

基于边界安全域刻画的输配电网 协同分布式供电恢复方法

柴园园¹, 张昱泽¹, 陈海文², 李青松², 马泽超²

(1. 河北工业大学创新研究院, 石家庄市 050222; 2. 智能配用电装备与
系统国家重点实验室(河北工业大学), 天津市 300401)

摘要:【目的】在配电网因极端故障引发大范围停电时,为实现高效供电恢复并保证输电网运行安全,输配电网协同恢复至关重要。然而,输配电网隶属不同调度主体,跨层级间难以实现运行数据完全共享。为此,提出一种基于边界安全域刻画的输配电网协同分布式供电恢复方法。【方法】提出一种结合伞约束辨识预处理的改进傅里叶-莫茨金算法,利用伞约束辨识提取输电网有效约束,并通过隐式优化策略动态剔除消元过程中的冗余项,从而抑制约束规模爆炸,有效获取输电网边界功率的低维等值域,即边界安全域。提出一种考虑边界安全域的输配电网分布式协同恢复策略,该策略将边界安全域通过欧几里得投影嵌入交替方向乘子法迭代框架,实现输配电网协同供电恢复模型的分布式计算。【结果】仿真结果表明,所提安全域刻画兼顾计算精度与速度,在供电恢复效果上,所提分布式策略实现了失电区域最大化复电,且总成本与集中式全局最优解的偏差仅为0.01%。【结论】所提结合伞约束辨识预处理的改进投影算法在保证刻画精度的同时,显著降低了安全域刻画的计算复杂度,有效提升了求解效率。所提输配电网分布式供电恢复策略在保证隐私的前提下,可求得接近全局最优的复电方案。

关键词: 输配协同; 互联配电网; 安全域刻画; 分布式优化; 供电恢复

中图分类号: TM732

文献标志码: A

文章编号: 1000-7229(2026)09-0116-12

DOI: 10.12204/j.issn.1000-7229.2026.09.009

A Coordinated Distributed Power Restoration Method for Transmission and Distribution Networks Based on Boundary Security Domain Characterization

CHAI Yuanyuan¹, ZHANG Yuze¹, CHEN Haiwen², LI Qingsong², MA Zechao²

(1. Innovation Research Institute of Hebei University of Technology, Shijiazhuang 050222, China; 2. State Key
Laboratory of Smart Power Distribution Equipment and System(Hebei University of Technology), Tianjin 300401, China)

ABSTRACT: [Objective] In distribution networks where large-scale blackouts are caused by extreme faults, coordinated restoration of transmission and distribution networks is considered essential for achieving efficient power supply restoration while ensuring the operational security of the transmission network. However, since the transmission and distribution networks are operated by different dispatch entities, complete sharing of operational data across hierarchies is difficult to be achieved. For this purpose, a coordinated distributed service restoration method for transmission and distribution networks based on boundary security region characterization is proposed. [Methods] An improved Fourier-Motzkin algorithm is proposed, which incorporates umbrella constraint identification as a pre-processing step. This approach utilizes umbrella constraint identification to extract effective constraints for the transmission network and employs an implicit optimization strategy to dynamically eliminate redundant terms during the elimination process, thereby mitigating the explosion of constraint size and effectively obtaining the low-dimensional level set of boundary power for the transmission network, that is the boundary security region. A distributed collaborative restoration strategy for transmission and distribution networks that takes the boundary security region into account is proposed. This strategy embeds the boundary security region into the iterative framework of the alternating direction method of multipliers via euclidean projection, thereby enabling distributed

computation of the collaborative service restoration model for transmission and distribution networks. **[Results]** Simulation results indicate that the proposed security region characterization strikes a balance between computational accuracy and speed. In terms of service restoration performance, the proposed distributed strategy achieves maximum service restoration in the outages area, with the total cost deviating from the centralized global optimal solution by only 0.01%. **[Conclusions]** The improved projection algorithm combined with umbrella-constraint identification preprocessing significantly reduces the computational complexity of security region characterization while maintaining high accuracy, thereby effectively enhancing efficiency. Furthermore, under the premise of privacy preservation, a restoration scheme close to the global optimum can be obtained by the proposed distributed service restoration strategy for transmission and distribution networks.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 52207089) and Natural Science Foundation of Hebei Province (No. E2024202195).

KEYWORDS: transmission-distribution coordination; interconnected distribution networks; security region characterization; distributed optimization; service restoration

0 引言

近年来,极端天气灾害与突发故障频发,对电力系统的供电可靠性构成了严峻挑战^[1]。鉴于电力系统是社会经济发展的关键支撑,配电网作为电力供应的“最后一公里”,其故障后的恢复能力直接决定了用户的用电可靠性。充分利用分布式电源并实施跨区域电力转供进行快速供电恢复,对于保障电力供应至关重要^[2-6]。

现有供电恢复研究多侧重于挖掘配电网内部的多元灵活性资源,通过网络重构优化拓扑结构,利用分布式电源划分孤岛来维持关键负荷供电^[7-11]。例如,文献[12]考虑变电站配备快速可拆卸变压器的场景,提出了一种变电站-配电网协同故障恢复方法,有效提高了负荷供电恢复率。文献[13]针对含分布式电源的配电网供电恢复问题,建立了基于背包优化问题的孤岛划分数学模型,并采取动态规划算法求解。文献[14]建立了包含多类型分布式电源(distributed generator, DG)、柔性负荷和储能的多时段故障动态恢复模型,提出了一种同时考虑网络重构与孤岛划分的配电网故障供电恢复方法。

