

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.251169

内嵌输入凸神经网络小干扰稳定性约束的新能源 孤岛微电网优化运行方法

娄轩铭¹, 王宇¹, 邹云阳², 谢开贵¹

(1. 输变电装备技术全国重点实验室(重庆大学), 重庆 400044; 2. 南洋理工大学电气与电子工程学院, 新加坡 639798)

摘要: 100%可再生能源场景下的孤岛微电网缺乏传统电源的支撑, 其频率和电压波动更为剧烈, 小干扰稳定性也面临挑战。针对逆变器主导的新能源孤岛微电网, 提出一种内嵌输入凸神经网络(input convex neural network, ICNN)小干扰稳定性约束的新能源孤岛微电网优化调度方法。首先, 建立考虑逆变器有功-频率、无功-电压双下垂控制的优化调度模型, 利用信息间隙决策理论(information-gap decision theory, IGDT)处理源荷的不确定性。然后, 以阻尼比灵敏度为运行点更新方向并移动采样点, 迅速采样到稳定边界区域附近, 得到双下垂控制参数同时变化的大量稳定边界样本。接着利用 ICNN 学习下垂控制参数映射的小干扰稳定性指标, 并对非线性稳定条件进行线性化处理, 将其内嵌于调度模型。最后, 基于 IEEE33 节点系统形成的孤岛微电网验证了所提方法的可行性和准确性。

关键词: 孤岛微电网; 输入凸神经网络; 信息间隙决策理论; 分布式能源; 小干扰稳定性

Optimal operation method for renewable energy islanded microgrids with embedded input convex neural network-based small-signal stability constraints

LOU Xuanming¹, WANG Yu¹, ZOU Yunyang², XIE Kaigui¹

(1. State Key Laboratory of Power Transmission Equipment Technology (Chongqing University), Chongqing 400044, China; 2. School of Electrical and Electronic Engineering (Nanyang Technological University), Singapore 639798, Singapore)

Abstract: In a 100% renewable energy scenario, islanded microgrids lack the support of conventional generation, leading to more severe frequency and voltage fluctuations, while small-signal stability also becomes a critical challenge. To address this issue in inverter-dominated renewable islanded microgrids, an optimal operation method incorporating small-signal stability constraints based on an input convex neural network (ICNN) is proposed. First, an optimal scheduling model is established considering both inverter P - f and Q - V droop control. Information-gap decision theory (IGDT) is employed to handle uncertainties in generation and load. Then, using damping ratio sensitivity as the direction for operating point updates, sampling points are iteratively shifted to efficiently approach the stability boundary region, thereby obtaining a large number of stability boundary samples under simultaneous variations of droop control parameters. Next, the ICNN is used to learn the mapping between droop control parameters and small-signal stability indices. The nonlinear stability constraints are subsequently linearized and embedded into the scheduling model. Finally, case studies on the IEEE 33-bus islanded microgrid test system demonstrate the feasibility and accuracy of the proposed method.

This work is supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 52577084).

Key words: islanded microgrid; input convex neural network; information gap decision theory; distributed energy resource; small-signal stability

0 引言

近年来, 极端天气事件和自然灾害频发, 传统的集中式电网在偏远山区因负荷分散、地形复杂,

常出现投资强度高、收益率低、运维复杂度高的问题。一旦主网故障, 中低压线路易受阻断, 供电中断时间长、恢复难度大, 严重影响当地居民生活和关键基础设施运行。微电网(microgrid, MG)作为由分布式能源(distributed energy resource, DER)构成的小型自治电力系统^[1-5], 能够在主网故障时迅速切

基金项目: 国家自然科学基金项目资助(52577084)

换至孤岛运行模式,由内部 DER 独立承担末端保供任务,是保证偏远地区供电的重要手段。

随着“零碳排放”目标的提出,100%新能源微电网以其能源自主性和灵活性优势逐渐成为研究热点。华为沙特红海储能项目和西部沙戈荒新能源基地作为大型100%新能源孤岛微电网,初步验证了该模式的可行性。然而,大量可再生 DER 和电力电子设备接入给系统的安全稳定运行带来了许多挑战,小干扰稳定性问题变得更加复杂。

为提高孤岛微电网在负荷频繁扰动下的电压和频率调节能力,现有研究通常在 DER 逆变器中引入下垂控制策略。文献[6]考虑电热负荷,并以最小化运行成本和系统排放为目标,确定微电网中 DER 的最优下垂控制参数。文献[7]针对孤岛微电网下垂控制中参数的确定,提出使用混合整数锥规划计算有功和无功下垂参数。文献[8]考虑可再生能源不确定性引起的电压波动,提出基于下垂控制的机会约束最优潮流模型,有效降低高下垂增益下的电压波动性。但上述文献默认将下垂控制系数视为静态参数,导致实际运行中动态响应与功率分配效果受限。为克服静态下垂控制的局限性,一些学者提出将下垂参数动态优化。例如,文献[9]提出二次无功下垂控制,并证明高压平衡点正好对应于一个带有下垂增益的优化问题解,等价于把下垂系数作为优化设计量来最小化电压偏差与无功损耗。文献[10]将下垂控制参数视为优化变量,提出一种基于安全约束的下垂参数分段优化方法,提高孤岛微电网在负荷扰动下的下垂控制效果。文献[11]考虑实时负荷变化带来的频率偏差,提出一种基于深度强化学习的动态下垂控制策略。然而,在基于逆变器控制的微电网中,下垂控制参数是影响系统稳定性的关键因素^[12-14],尽管上述文献考虑了动态优化下垂控制系数,但仍忽略了对小干扰稳定性的影响。

随着大规模电力电子设备接入微电网,系统惯量显著降低,使得小干扰稳定性问题日益突出,尤其在孤岛运行下表现得更为显著。文献[15]提出自适应虚拟阻抗的下垂控制方案,并进行小干扰稳定性分析以确保最优控制参数。文献[10]提出一种基于安全约束的下垂控制参数优化方法,进一步研究微电网在意外扰动下的稳定性。文献[16]提出储能系统(energy storage system, ESS)投入运行后的微电网协调控制策略,使用特征值法进行小干扰稳定性分析。尽管上述研究考虑了微电网孤岛运行下的小干扰稳定性问题,然而只是将小干扰稳定性视为事后验算,调度最优方案一旦遭遇微小扰动便可能失稳。对于考虑小干扰稳定性约束的优化,目前仅在

大电网中有较为成熟的处理方法。例如,文献[17]提出一种考虑小干扰稳定性约束的最优潮流模型,将稳定裕度线性化为显式约束嵌入优化问题,从而无需重复特征值运算。文献[18]面向新能源集群并网系统,将小干扰稳定性约束显式嵌入优化配置模型。文献[19]通过支持向量机构建小信号稳定性代理约束,并结合高效采样策略与惩罚因子进行微电网优化,将稳定性约束显式嵌入最优潮流(optimal power flow, OPF)模型中。

对于孤岛微电网而言,下垂控制系数决定系统的小干扰稳定性。但大量电力电子设备的接入会导致稳定性分析阶数高、非线性强,对稳定性约束的生成产生很大影响。文献[20]提出了一种针对逆变器主导孤岛微电网的小干扰稳定性约束最优潮流模型,基于 Lyapunov 方程将小干扰稳定性约束显式嵌入传统最优潮流中,并利用降阶模型和凸松弛方法处理非凸性。文献[21]提出一个孤岛微电网的两阶段鲁棒优化运行框架,将小干扰稳定裕度约束显式嵌入调度模型,在保障小干扰稳定性的前提下实现运行成本最优。然而,上述文献基于解析模型建立小干扰稳定性约束,通过线性化状态空间矩阵求解特征值,求解难度较大。相比之下,使用数据驱动方法无需求解状态空间矩阵,可以凸形式显式嵌入优化问题^[19],从而降低建模依赖性与计算开销。

基于以上问题,为了确保微电网孤岛运行时的频率电压安全,本文提出一种内嵌输入凸神经网络(input convex neural network, ICNN)小干扰稳定性约束的孤岛微电网优化运行方法,主要贡献概括如下。

1) 在孤岛微电网中考虑逆变器主导控制,利用状态空间矩阵描述系统稳定性,以阻尼比灵敏度为搜寻方向,快速定位稳定边界区域,建立稳定性边界样本集。

2) 基于 ICNN 学习稳定性样本中的小干扰稳定性约束,并使用大 M 法将稳定约束转换为线性不等式嵌入到优化问题中,从而避免了高阶、非线性稳定性约束的显式求解。

