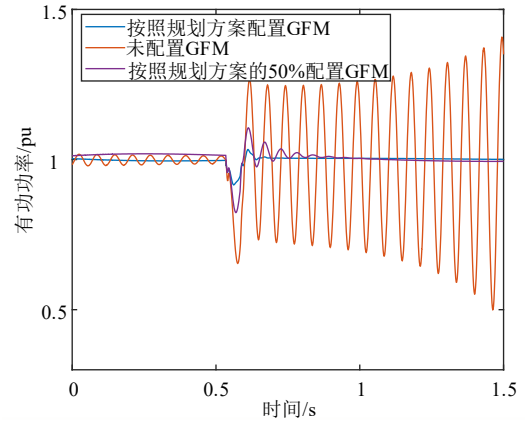


图 3 不同 GFM 容量下的动态响应

Fig. 3 Dynamic response under different GFM capacities

达到稳定状态。由图 3 及附录图 A4 可以看出, 运行工况(输出功率及机端电压)对小干扰稳定性的影响, 输出功率越大, 机端电压越小, 系统越不稳定。因此在规划中考虑运行工况是十分必要的。在本文的规划中, 为满足全运行域的小干扰稳定, 要求系统在最恶劣工况下亦能满足稳定约束。

## 5.2 IEEE-39 节点算例

为进一步验证本文兼顾新能源消纳和小干扰稳定提升的储能规划模型, 在改进的 IEEE39 节点系统上进行仿真。将原本在 31、32、34、35、39 节点处的同步机组更换成等额定容量的风力和光伏发电, 它们均通过 GFL 变流器接入交流电网。其中 31、35 为风电, 其余为光伏。所有风电、光伏节点均可配置储能, 另有中间节点 1、17、19、23、25 也被选为储能配置待选点, 其中节点 1、39 可配置年平衡储能, 节点 19、23、31 可配置月平衡储能, 其余可配置日平衡储能。 $C_{k,sta}$  统一设为 3000 万元。风电和光伏发电的数据来源于山东省 2023 年的气象记录<sup>[27]</sup>。年度负荷数据采用 HRP-38 节点系统<sup>[28]</sup>区域一的年度负荷数据。其余线路和机组信息与原系统保持一致。为了降低计算复杂度, 采用一种紧凑全景时间序列模型<sup>[5]</sup>, 提取 48 个典型日来反映系统年度能量平衡需求。为进行对比分析, 设置算例 3, 仅考虑单一典型年运行场景, 灵敏度分析中将介绍考虑不确定性的多场景算例。各类型储能的成本和充放电效率如附录表 B3 所示, 分别对应氢储能、压缩空气储能和锂电池。设定原有 GFL 和新配置储能 GFL 的控制参数如附录表 B2 所示。网络结构方面, 均采用 6 层全连接神经网络, 包含 4 个隐藏层,  $gOSCR$  隐藏层神经元数量分别为 20、40、20 和 10, 对  $C_gOSCR$  隐藏层神经元数量分别为 30、48、30、10。为 2 个神经网络各准备了 100000 组数据用于训练。

求解优化模型共耗时 1852 s, 储能的规划结果如附录表 B4 所示。图 4、附录图 A5 展示了年、月平衡储能的年度运行情况。共规划年平衡储能 1.21GW/170GW·h, 配置时长达 217h。配置的日平衡储能达 1.6GW/6.25GW·h, 配置的功率容量为 3 种储能中最大。受限于风光发电小时数, 将等量火电替换为新能源将导致全系统可控发电资源不足。具体而言, 剩余火电发电容量 3.7GW, 最大净负荷 5.5GW, 此时配置储能不仅用于平抑风光波动, 同时还作用于负荷保障。因此, 配置的储能功率容量和能量容量都较大, 年平衡储能将能量搬运至供电能力不足时间段放电, 以保证系统可靠供电。