随着新型电力系统坚强电网的建设,基于联络开关的互联配电网转供技术成为提升供电恢复能力的重要手段^[15-19]。故障发生后通过联络线将失电负荷转供至相邻的正常配电网,并利用分布式电源实现跨区域功率互济。例如,文献[20]提出了一种基于联络关系的主变故障负荷转供方案,其通过对正常与故障工况进行差异化转供设计,显著提升了配电网设备利用率和负荷转供能力。文献[21]针对互联的大型配电网供电恢复场景,提出了一种协同优化方法,通过协调人工维修与配电负荷恢复任务,优化维修时序与开关操作顺序,显著提升了恢复效率。文献[22]针对互联配电网群,提出了一种基于边缘

网络前置预计算与云边协同结合的供电恢复优化算法,有效限制了模型维度,提高了算法的整体响应速度。

尽管互联配电网的转供技术能够有效缓解局部供电压力,但在应对大范围故障时,若仅侧重于配电网侧的优化计算而忽略输电网的最大供电能力约束,则可能导致输电网偏离安全运行状态,进而引发更大范围的停电事故^[23-24]。因此,有必要研究输配电网协同的供电恢复策略,以统筹考虑系统安全运行约束与负荷恢复需求,输配电网协同供电恢复主要涉及黑启动、网络重构和负荷恢复3个阶段^[25]。针对黑启动问题,文献[26]提出了一种基于目标级联分析的输配电网黑启动分布式协同优化方法,协调输配电网中的各类可控资源,实现最大化供电恢复。对于负荷恢复问题,文献[27]综合考虑了配电网内的多元资源,并计及输电网恢复过程中的机组频率响应特性,构建了输配协同恢复优化模型,旨在最小化系统停电损失。文献[28]针对输配耦合系统提出一种两阶段模型预测控制方法,实现了输配系统高效动态负荷供电恢复。在网络重构方面,文献[29]综合考虑了负荷分布调整、网络重构及应急资源实时调度,建立了输配电网双层供电恢复模型,实现了城市电网高效协同供电恢复。现有输配电网协同供电恢复研究虽已取得一定进展,但考虑配电网网络重构的分布式协同供电恢复研究成果较为缺乏,有待进一步研究。此外,现有方法鲜有考虑输配边界安全域投影对于提高输配协同优化计算效率的重要作用。

在安全域刻画方面,常用的方法可分为遍历枚举法与解析法两大类^[30-32]。其中,以经典的傅里叶-莫茨金消元法(Fourier-Motzkin elimination, FME)为代表的解析法是求解电力系统模型投影的精确方法。但随着输电网节点和约束规模的增加,该方法

生成的冗余约束呈指数级增长,易造成严重“维数灾”问题而使计算效率降低^[33-35]。现有常用的枚举法在效率与精度间存在取舍,基于确定性采样的遍历枚举计算速度较快,但边界精度受限^[36-37];基于概率论的随机采样虽能获得更精确的安全域,然而其计算负担较重^[38]。针对上述问题,本文提出一种基于边界安全域刻画的输电网协同分布式供电恢复方法,首先构建输电网供电恢复模型,然后提出输电网边界安全域精确刻画方法与分布式供电恢复方法,最后开展仿真算例分析。本文主要贡献包括:

1) 提出一种结合伞约束辨识预处理的改进 FME 投影算法。为解决安全域投影“约束爆炸”问题,首先计算约束超平面与安全域的欧氏距离,快速识别并剔除外围无效约束,然后在消元过程中引入基于隐式线性规划的“生成即剔除”动态剪枝方法,实时检测与清除冗余约束,有效提升安全域投影计算效率。

2) 提出一种考虑边界安全域投影的输电网协同分布式供电恢复策略。该策略利用欧几里得投影方法将输电网边界安全域嵌入交替方向乘子法(alternating direction method of multipliers, ADMM)的分布式迭代计算框架中,获得互联配电网供电恢复问题收敛解的同时满足输电网安全运行约束。

1 输电网协同供电恢复模型

1.1 输电网全局优化模型

本节构建输电网协同供电恢复的全局优化模型,包括输电网、失电配电网及正常配电网的目标函数与运行约束。输电网协同供电恢复优化模型可表示为如下紧凑形式:

$$\begin{cases} \min f_T(\mathbf{x}_T) + \sum_{n=1}^{n_{DN}} f_{DN,n}(\mathbf{x}_n, \mathbf{e}_n) + f_{DF}(\mathbf{x}_f, \mathbf{e}_f) \\ \text{s.t.} \\ \mathbf{x}_T \in X_T, G_T(\mathbf{x}_T) \leq 0 \\ \mathbf{x}_n \in X_n, \mathbf{e}_n \in Z_n, G_{DN,n}(\mathbf{x}_n, \mathbf{e}_n) \leq 0 \\ \mathbf{x}_f \in X_f, \mathbf{e}_f \in Z_f, G_f(\mathbf{x}_f, \mathbf{e}_f) \leq 0 \\ H_n(\mathbf{B}_{l,n}, \mathbf{B}_{l,f}) = 0 \\ H_T(\mathbf{z}_n, \mathbf{z}_n^D) = 0 \end{cases} \quad (1)$$