3) 考虑源荷的不确定性,并结合信息间隙决策理论(information-gap decision theory, IGDT)提出一种含有数据驱动代理约束的孤岛微电网鲁棒优化运行模型,在保障小干扰稳定性的前提下,增强微电网运行决策在不确定性环境下的鲁棒性。

1 问题构建

1.1 微电网优化模型

本文所研究的孤岛微电网采用辐射型结构,类

似配电网，但与主电网没有电能交换，仅考虑光伏 (photovoltaic, PV) 和 ESS 两类逆变器接入系统中。微电网灵活调度 PV 和 ESS，满足内部负荷需求和新能源发电的间歇性，整体优化框架如图 1 所示。PV 和 ESS 的功率环采用下垂控制。本文中直接优化的是下垂控制参数，通过该参数自动调节功率而不是直接优化功率。

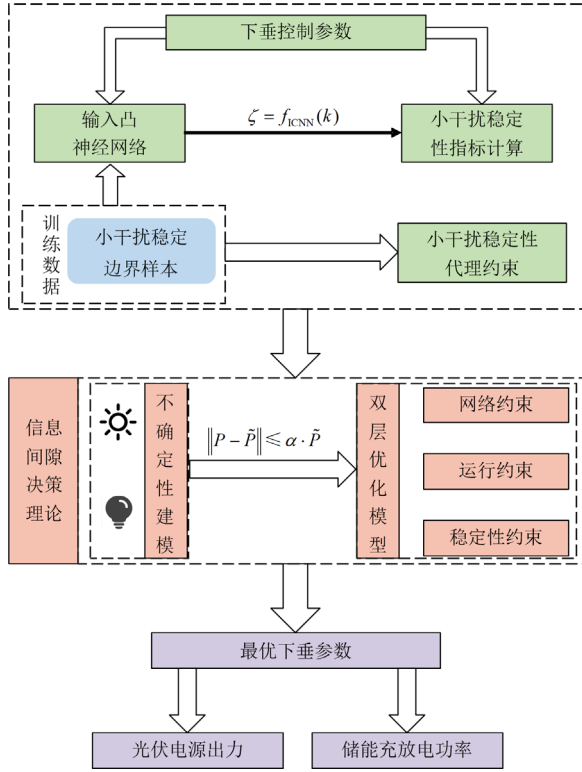


图 1 微电网优化框架图

Fig. 1 Structure diagram of microgrid optimization

1.1.1 目标函数

孤岛微电网的优化运行以逆变器下垂控制参数为决策量，通过参数驱动功率自动分配，最大程度地减小网络损耗和频率偏差，同时满足稳定性约束。因此，目标函数 F 可以表示为

$$F = \underset{\{k_p, k_q, \Delta P^{PV}, \Delta Q^{PV}, \Delta P^{ESS}, \Delta Q^{ESS}\}}{\arg \min} C_1 \cdot \sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^N \sum_{j \in S(i)} (I_{ij}^t)^2 r_{ij} + C_2 \cdot \sum_{t=1}^T \sum_{t_1=1}^{T_1} (f_{t_1}^t - 1)^2 \quad (1)$$

式中：第一项表示网络损耗；第二项表示频率偏移； C_1 和 C_2 表示权重系数； t 表示微电网运行中的时刻点； t_1 表示频率离散点； N 表示节点数； i 和 j 表示微电网中的节点； $S(i)$ 表示节点 i 的子节点集合； I_{ij}^t 表示线路 ij 上的电流； r_{ij} 表示线路 ij 的电阻； $f_{t_1}^t$ 表示 t 时刻第 t_1 个离散点的频率，具体离散化过程见

后文频率约束； k_p 和 k_q 分别表示逆变器的有功和无功下垂控制系数； ΔP^{PV} 和 ΔQ^{PV} 分别表示光伏有功和无功功率的调节量； ΔP^{ESS} 和 ΔQ^{ESS} 分别表示 ESS 有功和无功功率的调节量； T 为优化周期， $T = 24 \text{ h}$ ； T_1 表示离散化的步数 300。另外，光伏逆变器运行在非最大功率点 (off maximum power point tracking, off-MPPT) 模式，即可同时主动调节有功功率和无功功率。

1.1.2 Distflow 潮流方程

对于拥有辐射型结构的微电网而言，同样使用 Distflow 潮流方程^[22]来描述支路上的功率平衡。

$$P_{j,PV}^t + P_{j,ESS}^t - P_{j,L}^t = \sum_{jm \in M} P_{jm}^t - \sum_{ij \in M} (P_{ij}^t - (I_{ij}^t)^2 r_{ij}) \quad (2)$$

$$Q_{j,PV}^t + Q_{j,ESS}^t - Q_{j,L}^t = \sum_{jm \in M} Q_{jm}^t - \sum_{ij \in M} (Q_{ij}^t - (I_{ij}^t)^2 x_{ij}) \quad (3)$$

$$(V_j^t)^2 = (V_i^t)^2 - 2(r_{ij} P_{ij}^t + x_{ij} Q_{ij}^t) + (r_{ij}^2 + x_{ij}^2) (I_{ij}^t)^2 \quad (4)$$

$$\left\| \begin{array}{c} 2P_{ij}^t \\ 2Q_{ij}^t \\ (I_{ij}^t)^2 - (V_i^t)^2 \end{array} \right\|_2 \leq (I_{ij}^t)^2 + (V_i^t)^2, \forall ij \in O \quad (5)$$

式中： $P_{j,PV}^t$ 和 $Q_{j,PV}^t$ 分别表示 t 时刻节点 j 上光伏逆变器的有功、无功输出功率； $P_{j,ESS}^t$ 和 $Q_{j,ESS}^t$ 分别表示 t 时刻节点 j 上 ESS 的有功、无功输出功率； $P_{j,L}^t$ 和 $Q_{j,L}^t$ 分别表示 t 时刻节点 j 的有功和无功负荷； P_{ij}^t 和 Q_{ij}^t 分别表示 t 时刻支路 ij 首端的有功和无功功率； O 表示微电网节点集合； M 表示线路集合； x_{ij} 表示线路 ij 的电抗； V_i^t 表示 t 时刻节点 i 的电压幅值。

1.1.3 频率约束

采用惯性中心定理，将微电网近似为一阶惯性系统，其频率动态响应可由一阶惯性函数表示^[23]。

$$2H \frac{df(t')}{dt'} = P_G - P_D - Df(t') \quad (6)$$

式中： H 为各并网 PV 和 ESS 逆变器的惯性常数之和； $f(t')$ 为频率 f 关于时间变量 t' 的函数； D 表示整个系统的等效阻尼系数； P_G 表示微电网的总发电功率； P_D 表示系统的总电力负荷。通过离散化微分方程，可以得到频率计算公式为

$$f_{t_1+1}^t = f_{t_1}^t + \Delta t_1 \cdot \frac{1}{2H} (P_{t_1,G}^t - P_{t_1,D}^t - D(f_{t_1}^t - f_n)) \quad (7)$$

$$f_{t_1}^t = f^t \quad (8)$$

式中： $P_{t_1,G}^t$ 和 $P_{t_1,D}^t$ 分别表示 t 时刻第 t_1 个离散点微电网总的发电功率和负荷功率； f^t 表示 t 时刻的初

始频率; f_n 表示额定频率; Δt_1 表示离散点的时间步长, 为 0.1 s。

1.1.4 下垂控制

本文使用线性下垂控制^[24]来表示逆变器的调节能力。通过逆变器确定功率输出, 根据初始功率设定点和下垂控制增益确定下垂控制函数。

$$\begin{cases} Q_{i,PV}^* = Q_{i,PV,set} - k_{i,q}^t \Delta V_i^t \\ \Delta V_i^t = V_i^t - V_n \end{cases} \quad (9)$$

$$Q_{i,PV}^t = \begin{cases} Q_{i,PV,max}, & Q_{i,PV}^t > Q_{i,PV,max} \\ Q_{i,PV}^*, & -Q_{i,PV,max} \leq Q_{i,PV}^t \leq Q_{i,PV,max} \\ -Q_{i,PV,max}, & Q_{i,PV}^t < -Q_{i,PV,max} \end{cases} \quad (10)$$

$$\begin{cases} P_{i,PV}^* = P_{i,PV,set} - k_{i,p}^t \Delta f_{t_1}^t \\ \Delta f_{t_1}^t = f_{t_1}^t - f_n \end{cases} \quad (11)$$

$$P_{i,PV}^t = \begin{cases} P_{i,PV,max}, & P_{i,PV}^t > P_{i,PV,max} \\ P_{i,PV}^*, & -P_{i,PV,max} \leq P_{i,PV}^t \leq P_{i,PV,max} \\ 0, & P_{i,PV}^t < -P_{i,PV,max} \end{cases} \quad (12)$$