共配置 GFL 储能变流器 1368MW, GFM 储能变流器 1919MW, 考虑到系统原有风电光伏的 GFL 变流器, GFM 的占比约为 40%。系统的主导特征根为  $-1.46+j79.23$  远离虚轴, 与未配置 GFM 储能变流器时的主导特征根  $3.5+j61.70$  相比, 规划方案保证了系统的小干扰稳定性。gOCSR 和 CgOCSR 代理模型输出及真实值对比见表 3, 由表中可以看出代理模型能够比较准确地预测规划方案的小干扰稳定情况。从图 4 和附录图 A5 中可以看出, 储能系统在夏季高发时充电, 储存的电能在秋冬季分多次放出, 实现了系统跨季节能量平衡, 提高了系统的新能源消纳能力及负荷保障能力。

表 3 代理模型输出与真实值对比(预测值/真实值)  
Table 3 Surrogate model v.s. true value comparison

算例编号	CgOCSR	gOCSR
3	2.06/2.08	3.06/3.07
4	2.10/2.13	3.10/3.03
5	2.1622/2.1629	2.66/2.6659

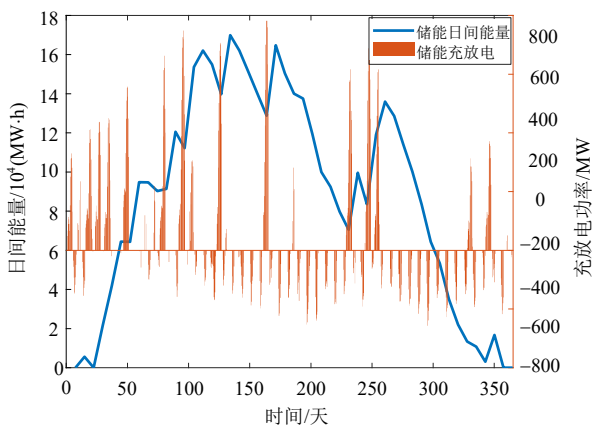


图 4 年平衡储能年度运行情况

Fig. 4 Annual operation of yearly balanced ESSs

为进一步说明兼顾考虑系统运行和小干扰稳定支撑进行储能规划的优势, 进行 2 组灵敏度分析, 算例 4 在算例 3 的基础上将线路 14 的额定容量降低 50%, 线路 12、13 容量降低 20%, 重新进行规

划。线路 12、13、14 为节点 31 的送出通道。算例 5 在算例 3 的基础上, 将稳定裕度  $\theta$  从 1 调整为 0.5, 其他设置保持不变。

规划方案如附录表 B5、B6 所示。从附录表 B5 中可以看出, 由于储能、新能源送出通道阻塞, 算法会合理分配储能的容量, 节点 31 处的储能从 391MW 变成了 814MW。为了应对线路阻塞, 在节点 31 处配备了更多的储能功率用于调整系统潮流, 消纳无法外送的新能源, 储能的总能量容量变化不明显。这体现了所提方法在保证小干扰稳定的同时, 能够考虑系统运行经济性等多重约束和目标。

从附录表 B6 中可以看出, 在降低稳定裕度后, 相比稳定裕度为 1 时的 GFM 变流器容量占比 40%, 稳定裕度为 0.5 时 GFM 变流器容量占比明显降低至 23%。主导特征根也从  $-1.46+j79.23$  变为  $-0.92+j78.64$ 。降低稳定裕度将影响系统动态表现, 实际应用中可以分析系统主导特征根, 根据需要的阻尼特性调整稳定裕度进行规划。

进一步, 为说明兼顾考虑新能源消纳和小干扰稳定的必要性, 以及说明规划算法在系统发电容量充足情况下的表现, 设置算例 6。在算例 3 基础上将系统负荷减低 40%, 此时, 系统最大净负荷为 3.6GW, 小于火电发电容量。系统新能源发电能量占负荷的比例为 34.7%。在算例 6 的基础上, 不考虑小干扰稳定约束进行规划, 构建算例 7。算例 6 的优化结果见附录表 B7, 算例 7 的规划结果见附录表 B8。