式中: $f_T(\mathbf{x}_T)$ 、 $f_{DN,n}(\mathbf{x}_n, \mathbf{e}_n)$ 与 $f_{DF}(\mathbf{x}_f, \mathbf{e}_f)$ 分别为输电网、正常配电网 n 与失电配电网的目标函数; $\mathbf{x}_T$ 、 $\mathbf{x}_n$ 与 $\mathbf{x}_f$ 分别为输电网、正常配电网与失电配电网的连续优化变量; $\mathbf{e}_n$ 与 $\mathbf{e}_f$ 分别为正常配电网与失电配电网的离散优化变量; n_{DN} 表示正常配电网的数量; $\mathbf{B}_{l,n}$ 与 $\mathbf{B}_{l,f}$ 分别为正常配电网与故障配电网的边界变量;集合 X_T 、 X_n 与

X_f 均表示连续变量的可行域;集合 Z_n 与 Z_f 均表示二进制变量的可行域; $G_T(\mathbf{x}_T) \leq 0$ 、 $G_{DN,n}(\mathbf{x}_n, \mathbf{e}_n) \leq 0$ 和 $G_f(\mathbf{x}_f, \mathbf{e}_f) \leq 0$ 分别表示输电网、正常配电网 n 与失电配电网的运行约束; $H_n(\mathbf{B}_{l,n}, \mathbf{B}_{l,f}) = 0$ 表示配电网 n 与故障配电网的边界等式约束; $H_T(\mathbf{z}_n, \mathbf{z}_n^D) = 0$ 表示配电网 n 与输电网的边界等式约束; $\mathbf{z}_n$ 与 $\mathbf{z}_n^D$ 为输配电网间交互的有功功率。

1.2 输电网调度模型

输电网目标函数 f_T 为机组发电成本最小。

$$f_T = \min \sum_{j \in N_G} c_j^G P_j^G \Delta t \quad (2)$$

式中: N_G 代表输电网中常规发电机组所在母线集合; c_j^G 表示母线 j 的发电机组发电报价; P_j^G 为母线 j 上发电机组的有功输出功率; Δt 为供电恢复模型的时间步长。

1) 输电网功率平衡约束:

$$\sum_{i \in \pi(j)} P_{ij}^T - P_j^G - P_j^T - P_j^{TD} = \sum_{k \in \sigma(j)} P_{jk}^T \quad (3)$$

式中: P_{ij}^T 为输电网中线路 ij 上流过的有功功率; $\pi(j)$ 表示在定义正方向下母线 j 上游节点的集合; $\sigma(j)$ 表示母线 j 下游节点的集合; P_j^T 为母线 j 上的负荷有功功率; P_j^{TD} 为输配电网间通过母线 j 交互的有功功率。

2) 输电网线路潮流方程:

$$x_{ij} P_{ij}^T = \theta_i - \theta_j \quad (4)$$

式中: x_{ij} 为输电线路 ij 的电抗值; θ_i 与 θ_j 分别为输电网母线 i 与母线 j 的相角值。

3) 输电网安全运行约束:

$$\begin{cases} -P_{ij, \max}^T \leq P_{ij}^T \leq P_{ij, \max}^T \\ \theta_{\min} \leq \theta_j \leq \theta_{\max} \\ \theta_{\text{ref}} = 0 \end{cases} \quad (5)$$

式中: $P_{ij, \max}^T$ 为输电线路有功传输容量的最大值; $\theta_{\min}$ 与 $\theta_{\max}$ 分别为输电网各母线相角的最小值与最大值; θ_{ref} 为输电网平衡节点的相角。

4) 常规机组出力约束:

$$P_{j, \min}^G \leq P_j^G \leq P_{j, \max}^G \quad (6)$$

式中: $P_{j, \min}^G$ 与 $P_{j, \max}^G$ 分别为母线 j 上发电机组的最小与最大有功出力限值。

5) 机组爬坡约束:

$$\begin{cases} P_j^G - P_{j,0}^G \leq R_j^U \\ P_{j,0}^G - P_j^G \leq R_j^D \end{cases} \quad (7)$$

式中: $P_{j,0}^G$ 为母线 j 上发电机组有功输出功率的初值; R_j^U 与 R_j^D 分别为母线 j 上发电机组向上和向下的爬坡速率。

1.3 失电配电网供电恢复模型

失电配电网目标函数 f_{DF} 为停电切负荷损失成本、光伏有功损失成本与网络损耗成本之和最小。

$$f_{DF} = \min \left(c_L \sum_{\forall j \in N_F} w_j P_j^L \Delta t + c_P \sum_{\forall ij \in E_F} \frac{P_{ij}^2 + Q_{ij}^2}{v_b} R_{ij} \Delta t + c_G \sum_{\forall j \in N_{DG}} P_{j,dec}^{PV} \Delta t \right) \quad (8)$$

式中: N_F 表示失电配电网节点集合; w_j 表示节点 j 负荷的供电状态, $w_j=1$ 表示该节点负荷失电, $w_j=0$ 表示节点负荷正常供电; P_j^L 表示节点 j 的负荷有功功率; c_L 、 c_P 和 c_G 分别表示负荷停电损失、网损和光伏有功削减损失的成本系数; E_F 表示配电网所有线路集合; P_{ij} 、 Q_{ij} 分别为线路 ij 上的有功与无功功率; v_b 表示根节点的电压幅值的平方; R_{ij} 为配电网线路 ij 的电阻值; N_{DG} 表示配电网所有装有光伏的节点集合; $P_{j,dec}^{PV}$ 为节点 j 上光伏的有功功率缩减量。

1) LinDistflow 支路潮流等式约束^[39]:

$$\begin{cases} \sum_{i \in \pi(j)} P_{ij} - (1 - w_j) P_j = \sum_{k \in \sigma(j)} P_{jk}, & j \in N_F \\ \sum_{i \in \pi(j)} Q_{ij} - (1 - w_j) Q_j = \sum_{k \in \sigma(j)} Q_{jk} \\ v_j = v_i - 2(R_{ij} P_{ij} + X_{ij} Q_{ij}) \end{cases} \quad (9)$$

$$\begin{cases} P_j = P_j^L - (P_j^{PV} - P_{j,dec}^{PV}) \\ Q_j = Q_j^L - Q_j^{PV} \end{cases} \quad (10)$$