式中: $P_{i,PV}^t$ 和 $Q_{i,PV}^t$ 分别为 t 时刻节点 i 光伏逆变器有功、无功功率输出; $P_{i,PV}^*$ 、 $Q_{i,PV}^*$ 分别为线性下垂函数计算出的光伏有功、无功功率; $P_{i,PV,set}$ 、 $Q_{i,PV,set}$ 分别为节点 i 光伏逆变器下垂控制的有功、无功功率设定值; $k_{i,p}^t$ 、 $k_{i,q}^t$ 分别为 t 时刻节点 i 逆变器有功、无功的下垂控制增益; $P_{i,PV,max}$ 和 $Q_{i,PV,max}$ 分别表示节点 i 光伏逆变器输出的有功、无功功率最大值; V_n 表示额定电压。

类似地, ESS 逆变器同样可采用下垂控制实现频率与电压调节, 其控制函数表示为

$$Q_{i,ESS}^* = Q_{i,ESS,set} - k_{i,q}^t \Delta V_i^t \quad (13)$$

$$Q_{i,ESS}^t = \begin{cases} Q_{i,ESS,max}, & Q_{i,ESS}^t > Q_{i,ESS,max} \\ Q_{i,ESS}^*, & -Q_{i,ESS,max} \leq Q_{i,ESS}^t \leq Q_{i,ESS,max} \\ -Q_{i,ESS,max}, & Q_{i,ESS}^t < -Q_{i,ESS,max} \end{cases} \quad (14)$$

$$P_{i,ESS}^* = P_{i,ESS,set} - k_{i,p}^t \Delta f_{t_1}^t \quad (15)$$

$$P_{i,ESS}^t = \begin{cases} P_{i,ESS,max}, & P_{i,ESS}^t > P_{i,ESS,max} \\ P_{i,ESS}^*, & -P_{i,ESS,max} \leq P_{i,ESS}^t \leq P_{i,ESS,max} \\ -P_{i,ESS,max}, & P_{i,ESS}^t < -P_{i,ESS,max} \end{cases} \quad (16)$$

式中: $P_{i,ESS}^t$ 、 $Q_{i,ESS}^t$ 分别为 t 时刻节点 i 储能逆变器有功、无功功率输出; $P_{i,ESS}^*$ 、 $Q_{i,ESS}^*$ 分别为线性下垂函数计算出的储能有功、无功功率输出; $P_{i,ESS,set}$ 、

$Q_{i,ESS,set}$ 分别为节点 i 储能逆变器下垂控制的有功、无功功率设定值; $P_{i,ESS,max}$ 和 $Q_{i,ESS,max}$ 分别表示节点 i 储能逆变器可输出的有功、无功功率最大值。需要注意的是, 储能系统有功功率可以为负, 即可以吸收有功功率, 这与光伏逆变器只能发出有功功率不同。

此外, 为保证各逆变器的下垂参数处于可调范围内, 对逆变器节点的下垂增益设置如式(17)和式(18)所示约束。

$$k_{i,q,min} \leq k_{i,q}^t \leq k_{i,q,max}, \forall i \in G \quad (17)$$

$$k_{i,p,min} \leq k_{i,p}^t \leq k_{i,p,max}, \forall i \in G \quad (18)$$

式中: $k_{i,q,min}$ 和 $k_{i,q,max}$ 分别表示节点 i 逆变器无功下垂控制增益的最小值和最大值; $k_{i,p,min}$ 和 $k_{i,p,max}$ 分别表示有功下垂控制增益的最小值和最大值; G 表示光伏或储能逆变器节点集合。

1.1.5 光伏容量约束

微电网联网运行时, 光伏逆变器通常工作在最大功率点(maximum power point tracking, MPPT)模式下, 不考虑有功下垂。孤岛模式下, 负荷的变化会引起频率波动更大, 需优化有功功率, 因此, 光伏逆变器工作在 off-MPPT 模式。这种情况下, 有功功率视为可调度, 但仍需满足电力分配需求。

$$0 \leq P_{i,PV}^t \leq P_{i,PV,max} \quad (19)$$

$$(P_{i,PV}^t)^2 + (Q_{i,PV}^t)^2 \leq (S_{i,PV})^2 \quad (20)$$

式中: $S_{i,PV}$ 表示节点 i 光伏逆变器的额定容量。

1.1.6 储能系统运行约束

储能系统除下垂控制外, 还需要额外考虑充放电等运行约束^[25]。

$$0 \leq P_{i,ch}^t \leq u_i^t P_{i,ch,max} \quad (21)$$

$$0 \leq P_{i,disch}^t \leq (1 - u_i^t) P_{i,disch,max}, u_i^t \in \{0, 1\} \quad (22)$$

$$P_{i,ESS}^t = P_{i,ch}^t + P_{i,disch}^t \quad (23)$$

$$(P_{i,ch}^t + P_{i,disch}^t)^2 + (Q_{i,ESS}^t)^2 \leq (S_{i,ESS})^2 \quad (24)$$

$$E_i^{t+1} = E_i^t + (\eta_{ESS} P_{i,ch}^t - \frac{1}{\eta_{ESS}} P_{i,disch}^t) \Delta t \quad (25)$$

$$E_{i,min} \leq E_i \leq E_{i,max} \quad (26)$$

式中: $P_{i,ch}^t$ 和 $P_{i,disch}^t$ 分别为节点 i 的储能逆变器在 t 时刻的充放电功率; $P_{i,ch,max}$ 和 $P_{i,disch,max}$ 分别为最大充、放电功率; u_i^t 表示节点 i 的储能逆变器在 t 时刻的运行状态, 用于保证充放电不同时进行; $S_{i,ESS}$ 为节点 i 的储能逆变器容量; E_i^t 表示节点 i 储能逆变器的在 t 时刻的荷电状态; Δt 为优化周期步长; $E_{i,min}$ 和 $E_{i,max}$ 分别表示节点 i 储能逆变器荷电状态的最小

值和最大值； η_{ESS} 为储能系统充放电效率常数。

1.1.7 运行安全约束

在微电网运行过程中，节点电压和系统频率应该保持在安全范围内，即

$$V_{\min} \leq V_i' \leq V_{\max} \quad (27)$$

$$f_{\min} \leq f_i' \leq f_{\max} \quad (28)$$

式中： V_{\max} 和 V_{\min} 分别为电压最大、最小值； f_{\max} 、 f_{\min} 分别为微电网系统频率的最大、最小值。

1.2 小干扰稳定性分析

采用构网型逆变器的 5 阶电磁模型表示接入电网的 PV 和 ESS，对微电网进行稳定性分析。微电网动态方程为^[26]

$$\dot{\theta}_i = f_i - f_0 \quad (29)$$

$$\frac{1}{\omega_c} \dot{f}_i = f_{\text{set}} - f_i - f_0 k_{i,p} P_i \quad (30)$$

$$\frac{1}{\omega_c} \dot{V}_i = V_{\text{set}} - V_i - k_{i,q} Q_i \quad (31)$$

$$\tau_0 \dot{I}_d = B_i V_{ij} - I_d + I_q \quad (32)$$

$$\tau_0 \dot{I}_q = B_i \theta_{ij} - I_q - I_d \quad (33)$$

式中： $\dot{\theta}_i$ 表示节点 i 相角的微分； \dot{f}_i 为节点 i 频率的微分； ω_c 为低通滤波器的截止频率； f_{set} 和 V_{set} 分别为频率和电压设定值； f_0 为系统基准频率； P_i 和 Q_i 分别为光伏或储能逆变器的输出功率； $k_{i,p}$ 和 $k_{i,q}$ 分别为节点 i 逆变器的有功和无功下垂系数； \dot{V}_i 为节点 i 电压的微分； \dot{I}_d 和 \dot{I}_q 分别为 d 、 q 轴上电流分量的微分； τ_0 为电流的动态时间常数； B_i 为节点 i 的电纳； V_{ij} 和 θ_{ij} 分别表示节点电压幅值差与相角差。