在算例 6 中, 配置储能与不配置储能对比, 年减少弃风弃光 833GW·h, 体现了储能提升新能源消纳的作用。对比算例 7 和算例 6, 算例 6 总计配置储能 1.4GW/4.68GW·h, 算例 7 总计配置储能 0.93GW/4.74GW·h。可以看出, 考虑小干扰稳定约束主要影响系统的功率容量, 需要在特定节点配置构网型储能, 对能量容量的影响不大。在新能源占比较高的场景下, 算例 7 优先配置了月、年平衡储能。相对于算例 7, 算例 6 配置了较多日平衡储能, 这是由于日平衡储能的构网型变流器成本较低, 同时所处位置更适合进行小干扰稳定支撑, 体现了模型能够兼顾储能多重功能进行选址定容。如果算例 7 中配置的储能全部为 GFL 储能, 则系统的广义运行短路比仅为 0.23, 系统不稳定。由此可以看出, 仅考虑储能单一功能或仅考虑单一优化目标可能导致规划结果不可行。

最后, 考虑典型年负荷和新能源的不确定性, 构造两阶段随机规划算例。考虑 3 个典型年场景,

其中场景 1 与算例 6 保持一致, 另外 2 个场景的新能源能量占比分别为 35.5% 和 33%。各场景发生的概率分别为 0.3、0.5、0.2。将该算例命名为算例 8。算例结果见附录表 B9。可以看出, 由于更高新能源比例场景的加入, 同时该场景还具有较大的发生概率, 因此算例 8 配置了比算例 6 更多的储能能量容量用于新能源消纳, 而储能的功率容量以及储能的选址则变化不大(算例 8 规划储能 1.4GW/4.94GW·h, 对比算例 6 规划储能 1.4GW/4.68GW·h)。这是因为在新能源装机一定的前提下, 虽然负荷和新能源发电具有不确定性, 但其削峰填谷需求大致在某一确定区间。在这种前提下, 储能功率容量以及储能选址主要由小干扰稳定约束决定。

需要说明的是, 本文所提方法新增的整数变量个数为神经网络隐藏层节点总数, 新增约束数量为神经网络隐藏层节点总数的 7 倍。隐藏层节点个数设置与神经网络输入层维度高度相关, 得益于本文的建模方式, 输出维度为储能待选点数量的 2 倍。由此可得, 随着系统规模的提升, 模型规划将以低于线性增长的速度提升。

## 6 结论

本文提出了一种兼顾新能源消纳和小干扰稳定支撑的 GFL/GFM 联合规划方法。该方法基于广义运行短路比, 构建了考虑运行工况的小干扰稳定域约束。基于机器学习及其代理模型将稳定域转换成混合整数线性约束, 并将代理模型约束嵌入到储能优化规划模型中, 解决了已有研究中无法进行 GFL/GFM 联合规划, 也无法兼顾其他电力系统运行目标的问题。对 4 节点系统和 IEEE39 节点系统中进行仿真验证, 结果表明:

1) 所提方法在可接受的误差范围内准确预测了广义运行短路比及其临界广义运行短路比。

2) 所提方法能够在满足小干扰稳定的前提下兼顾经济运行和新能源消纳目标, 实现 GFL/GFM 的联合优化规划。

下一步拟研究考虑电力网络扩展与 GFL/GFM 储能的联合规划问题, 以及考虑电网元件接入/退出影响的 GFL/GFM 储能规划。

附录见本刊网络版(<http://www.dwjs.com.cn/CN/1000-3673/current.shtml>)。

## 参考文献

[1] LI Yitong, GU Yunjie, GREEN T C. Revisiting grid-forming and grid-following inverters: a duality theory[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2022, 37(6): 4541-4554.

[2] FENG Jianzhou, HU Zechun, DUAN Xiaoyu, et al. A multi stage DRO-SDDP approach for planning multi-type energy storage systems and flexible resources in high-penetration renewable power systems[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2025, 61(4): 5853-5867.