式中: P_j 、 Q_j 分别为节点 j 负荷的净有功与无功功率; P_j^L 和 Q_j^L 分别表示节点 j 负荷的有功与无功功率; P_j^{PV} 表示节点 j 的分布式光伏有功输出功率; Q_j^{PV} 为节点 j 的光伏无功输出功率; X_{ij} 为配电网线路 ij 的电抗值; v_i 与 v_j 分别表示节点 i 与 j 电压幅值的平方。

对于含馈线开关的支路,需要使用大 M 法对支路电压等式方程进行松弛,如下所示:

$$\begin{cases} v_j \leq v_i - 2(R_{ij} P_{ij} + X_{ij} Q_{ij}) + M(1 - \alpha_{ij}) \\ v_j \geq v_i - 2(R_{ij} P_{ij} + X_{ij} Q_{ij}) - M(1 - \alpha_{ij}) \end{cases} \quad (11)$$

式中: M 表示一个值很大的常数; α_{ij} 为线路 ij 的开关状态, $\alpha_{ij}=1$ 表示线路开关闭合, $\alpha_{ij}=0$ 表示线路开关打开。

2) 电网安全运行约束:

$$\begin{cases} -\alpha_{ij} P_{ij,max} \leq P_{ij} \leq \alpha_{ij} P_{ij,max} \\ -\alpha_{ij} Q_{ij,max} \leq Q_{ij} \leq \alpha_{ij} Q_{ij,max} \\ v_{min} \leq v_j \leq v_{max} \end{cases} \quad (12)$$

$$P_{ij}^2 + Q_{ij}^2 \leq S_{ij,max}^2 \quad (13)$$

式中: $P_{ij,max}$ 和 $Q_{ij,max}$ 分别表示配电网线路允许传输有功与无功功率的最大值; v_{min} 与 v_{max} 分别表示节点电压安全运行下限与上限的平方值; $S_{ij,max}$ 表示线路最大传输容量。

式(13)中形成的可行域是一个圆域,具有非凸

非线性的特性,本文采用多边形内近似法将其线性化表示为:

$$\psi_a P_{ij} + s_a Q_{ij} + \chi_a S_{ij,max} \leq 0 \quad (14)$$

式中: ψ_a 、 s_a 与 χ_a 表示多边形线性化系数。

3) 分布式光伏运行约束:

$$\begin{cases} 0 \leq P_{j,dec}^{PV} \leq P_j^{PV} \\ |Q_j^{PV}| \leq (P_j^{PV} - P_{j,dec}^{PV}) \tan \delta_{PV} \\ (Q_j^{PV})^2 \leq (S_j^{PV})^2 - (P_j^{PV} - P_{j,dec}^{PV})^2 \end{cases} \quad (15)$$

式中: δ_{PV} 表示光伏逆变器的功率因数角, $\delta_{PV} = \cos^{-1} F_{Pmin}$, 功率因数最小值 F_{Pmin} 设定为 0.95; S_j^{PV} 是节点 j 光伏的装机容量。

4) 网络拓扑辐射状约束:

$$\begin{cases} \beta_{ij}, \beta_{ji}, \alpha_{ij} \in \{0, 1\} \\ \beta_{ij} + \beta_{ji} = \alpha_{ij}, & ij \in E_F \\ \sum_{i \in \Omega_s, j \in \Omega_i} \beta_{ij} = 1, & \sum_{i \in \Omega_s, j \in \Omega_i} \beta_{ij} = 0 \end{cases} \quad (16)$$

式中: β_{ij} 和 β_{ji} 是与馈线 ij 开关相关联的二进制变量, $\beta_{ij}=1$ 表示节点 j 是节点 i 的父节点, $\beta_{ji}=1$ 表示节点 i 是节点 j 的父节点; Ω_s 为源节点的集合; Ω_i 为除 Ω_s 内部节点以外的其他节点集合; Ω_i 为与节点 i 相连的节点的集合。

针对大量接入分布式光伏的配电网,为降低重构计算难度,本文在生成树约束的基础上引入一种虚拟潮流约束^[40]:

$$\begin{cases} \sum_{i \in \pi(j)} F_{ij} + D_j = \sum_{k \in \sigma(j)} F_{jk}, & \forall j \in N_F \\ |F_{ij}| \leq \alpha_{ij} M \end{cases} \quad (17)$$

式中: F_{ij} 表示支路 ij 传输的虚拟潮流; D_j 表示节点 j 的虚拟负荷需求。

1.4 正常配电网供电恢复模型

正常配电网 n 目标函数 $f_{DN,n}$ 为光伏有功损失成本与网络损耗成本之和最小。

$$f_{DN,n} = \min \left(c_P \sum_{\forall ij \in E_N} \frac{P_{ij}^2 + Q_{ij}^2}{v_b} R_{ij} \Delta t + c_G \sum_{\forall j \in N_{DG}} P_{j,dec}^{PV} \Delta t \right) \quad (18)$$