需要注意的是，当夜间光伏有功输出功率为 0 时，此时有功下垂控制失去作用。为统一白天和夜间的小干扰稳定模型，定义光伏有效有功下垂增益 $k'_{i,pv,p}$ 为

$$k'_{i,pv,p} = \begin{cases} k_{i,p,\text{eff}}, & 0 < P_{i,pv} \leq P_{i,pv,\text{max}} \\ k_0, & P_{i,pv} = 0 \end{cases} \quad (34)$$

式中： $k'_{i,p,\text{eff}}$ 表示光伏在正常出力时的有功下垂系数； k_0 表示在光伏停机时的有功下垂系数，为一个极小的值，此时，光伏逆变器的无功下垂控制仍能进行调压。

由此，可以将微电网建模为微分-代数方程。

$$\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{f}(\mathbf{x}, \mathbf{z}) \quad (35)$$

$$0 = \mathbf{g}(\mathbf{x}, \mathbf{z}) \quad (36)$$

式中： \mathbf{x} 表示系统状态变量； \mathbf{z} 表示系统的输入变量； $\mathbf{f}(\cdot)$ 表示微电网动态函数； $\mathbf{g}(\cdot)$ 表示潮流相关函数。线性化可得到小干扰稳定性模型为

$$\begin{bmatrix} \Delta \dot{\mathbf{x}} \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{A} & \mathbf{B} \\ \mathbf{C} & \mathbf{D} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \mathbf{x} \\ \Delta \mathbf{z} \end{bmatrix} \quad (37)$$

式中： $\Delta \dot{\mathbf{x}}$ 为状态变量导数偏差； $\Delta \mathbf{x}$ 和 $\Delta \mathbf{z}$ 分别为状态变量偏差和代数变量偏差； \mathbf{A} 、 \mathbf{B} 、 \mathbf{C} 和 \mathbf{D} 为状态变量和输入变量的系数矩阵。

消去输入变量 \mathbf{z} ，可得

$$\Delta \dot{\mathbf{x}} = (\mathbf{A} - \mathbf{B}\mathbf{D}^{-1}\mathbf{C})\Delta \mathbf{x} = \tilde{\mathbf{A}}\Delta \mathbf{x} \quad (38)$$

式中： $\tilde{\mathbf{A}}$ 为系统状态矩阵，对矩阵进行分析可以评估微电网稳定性。矩阵的特征值和阻尼比分别表示为

$$\lambda_i = \sigma_i \pm j\omega_i \quad (39)$$

$$\zeta_i = -\frac{\sigma_i}{\sqrt{\sigma_i^2 + \omega_i^2}} \quad (40)$$

式中： λ_i 表示状态矩阵的特征值； σ_i 和 ω_i 分别为特征值的实部和虚部； ζ_i 表示系统的阻尼比。如果所有特征值的实部均小于 0，则系统是小干扰稳定的。阻尼比是稳定性的综合指标，将其作为小干扰稳定性指标^[17]，则稳定性约束表示为

$$\zeta_{\min} = h(s) \geq \zeta_{\text{cr}} \quad (41)$$

式中： ζ_{\min} 为最小阻尼比； $h(\cdot)$ 为运行参数 s 和 ζ_{\min} 之间的映射关系； ζ_{cr} 为临界阻尼比，通常为 3%~5%。

1.3 不确定性模型

上述模型为确定性模型，可由求解器直接进行求解。然而，孤岛微电网中接入高比例可再生能源，其不确定性对系统安全稳定运行的影响更为明显，因此，本节采用 IGDT 处理源荷的不确定性。

IGDT 不依赖于不确定参数的概率分布，通过引入容忍度参数来描述预测值与实际值之间的偏离程度。根据决策者对风险的态度，将 IGDT 分为风险规避和机会寻求策略^[27]。本文目的是尽可能减小源荷不确定性对安全稳定性的影响，因此使用风险规避策略进行优化。将不确定性集合描述为

$$U(\alpha, \tilde{P}_{\text{PV}}) = \{P_{\text{PV}} : \|P_{\text{PV}} - \tilde{P}_{\text{PV}}\| \leq \alpha \cdot \tilde{P}_{\text{PV}}\} \quad (42)$$

$$U(\alpha, \tilde{P}_{\text{L}}) = \{P_{\text{L}} : \|P_{\text{L}} - \tilde{P}_{\text{L}}\| \leq \alpha \cdot \tilde{P}_{\text{L}}\} \quad (43)$$

式中： U 为定义的信息间隙； P_{PV} 和 P_{L} 分别为光伏和负荷的不确定功率； \tilde{P}_{PV} 和 \tilde{P}_{L} 分别为光伏和负荷的预测值； α 为不确定度。

IGDT 模型上层最大化不确定度，下层对最坏情形施加约束，使目标在所有不确定场景下均满足。对于模型原目标函数，线路网损随负荷增大而增大、

随光伏出力增大而减小, 因此内层最坏情形可替换为 $P_{PV} = (1-\alpha)\tilde{P}_{PV}$ 、 $P_L = (1+\alpha)\tilde{P}_L$, 由此, 可转换为单层模型。

$$\begin{aligned} & \max \alpha \\ & \text{s.t.} \begin{cases} F \leq (1+\omega)F_0 \\ \text{式(2)一式(5)、式(7)一式(28)、式(41)} \\ P_{PV} = (1-\alpha)\tilde{P}_{PV} \\ P_L = (1+\alpha)\tilde{P}_L \end{cases} \quad (44) \end{aligned}$$

式中: F_0 为确定性模型的求解结果; ω 为偏差系数。

2 稳定性样本生成

小干扰稳定性分析对可靠运行至关重要, 但系统中往往缺乏可直接表征稳定性的数据; 若采用显式计算, 则需线性化与大规模矩阵运算, 难以满足实时性与多场景需求。数据驱动方法虽可替代显式求解, 但依赖高质量数据以保证精度与泛化能力。

2.1 稳定边界定义

在逆变器主导的微电网中, 系统阻抗比接近于 1, 稳定性受负荷功率影响较小, 主要与逆变器的下垂增益有关^[12]。因此, 可以将微电网运行点表示为

$$\mathbf{S} = [(k_{1,p}, k_{1,q}) (k_{2,p}, k_{2,q}) \cdots (k_{i,p}, k_{i,q})] \quad (45)$$

式中: \mathbf{S} 表示运行点, 运行参数为下垂增益对。将微电网运行点集合视为运行空间, 直接计算出稳定边界非常困难, 通过边界附近的运行点可以近似刻画出稳定边界。定义小干扰稳定边界^[28]为

$$\mu_1 \leq \zeta_{\min} \leq \mu_2 \quad (46)$$

式中: μ_1 和 μ_2 为阻尼比阈值。

2.2 边界样本采样

考虑到随机采样点不一定落在稳定边界区域内, 将最小阻尼比灵敏度作为运行点移动方向, 使每个运行点最终停留在边界区域附近。

$$\frac{\partial \min(\zeta_i)}{\partial s_k} = \frac{-\omega^2 \frac{\partial \sigma_i}{\partial s_k} + \sigma \omega \frac{\partial \omega_i}{\partial s_k}}{(\sigma_i^2 + \omega_i^2)^{\frac{3}{2}}} \quad (47)$$

式中: s_k 为运行点的某一个运行参数。

将灵敏度作为采样方向, 样本生成的流程如图 2 所示。其中, 不满足稳定边界的运行点需要进行更新。本文基于阻尼比灵敏度设定自适应步长, 避免步长影响采样过程。

$$\Delta S = \beta \cdot 10^{\text{floor}(\log_{10}(\left| \frac{\partial \min(\zeta)}{\partial s_k} \right|))} \quad (48)$$

式中: ΔS 为自适应步长; β 为步长系数, 函数 $\text{floor}(\cdot)$ 表示向下取整。根据最小阻尼比灵敏度的方向更新运行点, 可以得到 $l+1$ 次的运行点为

$$\mathbf{S}_{l+1} = \mathbf{S}_l + \Delta S \cdot \mathbf{E} \quad (49)$$

式中: \mathbf{E} 为单位矩阵。由此, 每个运行范围内的点都可以移动到稳定边界附近, 从而得到大量的稳定性样本。

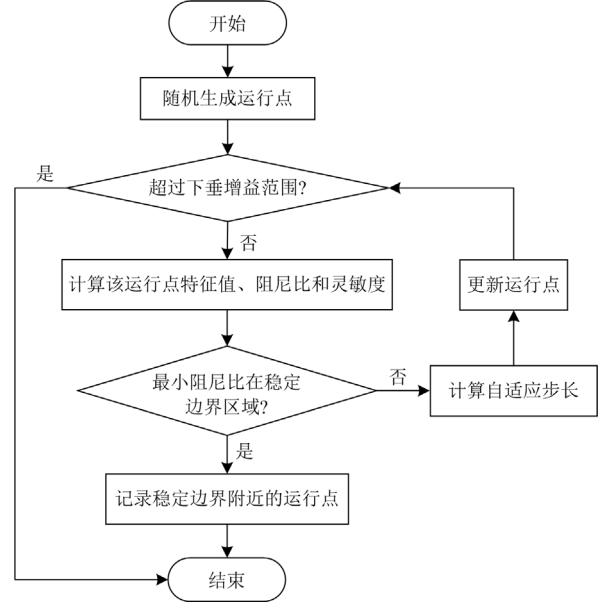


图 2 稳定边界样本生成流程

Fig. 2 Generation process of stability boundary sample

3 ICNN 嵌入的优化模型

小干扰稳定性约束式(41)中的隐函数 h 具有较强的非线性, 难以直接嵌入优化问题中。因此, 本文采用 ICNN 学习稳定性约束, 再将训练的模型嵌入到优化问题中。