[3] PADHEE M, PAL A, MISHRA C, et al. A fixed-flexible BESS allocation scheme for transmission networks considering uncertainties[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2020, 11(3): 1883-1897.

[4] PAN Guangsheng, GU Wei, LU Yuping, et al. Optimal planning for electricity-hydrogen integrated energy system considering power to hydrogen and heat and seasonal storage[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2020, 11(4): 2662-2676.

[5] ZHANG Ning, JIANG Haiyang, DU Ershun, et al. An efficient power system planning model considering year-round hourly operation simulation[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2022, 37(6): 4925-4935.

[6] 胡光, 庄可好, 高晖胜, 等. 低惯量交流系统并网变流器次/超同步振荡分析[J]. 电工技术学报, 2024, 39(8): 2250-2264.

HU Guang, ZHUANG Kehao, GAO Huisheng, et al. Sub/super synchronous oscillation analysis of grid-connected converter in low inertia AC system[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2024, 39(8): 2250-2264(in Chinese).

[7] YANG Dongsheng, WANG Xiongfei, LIU Fangcheng, et al. Symmetrical PLL for SISO impedance modeling and enhanced stability in weak grids[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2020, 35(2): 1473-1483.

[8] DONG Wei, XIN Huanhai, WU Di, et al. Small signal stability analysis of multi-infeed power electronic systems based on grid strength assessment[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2019, 34(2): 1393-1403.

[9] 刘威, 谢小荣, 王衡, 等. 基于频率耦合阻抗模型的并网变流器全工况小信号稳定性分析[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(22): 7212-7220.

LIU Wei, XIE Xiaorong, WANG Heng, et al. Frequency-coupled impedance model-based small-signal stability analysis of grid-tied converters under all operating conditions[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(22): 7212-7220(in Chinese).

[10] 范宸璋, 秦晓辉, 齐磊, 等. 构网型下垂控制中虚拟阻抗的作用、改进及研究前景分析[J]. 电网技术, 2024, 48(6): 2237-2250.

FAN Chenhui, QIN Xiaohui, QI Lei, et al. Analysis of the role, improvement, and research prospects of virtual impedance in grid-forming droop control[J]. Power System Technology, 2024, 48(6): 2237-2250(in Chinese).

[11] 史亚帆, 许寅, 吴翔宇, 等. 面向构网逆变器的虚拟振荡器控制技术: 统一设计框架与关键问题探讨[J]. 电网技术, 2024, 48(6): 2251-2261.

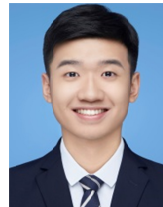
SHI Yafan, XU Yin, WU Xiangyu, et al. Virtual oscillator control for grid forming inverters: unified design framework and discussion for key issues[J]. Power System Technology, 2024, 48(6): 2251-2261(in Chinese).

[12] 辛焕海, 王宇轩, 刘晨曦, 等. 提高新能源场站稳定性的构网型与跟网型变流器容量配比估算[J]. 中国电机工程学报, 2024, 44(14): 5463-5472.

XIN Huanhai, WANG Yuxuan, LIU Chenxi, et al. Estimation of capacity ratios between grid-forming and grid-following converters for improving the stability of renewable energy stations[J]. Proceedings of the CSEE, 2024, 44(14): 5463-5472(in Chinese).

[13] GUO Jian, CHEN Yandong, WANG Lei, et al. Impedance analysis and stabilization of virtual synchronous generators with different