式中: E_N 为正常配电网中馈线开关的集合。

正常配电网的运行约束包括电压约束式(11)、电网安全运行约束式(12)~(14)、分布式光伏运行约束式(15)、网络拓扑辐射状约束式(16)~(17)和潮流约束式(19)。

$$\begin{cases} \sum_{i \in \pi(j)} P_{ij} - P_j = \sum_{k \in \sigma(j)} P_{jk}, & j \in N_N \\ \sum_{i \in \pi(j)} Q_{ij} - Q_j = \sum_{k \in \sigma(j)} Q_{jk} \\ v_j = v_i - 2(R_{ij} P_{ij} + X_{ij} Q_{ij}) \\ P_{n,0} = P_n^D \end{cases} \quad (19)$$

式中: N_N 表示正常配电网中的节点集合; $P_{n,0}$ 表示正常配电网 n 根节点的注入有功功率; P_n^D 表示正常配电网 n 通过输配传输线路吸收的有功功率。

1.5 输配电网间边界耦合约束

1) 输电网与正常配电网的边界约束。

$$P_n^{TD} - P_n^D = 0 \quad (20)$$

式中: P_n^{TD} 表示通过输配电网传输线路输电网侧供给的有功功率。

2) 失电与正常配电网边界等式约束。

$$\begin{cases} v_{l,n} - v_{l,f} = 0 \\ P_{l,n} - P_{l,f} = 0 \\ Q_{l,n} - Q_{l,f} = 0 \end{cases} \quad (21)$$

式中: $v_{l,n}$ 表示配电网 n 边界节点电压的平方值; $v_{l,f}$ 表示故障配电网边界节点电压的平方值; $P_{l,n}$ 与 $Q_{l,n}$ 分别表示正常配电网 n 通过联络线 l 向故障配电网注入的有功功率与无功功率; $P_{l,f}$ 与 $Q_{l,f}$ 分别表示故障配电网通过联络线 l 从正常配电网 n 吸收的有功功率与无功功率。

2 输配边界安全域精确刻画方法

输配电网边界有功功率的安全域 R_{TD} 从几何角度来说, 是高维多面体 r_{full} 在 P^{TD} 变量子空间上的正交投影, P^{TD} 表示输配边界传输功率矩阵。为了从包含内部状态变量的全维多面体 r_{full} 中提取仅关于 P^{TD} 安全域的解析表达式, 本文提出了一种基于伞约束辨识预处理的改进 FME 投影算法。

2.1 输电网伞约束辨识与全维多面体模型

为统一描述输电网系统物理约束, 定义以下广义状态变量向量:

$$\boldsymbol{\omega} = [\boldsymbol{y}, \boldsymbol{z}] \quad (22)$$

式中: $\boldsymbol{\omega}$ 表示输电网内部所有变量; $\boldsymbol{z}$ 表示边界变量 P^{TD} ; $\boldsymbol{y}$ 表示其他优化变量。从物理本质来看, 内部变量 $\boldsymbol{y}$ 表征系统内部的运行状态与调节空间, 而边界变量 $\boldsymbol{z}$ 则是输电网向配电网提供功率支撑的物理接口。将全维变量多面体向 P^{TD} 空间进行投影降维的物理本质是, 在穷尽所有满足输电网内部安全运行的状态组合后, 求解出边界交互功率所能达到的安全极限边界。这一过程将复杂的全网内部安全校验转化为直观的边界安全域, 明确刻画输电网能够为配电网提供的功率支撑能力。

输电网中不等式约束条件可以简化为式(23):

$$\boldsymbol{A}\boldsymbol{\omega} \leq \boldsymbol{b} \quad (23)$$

式中: $\boldsymbol{A}$ 与 $\boldsymbol{b}$ 分别表示约束的系数矩阵和常数矩阵。

输电网的安全运行约束在数学上可描述为高维空间中的凸多面体, 然而其中大多数约束是松弛无

效的。为避免全集投影带来的冗余计算, 本文引入了一种基于空间欧氏距离的伞约束辨识方法。该方法的核心在于通过求解相应的优化问题来判断某一约束超平面是否构成有效约束的边界。伞约束辨识优化模型如下:

$$\begin{cases} \min \sum_{j \in \boldsymbol{\vartheta}} r_j^U \\ \boldsymbol{\omega}, r_j^U \geq 0 \\ \text{s.t.} \\ A_i \boldsymbol{\omega}_j \leq b_j, i \in \boldsymbol{\vartheta}; i \neq j \\ A_j \boldsymbol{\omega}_j + r_j^U \geq b_j \end{cases} \quad (24)$$

式中: r_j^U 是一个松弛变量, 表示约束 j 到有效约束边界的最短空间欧氏距离; $\boldsymbol{\vartheta}$ 表示全约束集。

当 $r_j^U = 0$ 时, 存在解使得 $A_i \boldsymbol{\omega}_j = b_j$ 且同时满足其他约束条件, 说明约束 j 为需要保留的关键伞约束。而当 $r_j^U \neq 0$ 时, 说明此时验证的约束为冗余约束, 在全域刻画前需剔除。

优化后保留的不等式伞约束表示为:

$$\boldsymbol{A}_u \boldsymbol{\omega} \leq \boldsymbol{b}_u \quad (25)$$

式中: $\boldsymbol{A}_u$ 与 $\boldsymbol{b}_u$ 分别表示伞约束的系数矩阵和常数矩阵。

将式(3)中的输电网功率平衡等式约束简化表达为下述矩阵形式:

$$\boldsymbol{B}\boldsymbol{\theta} = \boldsymbol{C}_G \boldsymbol{P}^G - \boldsymbol{P}^T - \boldsymbol{C}_{TD} \boldsymbol{P}^{TD} \quad (26)$$