3.1 ICNN 结构

ICNN 主要由线性变换层和非线性凸映射层组成, 如图 3 所示。与传统的神经网络不同, ICNN 输入-输出的映射关系是凸性的, 满足以下约束: 1) 输入层到隐藏层的权重矩阵非负, 以保证隐藏层输出对输入保持单调递增; 2) 使用凸激活函数来保持整体凸性。相关凸性保持机制在文献[29]中得到理论阐述和验证。

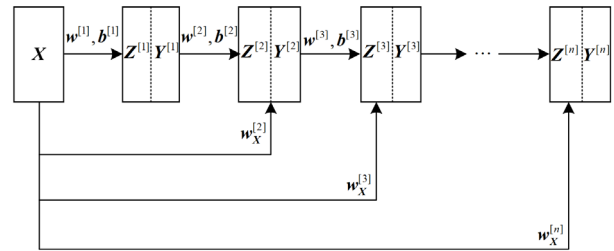


图 3 ICNN 结构

Fig. 3 Architecture of the ICNN

为训练 ICNN，将样本输入到输入层，通过隐藏层逐步传递至输出层。随后，基于预先定义的损失函数计算误差，并采用反向传播进行参数更新。该过程不断迭代，直至模型收敛。本文使用 ReLu 激活函数，ICNN 每一层的输入输出关系表示为

$$\begin{cases} \mathbf{Z}^{[k]} = \mathbf{w}^{[k]} \mathbf{Z}^{[k-1]} + \mathbf{w}_X^{[k]} \mathbf{X} + \mathbf{b}^{[k]} \\ \mathbf{Y}^{[k]} = \max(\mathbf{Z}^{[k]}, 0), \forall k \in [2, n] \\ \mathbf{Z}^{[1]} = \mathbf{w}^{[1]} \mathbf{X} + \mathbf{b}^{[1]} \end{cases} \quad (50)$$

式中： \mathbf{X} 为神经网络的输入； $\mathbf{Z}^{[k]}$ 和 $\mathbf{Y}^{[k]}$ 分别为第 k 个隐藏层的输入和输出； $\mathbf{w}^{[k]}$ 和 $\mathbf{w}_X^{[k]}$ 分别为连接到上一层和输入层的权重矩阵； $\mathbf{b}^{[k]}$ 为偏置矩阵。

3.2 稳定性优化模型

3.1 节所构建的 ICNN 模型可在保证凸性的同时，有效评估系统的稳定性，从而替代解析式(43)，得到神经网络嵌入的稳定性约束为

$$Y^{[n]} \geq \zeta_{cr} \quad (51)$$

式中： $Y^{[n]}$ 表示 ICNN 的最终输出，即为替代解析式得到的系统最小阻尼比。

所构建的小干扰稳定凸优化模型，能够在保证稳定性的前提下实现微电网的优化运行，但由于神经网络非线性结构，优化问题仍然难以求解。本文采用大 M 法^[30]对 ICNN 进行线性化，将稳定性约束转换为的一组混合整数线性约束。

$$\begin{cases} \mathbf{Z}^{[k]} \geq \mathbf{w}^{[k]} \mathbf{Z}^{[k-1]} + \mathbf{w}_X^{[k]} \mathbf{X} + \mathbf{b}^{[k]} \\ \mathbf{Z}^{[k]} \geq 0 \\ \mathbf{Z}^{[k]} \geq \mathbf{w}^{[k]} \mathbf{Z}^{[k-1]} + \mathbf{w}_X^{[k]} \mathbf{X} + \mathbf{b}^{[k]} + \mathbf{M}(1 - \delta^{[k]}) \\ \mathbf{Z}^{[k]} \leq \mathbf{M} \delta^{[k]}, \forall k \in [2, n] \end{cases} \quad (52)$$

式中： \mathbf{M} 为一个足够大的常数矩阵； $\delta^{[k]}$ 为引入的二进制辅助变量。

3.3 模型求解

上述大 M 法已处理了 ICNN 嵌入的非线性约束问题，但下垂控制中的下垂控制增益引入了双线性项，使得优化模型非凸，难以获得全局最优解。本文采用 McCormick 松弛法^[31]对模型中的双线性项进行线性化处理。

对于任意双线性项 $x \cdot y$ ，可引入辅助变量 m 予以替代。

$$m = k_{i,q}^t \cdot V_i^t \quad (53)$$

式中： m 为无功下垂控制中双线性项的替代项。

采用 McCormick 松弛将 m 表达为凸包络。

$$\begin{cases} m \geq k_{i,q,\min}^t V_i^t + k_{i,q}^t V_{\min} - k_{i,q,\min}^t V_{\min} \\ m \geq k_{i,q,\max}^t V_i^t + k_{i,q}^t V_{\max} - k_{i,q,\max}^t V_{\max} \\ m \leq k_{i,q,\min}^t V_i^t - k_{i,q}^t V_{\max} - k_{i,q,\min}^t V_{\max} \\ m \leq k_{i,q,\max}^t V_i^t + k_{i,q}^t V_{\min} - k_{i,q,\max}^t V_{\min} \end{cases} \quad (54)$$

McCormick 外近似的最坏间隙可由变量边界给出闭式上界。本文设置无功下垂控制参数取值为 $[0, 1]$ p.u.，电压取值为 $[0.95, 1.05]$ p.u.，最坏间隙不超过 0.025 p.u.。同理可推导出有功下垂的松弛约束。

通过上述处理，原优化问题被重构为一个混合整数二阶锥规划(mixed-integer second-order cone programming, MISOCP)问题，从而可借助商业求解器进行求解。然而，ICNN 作为数据驱动方法，其误差是不可避免的。因此，需要在求解后加入验证机制，以确保最终解满足小干扰稳定性要求。为减小每次求解后进行特征值计算所带来的计算负担，采用边界邻域触发机制，仅当 ICNN 输出落入定义的边界邻域时才执行一次显式特征值分析。触发条件为

$$|Y^{[n]} - \zeta_{cr}| \leq \varepsilon \quad (55)$$

式中： ε 为一个极小的数，本文取 10^{-3} ，用于定义稳定边界的邻域范围。当不满足触发机制时，运行点被认为明显远离稳定性边界，可视为无需进一步验证。该机制作为求解流程的补偿步骤，在保证稳定性的同时有效减少了对特征值的反复计算。

4 算例分析

本文使用 IEEE33 节点系统的网络参数，接入下垂控制的光伏和储能系统，断开节点 1 与主网的连接，形成孤岛微电网测试模型，如图 4 所示。原始网络参数与 MATPOWER 给出的算例相同，采用 MATLAB R2024b 与 Gurobi 求解优化问题，系统环境为 Intel Core i5-13500，32 GB 内存。

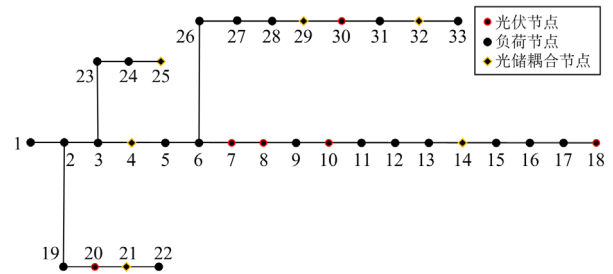


图 4 改进后的 IEEE33 节点系统图

Fig. 4 Diagram of modified IEEE33-bus system

该微电网通过逆变器接入光伏和储能系统，图中光储耦合节点表示同一并网节点同时接入光伏和储

能逆变器, 光伏和储能系统的总装机容量分别为 6.14 MW 和 4.21 MW, 系统其他主要参数见表 1。

表 1 测试系统主要参数设定

参数	取值	参数	取值
ω_0/Hz	5	$[V_{\min}, V_{\max}]$	[0.95, 1.05] p.u.
f_0/Hz	50	$[f_{\min}, f_{\max}]$	[49.8, 50.2] Hz
$[k_{p,\min}, k_{p,\max}]$	[0.01, 1] p.u.	H	5.2
$[k_{q,\min}, k_{q,\max}]$	[0.1, 1] p.u.	D	2.7