- DC-link voltage controllers under weak grid[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2021, 36(10): 11397-11408.
- [14] 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(in Chinese).
- [15] 辛焕海, 王宇轩, 刘晨曦, 等. 提高新能源场站稳定性的构网型与跟网型变流器容量配比估算[J]. 中国电机工程学报, 2024, 44(14): 5463-5472.  
XIN Huanhai, WANG Yuxuan, LIU Chenxi, et al. Estimation of capacity ratios between grid-forming and grid-following converters for improving the stability of renewable energy stations[J]. Proceedings of the CSEE, 2024, 44(14): 5463-5472(in Chinese).
- [16] 余光正, 胡越, 刘晨曦, 等. 含跟网/构网型混联多馈入系统协调优化配置方法[J]. 中国电机工程学报, 2025, 45(2): 588-600.  
YU Guangzheng, HU Yue, LIU Chenxi, et al. Research on the coordinated optimization configuration method for hybrid multi-infeed systems with grid-following or grid-forming[J]. Proceedings of the CSEE, 2025, 45(2): 588-600(in Chinese).
- [17] 吴琛, 刘晨曦, 黄伟, 等. 提升新能源电力系统稳定性的构网型变流器选址定容方法[J]. 电力系统自动化, 2023, 47(12): 130-136.  
WU Chen, LIU Chenxi, HUANG Wei, 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(in Chinese).
- [18] 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): 1091-1102.  
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): 1091-1102(in Chinese).
- [19] 刘朋印, 刘辉, 吴林林, 等. 满足全运行域振荡约束的跟网-构网组合控制及优化配置[J]. 电力系统自动化, 2024, 48(12): 139-146.  
LIU Pengyin, LIU Hui, WU Linlin, et al. Grid-following and grid-forming combined control and optimal configuration to satisfy oscillation constraints across whole operating region[J]. Automation of Electric Power Systems, 2024, 48(12): 139-146(in Chinese).
- [20] LIU Yun, CHEN Yue, XIN Huanhai, et al. System strength constrained grid-forming energy storage planning in renewable power systems[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2025, 16(2): 981-994.
- [21] 辛焕海, 董炜, 袁小明, 等. 电力电子多馈入电力系统的广义短路比[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(22): 6013-6027.  
XIN Huanhai, DONG Wei, YUAN Xiaoming, et al. Generalized short circuit ratio for multi power electronic based devices infeed to power systems[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(22): 6013-6027(in Chinese).
- [22] 张伯明, 陈寿孙, 严正. 高等电力网络分析[M]. 2版. 北京: 清华大学出版社, 2007.
- [23] LIU Chenxi, XIN Huanhai, WU Di, et al. Generalized operational short-circuit ratio for grid strength assessment in power systems with high renewable penetration[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2024, 39(4): 5479-5494.
- [24] MENGI E. A support function based algorithm for optimization with eigenvalue constraints[J]. SIAM Journal on Optimization, 2017, 27(1): 246-268.
- [25] 刘晨曦, 辛焕海. 考虑实际工况的新能源多馈入系统广义运行短路比[J]. 电力系统自动化, 2025, 49(8): 12-20.  
LIU Chenxi, XIN Huanhai. Generalized operational short-circuit ratio of multi-infeed systems with renewable energy considering actual operation conditions[J]. Automation of Electric Power Systems, 2025, 49(8): 12-20(in Chinese).
- [26] RAGHU M, POOLE B, KLEINBERG J M, et al. On the expressive power of deep neural networks[C]//Proceedings of the 34th International Conference on Machine Learning. Sydney: PMLR, 2017: 2847-2854.
- [27] Copernicus Climate Change Service. ERA5 hourly data on single levels from 1940 to present[DS]. ECMWF, 2018.
- [28] ZHUO Zhenyu, ZHANG Ning, YANG Jingwei, et al. Transmission expansion planning test system for AC/DC hybrid grid with high variable renewable energy penetration[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2020, 35(4): 2597-2608.



冯建洲

在线出版日期: 2025-05-30.

收稿日期: 2025-05-15.

作者简介:

冯建洲(1997), 男, 博士研究生, 研究方向为电动汽车、储能系统优化与运行, E-mail: fjz20@mails.tsinghua.edu.cn;

胡泽春(1979), 男, 长聘教授, 通信作者, 智能电网、电动汽车、电力系统优化与运行等, E-mail: zechhu@tsinghua.edu.cn.