式中: $\boldsymbol{B}$ 表示输电网节点电纳矩阵; $\boldsymbol{\theta}$ 表示母线相角矩阵; $\boldsymbol{C}_G$ 为发电机-节点关联矩阵, 若发电机 k 位于节点 i , 则对应位置元素取值为 1, 否则为 0; $\boldsymbol{P}^G$ 表示发电机组输出有功功率矩阵; $\boldsymbol{P}^T$ 表示输电网节点负荷矩阵; $\boldsymbol{C}_{TD}$ 为输配接口-节点关联矩阵。

将式(26)移项整理为齐次方程组 $\boldsymbol{A}_{eq} \boldsymbol{\omega} = \boldsymbol{b}_{eq}$, 并进一步松弛为一对不等式组:

$$\begin{cases} \boldsymbol{A}_{eq} \boldsymbol{\omega} \leq \boldsymbol{b}_{eq} \\ -\boldsymbol{A}_{eq} \boldsymbol{\omega} \leq -\boldsymbol{b}_{eq} \end{cases} \quad (27)$$

式中: $\boldsymbol{A}_{eq}$ 为齐次方程组一次项系数; $\boldsymbol{b}_{eq}$ 为常数项。

聚合式(25)和式(27)中的所有约束, 可以得到描述输电网全系统安全运行状态的全维多面体:

$$r_{full} = \{\boldsymbol{\omega} \in \mathbb{R}^n \mid \boldsymbol{H}\boldsymbol{\omega} \leq \boldsymbol{\kappa}\} \quad (28)$$

式中: $\boldsymbol{H}$ 与 $\boldsymbol{\kappa}$ 分别表示全维多面体约束的系数矩阵和常数矩阵。

2.2 输配边界变量安全域刻画

在式(28)的基础上, 全维多面体 r_{full} 可重写为以下分块矩阵形式:

$$\boldsymbol{H}_y \boldsymbol{y} + \boldsymbol{H}_z \boldsymbol{z} \leq \boldsymbol{\kappa} \quad (29)$$

式中: $\boldsymbol{y}$ 是前文定义的内部优化变量, 也是需要消去的优化变量; $\boldsymbol{H}_y$ 与 $\boldsymbol{H}_z$ 分别表示约束矩阵中内部变量与边界变量的系数子矩阵。

安全域 R_{TD} 构建的目标是寻找 r_{full} 在 z 空间上的正交投影,表达式如下:

$$R_{TD} = \text{Proj}_z(r_{full}) = \{z \mid y, H, y \leq \kappa - H_z z\} \quad (30)$$

依据傅里叶-莫茨金消元理论,对于任意待消去的内部变量 y_i ,可将系统中的所有约束划分为3个集合:

$$1) \text{下界集 } S_L = \{(z, y_{-i}) \mid y_i \geq \mathcal{L}_i(z, y_{-i})\};$$

$$2) \text{上界集 } S_U = \{(z, y_{-i}) \mid y_i \leq \mathcal{U}_i(z, y_{-i})\};$$

$$3) \text{无关集 } S_0: \text{不包含 } y_i \text{ 的约束。}$$

其中, y_i 表示当前正在消去的一个变量; y_{-i} 表示其余还未消去的变量; $\mathcal{L}_i(z, y_{-i})$ 为 y_i 的下边界; $\mathcal{U}_i(z, y_{-i})$ 为 y_i 的上边界。

根据不等式的传递性,存在 y_i 满足上述约束的充要条件为所有下界均不大于所有上界。因此,消去 y_i 的过程等价于生成一组新的线性不等式约束:

$$\mathcal{L}_j(z, y_i) \leq \mathcal{U}_k(z, y_i), \quad \forall j \in S_L, \forall k \in S_U \quad (31)$$

通过对 y 中的元素逐一执行上述计算,即可完全剔除内部状态变量,最终得到仅保留关于边界变量 z 的线性不等式组,即安全域的解析表达式:

$$A_{\text{proj}} z \leq b_{\text{proj}} \quad (32)$$

式中: A_{proj} 与 b_{proj} 分别表示投影后约束的系数矩阵与常数矩阵。

2.3 基于隐式优化的冗余约束剔除策略

针对FME算法消元过程中可能产生并累积冗余约束的问题,本节引入了基于隐式线性规划的动态冗余剔除机制。该机制采用“生成即剪枝”的策略,在每轮变量消去后,立即对新增的候选约束集进行判别,并剔除不构成几何边界的冗余项。对于 $A_{\text{proj}} z \leq b_{\text{proj}}$ 中的任一待测约束 $a_i z \leq b_i$, 构建并求解如下优化问题:

$$\begin{cases} J^* = \max_z a_i z \\ \text{s.t. } a_j z \leq b_j, \quad \forall j \neq i, j \in \mathcal{V}' \end{cases} \quad (33)$$

式中: a_j 与 b_j 分别表示由式(28)生成的第 j 条候选约束的系数矩阵与常数向量; $\mathcal{V}'$ 表示新生成的候选约束集; J^* 为优化问题的最大值,表示在不考虑待测约束 i 时,其余约束集在 a_i 方向上能达到的几何极值。

基于 J^* 的值判别冗余约束,判别准则如下:

1) 若最优解 $J^* \leq b_i$, 表明即使没有待测约束,其余约束条件已经可以在 a_i 的方向上封闭可行空间。因此,约束 $a_i z \leq b_i$ 未对安全域边界产生实质性切割,属于冗余约束,应剔除。

2) 若最优解 $J^* > b_i$, 表明若缺失待测约束, z 在 a_i 方向的优化结果将超越 b_i , 即不再满足 $a_i z \leq b_i$ 。这说明