4.1 稳定性样本生成

将最小阻尼比在[-3%,3%]内的运行点定义为稳定边界区域, 对本文方法与暴力搜寻(brute force, BF)法和拉丁超立方抽样(latin hypercube sampling, LHS)方法进行对比。在随机生成的 5000 个运行点形成的区域内进行边界点搜寻, 结果如表 2 所示。

表 2 不同采样方法对比

采样方法	稳定边界点数量	采样时间/s
BF	166	26 978
LHS	639	2670
本文方法	1691	1846

由于 BF 法是纯随机一次性搜寻样本点, 大量样本点远离边界, 造成计算浪费。LHS 方法抽样更均匀、方差更小, 但当稳定边界在搜寻空间中占比较小时, 收集到的稳定边界样本的数量较少。本文方法对每个运行点都进行迭代更新, 使运行点不断靠近稳定边界, 提高了采样效率。

4.2 ICNN 训练过程

基于前文的稳定边界数据生成方法, 随机生成 10 000 个样本, 将这些样本按 7:3 的比例分为训练集和测试集。增加网络层数直至测试误差收敛, 同时手动调整神经元的数量, 采用交叉验证以提高泛化能力。

选取均方差作为训练过程中的损失函数, 如图 5 所示。由图 5 可知, 训练损失和验证损失在前 200 轮训练明显下降, 约 400 轮后 ICNN 收敛。

在训练结束后, 使用测试集进行误差分析, 结果如图 6 所示, 图中标记的数字表示最大值、上四分位数、中位数、下四分位数和最小值, 从图 6 中可以看出, 大部分数据的误差都小于 0.15。同时, 不稳定数据集的误差更小, 表明 ICNN 能更精准地判定出系统的不稳定状态, 即使稳定状态被误判成不稳定状态, 仍能保证小干扰稳定性。

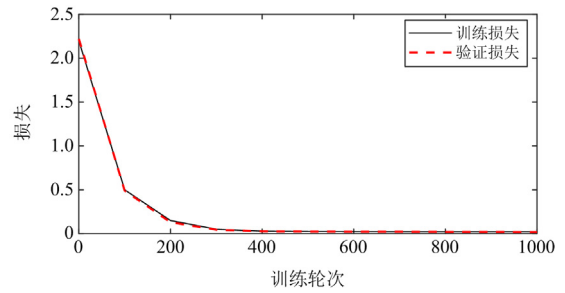


图 5 训练损失和验证损失曲线

Fig. 5 Evolution of training loss and validation loss

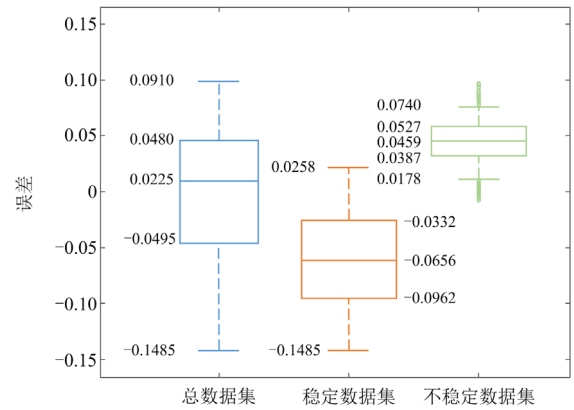


图 6 测试样本集的近似误差

Fig. 6 Approximation errors of testing samples

4.3 优化结果分析

本文的负荷数据来自澳大利亚能源市场运营公司的负荷数据, 光伏输出的预测数据参考文献[32]。图 7 展示了 24 h 的光伏率和负荷率曲线, 表示各时刻预测值与基准值的比值。设定 IGDT 中目标函数的误差系数为 0.2, 求解所提优化模型, 得到各个 DER 的最优下垂控制曲线。

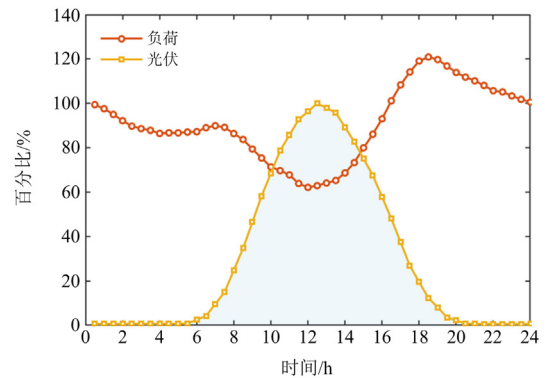


图 7 24 h 负荷率与光伏率曲线

Fig. 7 24-hour load ratio and PV ratio curve

为研究 IGDT 中目标函数的偏差系数对系统优化结果的影响, 针对不同的偏差系数分别计算了相

应的不确定度，结果如表 3 所示。由表 3 可知，随着偏差系数的增大，系统不确定度和目标函数值逐渐增大，表明源荷的波动更剧烈，因此导致优化的目标函数值更大。同时，对比确定性模型即偏差系数为 0 的情形可知，采用 IGDT 风险规避策略导致目标函数值增大了 2.35%，对经济性影响较小。

表 3 IGDT 不同偏差系数计算结果对比

Table 3 Comparison of IGDT calculation results for different deviation coefficients

偏差系数	不确定度	目标函数/p.u.
0	0	0.019 366
0.05	0.000 734 74	0.020 938
0.1	0.012 787	0.021 926
0.2	0.020 803	0.023 919

图 8 展示了各逆变器在优化后获得的 $Q-V$ 下垂特性。当节点电压发生偏移时，各机组按照最优斜率线性调整无功。不同母线位置与设备配置导致曲线出现明显的分层现象：末端节点的线性段更陡、平顶段更长，对弱网区域提供更多电压支撑；靠近电源侧的节点则斜率较小，避免过补偿。

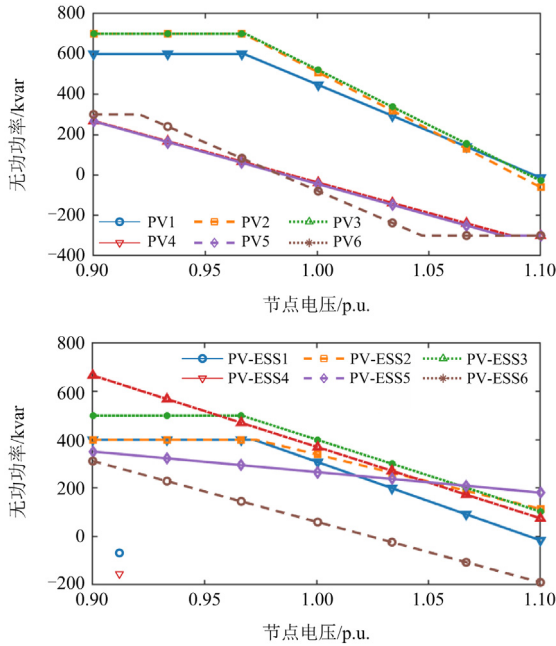


图 8 最优无功下垂控制曲线

Fig. 8 Curve of optimal reactive power droop control

图 9 给出了各机组的 $P-f$ 下垂关系。不同机组的下垂曲线有很大差异，纯光伏机组受可利用出力与爬坡速率限制，最优斜率相对较小，调频份额偏低；带储能的机组具备一定的充放电裕度，并拥有更快的爬坡能力，曲线更陡，在频率偏低的情况下提供更多有功功率支撑。