(责任编辑 马晓华)

附录 A

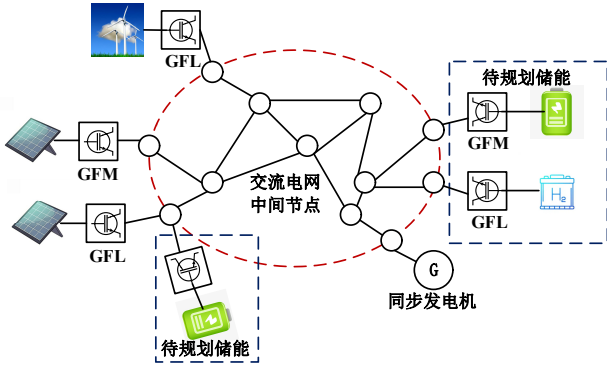


图 A1 多类型电力电子变流器馈入交流电网

Fig. A1 AC power grid with multi-type power electronic converters

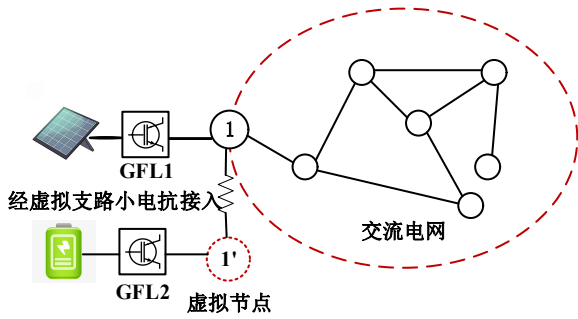


图 A2 通过引入虚拟节点和支路构建扩展网络示意图  
Fig. A2 The extended network diagram constructed by introducing virtual nodes and branches