删除该约束会切割可行空间,应保留。

通过这种生成-剪枝-再生成-再剪枝的动态策略,约束数量在FME消元的过程中始终保持较低规模,可实现输电网安全域的高效求解。输配边界变量安全域刻画流程如图1所示。

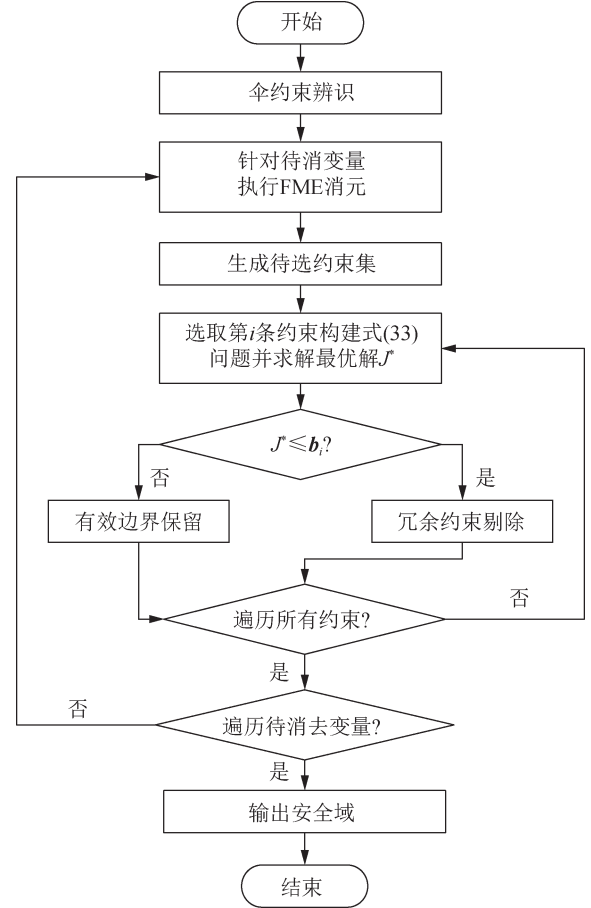


图1 输配边界变量安全域刻画流程

Fig. 1 Flowchart for depicting the security region of transmission and distribution boundary variables

3 输配电网分布式供电恢复方法

为有效处理互联配电网供电恢复问题中的输配边界安全域约束,本章提出了一种计及输电网边界安全域投影的分布式供电恢复策略。

首先对正常配电网 n 与故障配电网互联联络线的边界变量 $B_{l,n}$ 、正常配电网 n 与输电网边界交互变量 z_n^D 、配电网间边界全局辅助变量 z_l^{tie} 与输电网边界全局变量 z_p 进行定义,如下所示:

$$\begin{cases} B_{l,n} = [P_{l,n}, Q_{l,n}, v_{l,n}]^T \\ z_n^D = P_n^D \end{cases} \quad (34)$$

$$\begin{cases} z_l^{\text{tie}} = [z_{p,l}, z_{Q,l}, z_{v,l}]^T \\ z_p = [z_{p,1}, \dots, z_{p,n}]^T \end{cases} \quad (35)$$

式中: $z_{p,l}$ 、 $z_{Q,l}$ 、 $z_{v,l}$ 分别为边界有功功率、无功功率与节点电压的全局辅助变量; $z_{p,n}$ 为输电网与配电网 n 边界有功功率的全局辅助变量。

为保证 ADMM 收敛性, 引入辅助变量 w_n 对内部离散变量 e_n 进行线性化松弛, 两变量满足式(36):

$$\begin{cases} e_n - w_n = 0 \\ 0 \leq w_n \leq 1 \end{cases} \quad (36)$$

基于上述变量定义, 可构造正常配电网 n 的增广拉格朗日函数, 表达式如下:

$$L_n = f_{DN,n}(x_n, e_n) + \frac{\rho_1}{2} \|B_{l,n} - M_{ij} z_l^{\text{tie}} + \lambda_{l,n}^{\text{tie}}\|_2^2 + \frac{\rho_2}{2} \|z_n^D - z_{p,n} + \lambda_n^p\|_2^2 + \frac{\rho_3}{2} \|w_n - e_c + \lambda_n^{\text{bin}}\|_2^2 \quad (37)$$

式中: $\lambda_{l,n}^{\text{tie}} = [\lambda_{p,l}, \lambda_{Q,l}, \lambda_{v,l}]^T$ 表示配电网间边界等式约束的拉格朗日乘子, 其中 $\lambda_{p,l}$ 、 $\lambda_{Q,l}$ 与 $\lambda_{v,l}$ 分别表示有功功率、无功功率和电压约束对应的乘子; λ_n^p 表示输配边界安全域约束对应的乘子; λ_n^{bin} 表示离散变量对应的乘子; ρ_1 、 ρ_2 与 ρ_3 均为惩罚系数; M_{ij} 表示用于定义功率方向的映射矩阵; e_c 表示配电网 n 内部离散变量 e_n 的全局辅助变量。

基于改进 ADMM 和输电网边界安全域的互联配电网分布式供电恢复方法包含 2 个阶段, 具体计算步骤如下:

1) 松弛阶段。

(1) 初始化迭代次数 $k=1$, 为全局辅助变量 $z_l^{\text{tie},(1)}$ 、 $z_p^{(1)}$ 与 $e_c^{(1)}$ 赋合理初值, 并为乘子 $\lambda_{l,n}^{\text{tie},(1)}$ 、 $\lambda_n^{\text{bin},(1)}$ 与 $\lambda_n^{p,(1)}$ 赋任意初值。