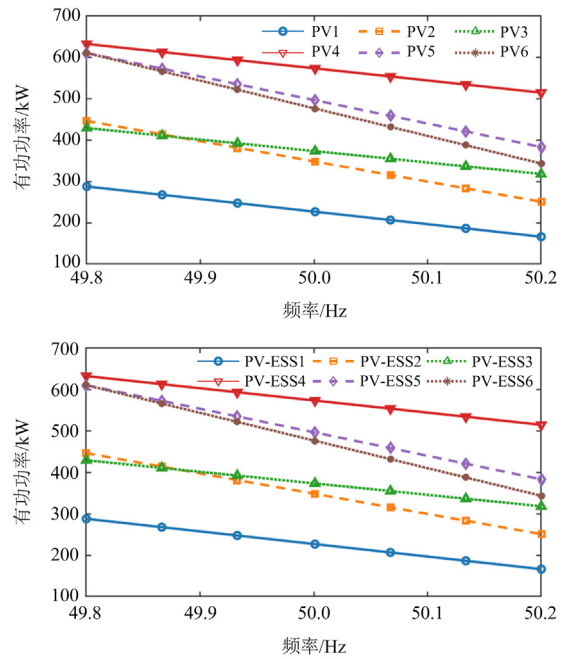


图 9 最优有功下垂控制曲线

Fig. 9 Curve of optimal active power droop control

在离散化后的频率动态过程中，将最大频率偏移作为指标，衡量系统在扰动后的最不利频率偏移程度。图 10 为逆变器调频下的最大频率偏移。结果表明，所配置的有功下垂与功率分配策略在典型日内扰动下能够有效抑制频率偏移，满足频率安全约束。

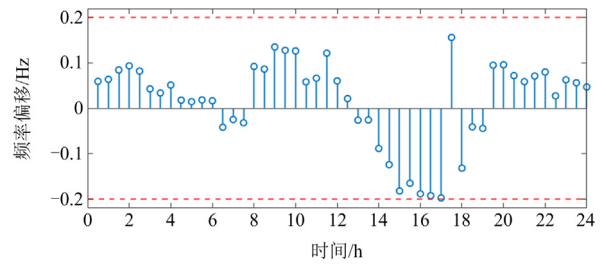


图 10 系统频率偏移

Fig. 10 System frequency deviation

图 11 展示了 33 个节点在 24 h 的电压时空分布情况。整体来看，大部分节点电压维持在安全范围内。在 12—16 h 的光伏高出力时段，个别节点电压接近 1.05 p.u.，表明分布式电源并网可能引发电压上升；当夜间负荷较大时，部分节点电压下降至 0.95 p.u. 以下，表现出一定的电压偏低风险。

进一步研究微电网的小干扰稳定性。图 12 和图 13 分别给出了 18:00 负荷峰值时，不同情况下的特征值分布。未考虑稳定性约束时，如图 12 所示，虚

轴附近的主导模态对稳定性判定至关重要, 局部放大后显示特征值实部为正, 对应阻尼比为 -1.06% , 表明系统处于不稳定状态。考虑稳定性约束并重新求解下垂系数后, 所有特征值均位于左半平面, 如图 13 所示, 且最小阻尼比提升至 3.13% , 说明所提方法能够提升小干扰稳定性并降低失稳风险。

为定量对比传统解析方法与本文方法在计算效率方面的差异, 表 4 给出了 IEEE33 节点算例下两类方法的求解耗时与阻尼比计算次数。由于传统解析方法需建立小干扰状态空间模型, 并在每次迭代中重复特征值计算; 而本文方法将稳定性约束通过 ICNN 嵌入优化问题, 在线阶段仅需调用代理约束,

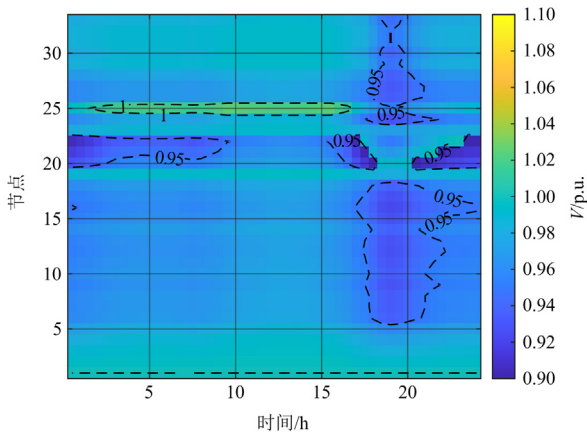


图 11 各节点电压时空分布图

Fig. 11 Distribution of nodal voltages

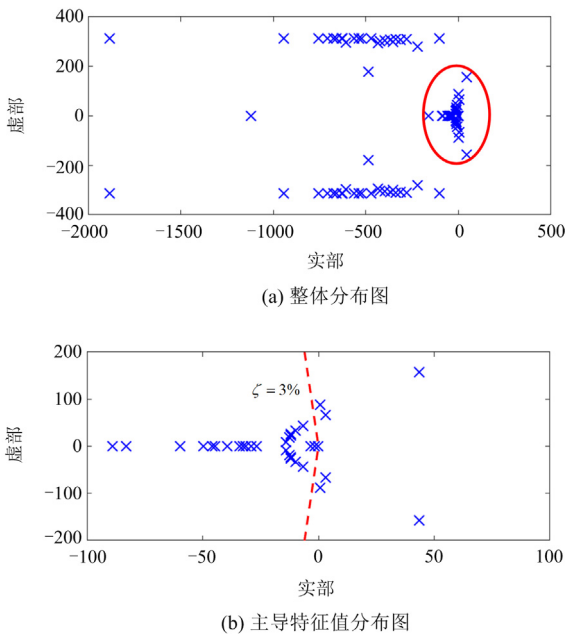
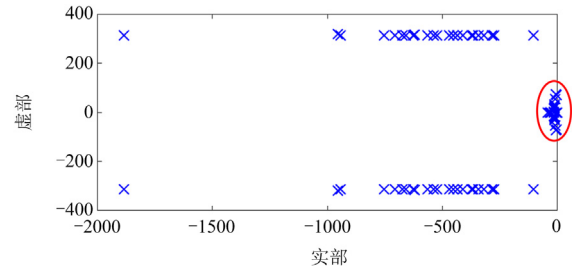
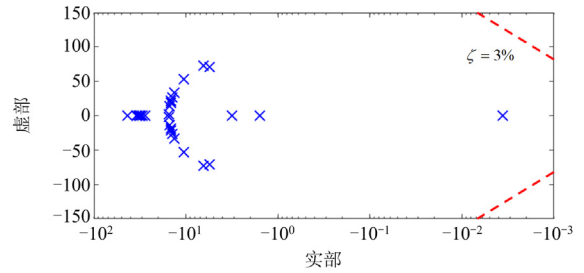


图 12 未考虑稳定性约束的特征值分布

Fig. 12 Eigenvalue distribution without stability constraints



(a) 整体分布图



(b) 主导特征值分布图

图 13 考虑稳定性约束的特征值分布

Fig. 13 Eigenvalue distribution under stability constraints

表 4 不同方法的计算效率对比

Table 4 Comparison of computational efficiency of different methods

方法	计算耗时/s	阻尼比计算次数
传统解析	38.24	21
本文方法	1.91	1

显著降低了建模复杂度。因此, 由表 4 可见, 本文方法在保证稳定性的同时具有更高的计算效率。

5 结论

针对基于逆变器下垂控制的孤岛微电网如何在计及安全约束的情况下考虑控制系数对系统稳定性影响的运行问题, 本文提出了一种考虑小干扰稳定性约束的优化调度方法, 并在改进的 IEEE33 节点系统中进行仿真分析, 主要结论如下。

1) 本文所提优化模型中, 引入频率与电压双下垂控制, 基于 IGDT 对下垂系数进行优化, 保证在最大不确定性水平下, 系统电压与频率仍始终处于预设安全区间内。