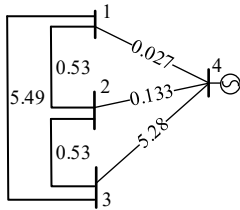


图 A3 4 节点系统示意图  
Fig. A3 Diagram of 4-nodes system

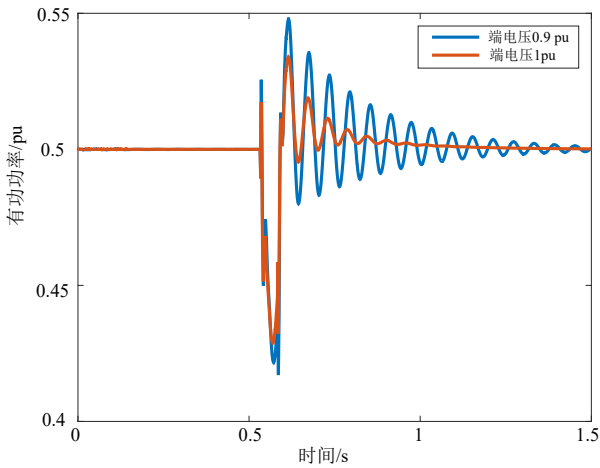


图 A4 不同机端电压下动态响应

Fig. A4 Dynamic response at different terminal voltages

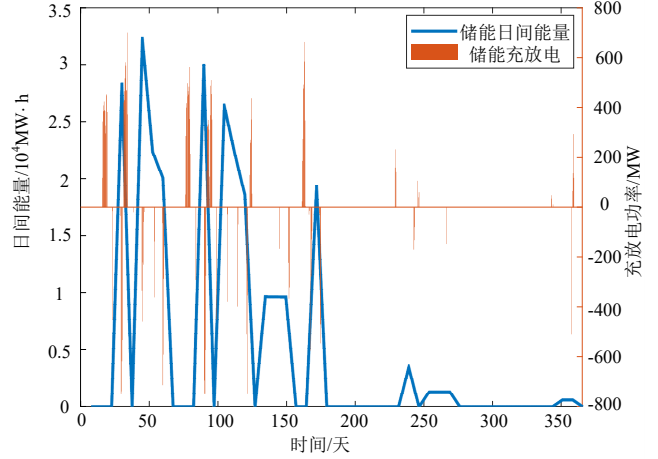


图 A5 月平衡储能年度运行情况

Fig. A5 Annual operation of monthly balanced ESSs

附录 B

表 B1 4 节点系统 GFL 储能的控制参数

Table B1 Control parameters of GFL ESSs in 4-node system

节点	$G_{APC,i}(s)$	$H_{C,i}(s)$	$H_{pll,i}(s)$	$L_f^i/pu$
1	$1+10/s$	$0.2+2.5/s$	$(12+8000/s)/s$	0.05
2	$1+6/s$	$0.2+2.5/s$	$(10+7200/s)/s$	0.05
3	$1+8/s$	$0.2+2.5/s$	$(10+7200/s)/s$	0.05

表 B2 IEEE39 节点系统 GFL 储能的控制参数

Table B2 Control parameters of GFL ESSs in IEEE39 system

节点	$G_{APC,i}(s)$	$H_{C,i}(s)$	$H_{pll,i}(s)$	$L_f^i/pu$
储能	$1+8/s$	$0.2+2.5/s$	$(12+8000/s)/s$	0.05
新能源	$1+10/s$	$0.2+2.5/s$	$(10+7200/s)/s$	0.05

表 B3 各类型储能参数<sup>[B1-B2]</sup>

Table B3 Main parameters of ESSs<sup>[B1-B2]</sup>

类型	GFL/GFM		能量容量单位		充放电效率	自放电效率
	功率容量单位	投资成本/(元/kW)	投资成本/(元/kW·h)	能量容量/(GW·h)		
日平衡储能	1000/1200	800	0.95/0.95	0.0042		
月平衡储能	2000/2400	150	0.85/0.85	0.001		
年平衡储能	2500/3000	100	0.8/0.6	0.0001		

表 B4 IEEE39 节点系统储能规划结果(算例 3)

Table B4 ESSs planning results of IEEE39 system(Case 3)

类型	节点	GFL/MW	GFM/MW	能量容量/(GW·h)
日平衡	[17,25,32, 34,35]	[143,88,237, 220,55]	[0,0,693, 98,57]	[0.78,0.5, 3.89,0.83,0.24]
	[19,23,31]	[0,93,88]	[0,0,303]	[0,5.3,26.7]
年平衡	[1,39]	[390,53]	[304,465]	[167,3]

表 B5 算例 4 储能规划结果

Table B5 ESSs planning results of Case 4

类型	节点	GFL/MW	GFM/MW	能量容量/(GW·h)
日平衡	[17,25,32, 34,35]	[368,88, 145,67,0]	[0,0,370, 48,0]	[1.41,0.42, 3.14,0.61,0]
	[19,23,31]	[0,0,378]	[0,49,436]	[0,0.22,30]
年平衡	[1,39]	[0,0]	[680,590]	[181,3]

表 B6 算例 5 储能规划结果

Table B6 ESSs planning results of Case 5

类型	节点	GFL/MW	GFM/MW	能量容量/(GW·h)
----	----	--------	--------	-------------

日平衡	[17,25,32, 34,35]	[286,81,320, 165,47]	[0,0,385, 0,0]	[0.92,0.44, 3.9,0.67,0.15]
月平衡	[19,23,31]	[0,30,72]	[0,0,419]	[0,0,22,30]
年平衡	[1,39]	[220,0]	[468,135]	[168,3]

表 B7 算例 6 储能规划结果  
Table B7 ESSs planning results of Case 6

类型	节点	GFL/MW	GFM/MW	能量容量/(GW·h)
日平衡	[17,25,32, 34,35]	[0,0,0, 0,0]	[0,0,286, 0,61]	[0,0,0,443, 0,0,1]
月平衡	[19,23,31]	[206,0,0]	[0,0,392]	[1.05,0,1.74]
年平衡	[1,39]	[0,0]	[0,418]	[0,1.35]