2) 本文基于数据驱动得到稳定性约束, 并通过线性化方法嵌入优化问题中, 将高度非线性的稳定性约束转化为易于求解的形式, 提高了系统稳定性, 并提升了求解效率。

参考文献

[1] 刘浩, 王丹, 刘佳委, 等. 计及分布式水风光发电时空

- 相关性的多微网协同优化策略[J]. 电力系统保护与控制, 2025, 53(13): 23-35.
- LIU Hao, WANG Dan, LIU Jiawei, et al. Multi-microgrid collaborative optimization strategy considering spatiotemporal correlation of distributed hydro-wind-solar generation[J]. Power System Protection and Control, 2025, 53(13): 23-35.
- [2] 黄冬梅, 吕嘉欣, 时帅, 等. 计及需求响应的海岛微电网群优化运行研究[J]. 电力系统保护与控制, 2024, 52(9): 88-98.
- HUANG Dongmei, LÜ Jiaxin, SHI Shuai, et al. Optimal operation of island microgrid clusters considering demand response[J]. Power System Protection and Control, 2024, 52(9): 88-98.
- [3] 邱星宇, 吴毓峰, 王梓耀, 等. 计及并离网频率约束的微电网容量优化配置方法[J]. 电力系统保护与控制, 2023, 51(21): 166-177.
- QIU Xingyu, WU Yufeng, WANG Ziyao, et al. Optimal configuration method of microgrid capacity considering grid connection and islanding frequency constraints[J]. Power System Protection and Control, 2023, 51(21): 166-177.
- [4] 李艳波, 杨凯, 陈俊硕, 等. 一种适用于风储微电网的混合储能系统的功率分配策略[J]. 电测与仪表, 2025, 62(2): 43-50.
- LI Yanbo, YANG Kai, CHEN Junshuo, et al. Power distribution strategy for a hybrid energy storage system suitable for windstorage microgrid[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2025, 62(2): 43-50.
- [5] 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.
- [6] MAULIK A, DAS D. Optimal operation of droop-controlled islanded microgrids[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2017, 9(3): 1337-1348.
- [7] JABR R A. Economic operation of droop-controlled AC microgrids[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2021, 37(4): 3119-3128.
- [8] CHEN Tianlun, SONG Yue, HILL D J, et al. Chance-constrained OPF in droop-controlled microgrids with power flow routers[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2022, 13(4): 2601-2613.
- [9] SIMPSON-PORCO J W, DÖRFLER F, BULLO F. Voltage stabilization in microgrids via quadratic droop control[J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 2016, 62(3): 1239-1253.
- [10] LIU Yitong, LI Zhengshuo, ZHAO Junbo. Safety-constrained stagewise optimization of droop control parameters for isolated microgrids[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2023, 15(1): 77-88.
- [11] LEE W G, KIM H M. Deep reinforcement learning-based dynamic droop control strategy for real-time optimal operation and frequency regulation[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2025, 16(1): 284-294.
- [12] GORBUNOV A, PENG J C H, BIALEK J W, et al. Identification of stability regions in inverter-based microgrids[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2021, 37(4): 2613-2623.
- [13] 王梦杰, 毛安家, 杨勇, 等. 基于下垂控制与虚拟惯性组合的电储能自主频率响应控制策略[J]. 供用电, 2025, 42(9): 98-107.
- WANG Mengjie, MAO Anjia, YANG Yong, et al. Self-responsive frequency control strategy for electric energy storage based on droop control and virtual inertia combination[J]. Distribution & Utilization, 2025, 42(9): 98-107.
- [14] 徐化博, 赵艳雷, 路茂增, 等. 孤岛微电网电流同步 U-I 下垂控制方法[J]. 电测与仪表, 2024, 61(5): 190-197.
- XU Huabo, ZHAO Yanlei, LU Maozeng, et al. Current synchronous U-I droop control strategy for islanded microgrids[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2024, 61(5): 190-197.
- [15] FAN Bishuang, LI Qikai, WANG Wen, et al. A novel droop control strategy of reactive power sharing based on adaptive virtual impedance in microgrids[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2021, 69(11): 11335-11347.
- [16] CAO S, WEI F, WU Y, et al. Coordinated control for islanded DC microgrid based on derivative of bus voltage[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2023, 39(1): 628-642.
- [17] 李生虎, 蒋以天, 于新钰, 等. 考虑 DFIG 桨距角参数优化的小干扰稳定约束最优潮流模型[J]. 电力自动化设备, 2019, 39(11): 20-26.
- LI Shenghu, JIANG Yitian, YU Xinyu, et al. Small-signal stability constrained optimal power flow model considering optimization of DFIG pitch angle[J]. Electric Power Automation Equipment, 2019, 39(11): 20-26.
- [18] 孙培博, 王伟胜, 汪海蛟, 等. 计及小干扰稳定约束的新能源并网系统构网型单元配置方法[J]. 电工技术学报, 2025, 40(9): 2809-2826.

- SUN Peibo, WANG Weisheng, WANG Haijiao, et al. Configuration method for grid-forming units of renewable energy grid-integration system considering small signal stability constraints[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2025, 40(9): 2809-2826.
- [19] LIU Juelin, YANG Zhifang, ZHAO Junbo, et al. Explicit data-driven small-signal stability constrained optimal power flow[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2021, 37(5): 3726-3737.
- [20] PULLAGURAM D, MADANI R, ALTUN T, et al. Small-signal stability-constrained optimal power flow for inverter dominant autonomous microgrids[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2021, 69(7): 7318-7328.
- [21] WANG Jun, FAN Feilong, SONG Yue, et al. Stability constrained optimal operation of inverter-dominant microgrids: a two stage robust optimization framework[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2024, 15(3): 1900-1913.
- [22] 黄煜, 李忠行, 王卫民, 等. 基于拓扑重构及PCE代理模型的配电网概率风险评估[J]. 电力系统保护与控制, 2025, 53(16): 74-85.
- HUANG Yu, LI Zhongxing, WANG Weimin, et al. Probabilistic risk assessment of distribution networks based on topological reconfiguration and PCE surrogate model[J]. Power System Protection and Control, 2025, 53(16): 74-85.
- [23] LIU Dan, YANG Qiufan, CHEN Yin, et al. Optimal parameters and placement of hybrid energy storage systems for frequency stability improvement[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2025, 10(2): 40-53.
- [24] YAO Weitao, WANG Yu, XU Yan, et al. Distributed economic control with seamless mode switching for networked-microgrids[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2025, 40(4): 3247-3260.
- [25] 贺玮杰, 冯忠楠, 林湘宁, 等. 考虑源网储协同配合下的移动式波浪能发电平台并网优化调度[J]. 电工技术学报, 2024, 39(20): 6502-6516.
- HE Weijie, FENG Zhongnan, LIN Xiangning, et al. Grid-connected optimization dispatch of mobile wave energy power generation platform considering the coordination of source, network and storage[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2024, 39(20): 6502-6516.
- [26] WANG Y, PAL B C. Destabilizing attack and robust defense for inverter-based microgrids by adversarial deep reinforcement learning[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2023, 14(6): 4839-4850.
- [27] 叶希, 黄格超, 王曦, 等. 基于信息间隙决策理论的受端电网电压稳定多源协同优化调度[J]. 中国电力, 2025, 58(5): 121-136.
- YE Xi, HUANG Gechao, WANG Xi, et al. Multi-source coordinated scheduling of receiving power system considering voltage stability based on information gap decision theory[J]. Electric Power, 2025, 58(5): 121-136.
- [28] 寸馨. 基于虚拟区域特征值的数据驱动电力系统小干扰稳定评估[D]. 杭州: 浙江大学, 2023.
- CUN Xin. Data-driven small-signal stability assessment of power systems based on virtual regional eigenvalue[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2023.
- [29] MA Qing, DENG Changhong. Deterministic and robust volt-var control methods of power system based on convex deep learning[J]. Journal of Modern Power Systems and Clean Energy, 2023, 12(3): 719-729.
- [30] 张玺, 廖胜利, 方舟, 等. 耦合复杂生态约束的梯级水电短期优化调度标准混合整数线性规划模型[J]. 电网技术, 2025, 49(5): 2004-2013.
- ZHANG Xi, LIAO Shengli, FANG Zhou, et al. A short-term optimal dispatch MILP model of cascade hydropower stations coupled with complex ecological constraints[J]. Power System Technology, 2025, 49(5): 2004-2013.
- [31] 张智泉, 陈晓杰, 符杨, 等. 基于核仁聚类估计和数据驱动分布鲁棒优化的海量异构产消者联盟能量管理策略[J]. 电力系统保护与控制, 2024, 52(7): 98-114.
- ZHANG Zhiquan, CHEN Xiaojie, FU Yang, et al. Energy management strategy for massive heterogeneous prosumers alliance based on nucleolar clustering estimation and data-driven distributionally robust optimization[J]. Power System Protection and Control, 2024, 52(7): 98-114.
- [32] ZHANG Cuo, XU Yan, WANG Yu, et al. Three-stage hierarchically-coordinated voltage/var control based on PV inverters considering distribution network voltage stability[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2021, 13(2): 868-881.

收稿日期: 2025-10-27; 修回日期: 2026-01-18

作者简介:

娄轩铭(2001—), 男, 硕士研究生, 研究方向为微电网优化运行; E-mail: 202311021049@stu.cqu.edu.cn

王宇(1988—), 男, 通信作者, 博士, 教授, 研究方向为新型电力系统运行与控制。E-mail: yu_wang@cqu.edu.cn

(编辑 许威)