表 B8 算例 7 储能规划结果  
Table B8 ESSs planning results of Case 5

节点	能量容量/MW	能量容量/(GW·h)
[39, 31]	[771,158]	[3.97,0.77]

表 B9 算例 8 储能规划结果  
Table B9 ESSs planning results of Case 7

类型	节点	GFL/MW	GFM/MW	能量容量/(GW·h)
日平衡	[17,25,32,34,35]	[0,0,0,0,0]	[0,0,266,0,64]	[0,0,0,4,0,0,1]
月平衡	[19,23,31]	[210,0,0]	[0,0,390]	[1.18,0,1.71]
年平衡	[1,39]	[0,0]	[0,420]	[0,1.55]

## 参考文献

- [B1] 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, 2022, 43(1): 158-168.
- [B2] 房珂, 周明, 武昭原, 等. 面向低碳电力系统的长期储能优化规划与成本效益分析[J]. 中国电机工程学报, 2023, 43(21): 8282-8295.

## 附录 C

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} \Delta \mathbf{I}_{\text{GFL},I} + \Delta \mathbf{I}_{\text{GFM},I} \\ \Delta \mathbf{I}_{\text{GFM},J} \end{bmatrix} &= -\mathbf{Y}'_{\text{net}}(s) \begin{bmatrix} \Delta U_I \\ \Delta U_J \end{bmatrix} = \\ \mathbf{B}' \otimes \mathbf{F}(s) \begin{bmatrix} \Delta U_I \\ \Delta U_J \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} \mathbf{B}'_{11} & \mathbf{B}'_{12} \\ \mathbf{B}'_{21} & \mathbf{B}'_{22} \end{bmatrix} \otimes \mathbf{F}(s) \begin{bmatrix} \Delta U_I \\ \Delta U_J \end{bmatrix} \\ \mathbf{Y}'_{\text{net}}(s) &= \begin{bmatrix} \mathbf{B}_{11} + \mathbf{S}_{\text{GFM},I} \mathbf{B}_{\text{GFM},I} & \mathbf{B}_{12} \\ \mathbf{B}_{21} & \mathbf{B}_{22} + \mathbf{S}_{\text{GFM},J} \mathbf{B}_{\text{GFM},J} \end{bmatrix} \otimes \mathbf{F}(s) \end{aligned} \quad (\text{C1})$$

$$\mathbf{Y}_{\text{net,GFL}}(s) = [\mathbf{B}'_{11} - \mathbf{B}'_{12}(\mathbf{B}'_{22})^{-1}\mathbf{B}'_{21}] \otimes \mathbf{F}(s) \quad (\text{C2})$$

式中下标中带大写  $I$  的表示前  $n_1$  个节点对应变量构成的矩阵, 下标  $J$  表示后  $n_2$  个节点对应的变量矩阵。

## 附录 D

$$\hat{\mathbf{Y}}_{\text{GFL},i}(s) = \begin{bmatrix} \hat{\mathbf{Y}}_{11,i}(s) & 0 \\ 0 & \hat{\mathbf{Y}}_{22,i}(s) \end{bmatrix}$$

$$\begin{cases} \hat{\mathbf{Y}}_{11,i}(s) \approx \frac{U_i H_{C,i}(s) G_{\text{APC},i}(s)}{[sL_f + H_{C,i}(s)] + U_i H_{C,i}(s) G_{\text{APC},i}(s)} \\ \hat{\mathbf{Y}}_{22,i}(s) \approx -\frac{U_i H_{\text{pll},i}(s) H_{C,i}(s)}{[1 + U_i H_{\text{pll},i}(s)][sL_f + H_{C,i}(s)]} \end{cases} \quad (\text{D1})$$

式中:  $H_{C,i}(s)$  是电流内环传递函数;  $G_{\text{APC},i}(s)$  是功率环传递函数;  $H_{\text{pll},i}(s)$  是锁相环传递函数;  $L_f$  是滤波电感;  $U_i$ 、 $P_i$  分别为第  $i$  台 GFL 储能的端口电压和输出功率。