(2) 依据式(38), 求解正常配电网 n 松弛优化模型的增广拉格朗日函数, 更新 x_n 与 w_n 的值。

$$\begin{aligned} (x_n, w_n)^{(k+1)} = \\ \arg \min L_n(x_n^{(k)}, w_n^{(k)}, B_{l,n}^{(k)}, z_n^{D,(k)}, z_p^{(k)}, z_c^{(k)}, z_l^{\text{tie},(k)}) \end{aligned} \quad (38)$$

(3) 正常配电网 n 与相连的故障配电网交互优化变量, 进而更新全局辅助变量。

$$\begin{cases} z_l^{\text{tie},(k+1)} = \frac{1}{2} (B_{l,n}^{(k+1)} + B_{l,f}^{(k+1)}) \\ e_c^{(k)} = [w_n^{(k)} + \ell^{(k)} \Pi_\ell(w_n^{(k)})] / (1 + \ell^{(k)}) \end{cases} \quad (39)$$

式中: $\ell^{(k)}$ 表示整型参数, 此阶段其值为 0; $\Pi_\ell(w_n^{(k)})$ 表示 $w_n^{(k)}$ 四舍五入的投影值。

(4) 依据式(40)和(41)更新输配边界全局辅助变量 z_p 。输配边界的安全域约束 $A_{\text{proj}} z \leq b_{\text{proj}}$ 同时耦合了多个输配边界功率, 为确保输配边界功率始终处于输电网的安全域内, 本文采用欧几里得投影策略对边界变量进行修正, 先基于各正常配电网的边界变量 $z_n^{D,(k+1)}$ 计算中间聚合变量 $\hat{z}^{(k+1)}$, 再通过投影更新

全局辅助变量 $z_p^{(k+1)}$ 。

$$\hat{z}^{(k+1)} = \frac{1}{n_{\text{DN}}} \sum_{n=1}^{n_{\text{DN}}} \left(z_n^{D,(k+1)} + \frac{1}{\rho_2} \lambda_n^{p,(k)} \right) \quad (40)$$

$$z_p^{(k+1)} = \arg \min \frac{1}{2} \|z - \hat{z}^{(k+1)}\|_2^2, \quad A_{\text{proj}} z \leq b_{\text{proj}} \quad (41)$$

(5) 更新拉格朗日乘子。

$$\begin{cases} \lambda_{l,n}^{\text{tie},(k+1)} = \lambda_{l,n}^{\text{tie},(k)} + \rho_1 (B_{l,n}^{(k+1)} - M_{ij} z_l^{\text{tie},(k+1)}) \\ \lambda_n^{\text{bin},(k+1)} = \lambda_n^{\text{bin},(k)} + \rho_3 (w_n^{(k+1)} - e_c^{(k+1)}) \\ \lambda_n^{p,(k+1)} = \lambda_n^{p,(k)} + \rho_2 (z_n^{D,(k+1)} - z_{p,n}^{(k+1)}) \end{cases} \quad (42)$$

(6) 重复步骤(2)~(5)直至优化问题的原始残差与对偶残差小于阈值 ε_r , 则松弛阶段收敛, 输出离散变量的松弛解并进入下一阶段。原始残差与对偶残差的计算公式如下:

$$\begin{cases} r_p^{(k)} = \|w_n^{(k)} - e_c^{(k)}\|_2 + \|z^{(k)} - z_p^{(k)}\|_2 + \|B_{l,n}^{(k)} - M_{ij} z_l^{\text{tie},(k)}\|_2 \\ r_d^{(k)} = \|e_c^{(k+1)} - e_c^{(k)}\|_2 + \|z_p^{(k+1)} - z_p^{(k)}\|_2 + \|z_l^{\text{tie},(k+1)} - z_l^{\text{tie},(k)}\|_2 \end{cases} \quad (43)$$

2) 整型阶段。

(1) 依据松弛阶段的计算结果为迭代次数 k 、辅助变量和乘子赋初值, 并令 $\ell^{(k)} = 0$ 。

(2) 依据式(38)更新 $(x_n, w_n)^{(k+1)}$ 的值, 互联配电网交互变量 $B_{l,n}$ 、 $B_{l,f}$ 、 w_n 与 z_n^D 的值, 并根据式(39)~(42)分别更新全局辅助变量和乘子。

(3) 依据全局辅助变量更新值计算原始残差和对偶残差。若两残差数值均小于预设阈值 ε_d , 输出最优供电恢复方案, 否则重新计算 ℓ 的值并返回步骤(2)。

$$\ell^{(k+1)} = \ell^{(k)} + \mu (1/r_p^{(k)} + 1/r_d^{(k)}) \quad (44)$$

式中: μ 表示 $\ell^{(k)}$ 的更新步长; $r_p^{(k)}$ 、 $r_d^{(k)}$ 分别为第 k 次迭代的原始残差和对偶残差。

互联配电网求得最优供电恢复方案后, 将各自所需的根节点功率信息传输给输电网, 输电网再基于其模型(式(2)~(7))进行优化计算, 得到最优的机组组合出力方案。

4 算例分析

本文基于改进的 T6-3D33 输配系统验证所提方法的可行性与有效性, 系统拓扑结构如图 2 所示。其中输电网侧采用 IEEE 6 节点模型, 配电网侧由 3 个通过联络开关 TS1 和 TS2 互联的 IEEE 33 节点系统构成。正常运行状态下, 网间联络开关处于断开状态。所有仿真均在 MATLAB R2022b 平台利用 YALMIP 工具包调用 CPLEX 12. 6. 3 求解器完成。

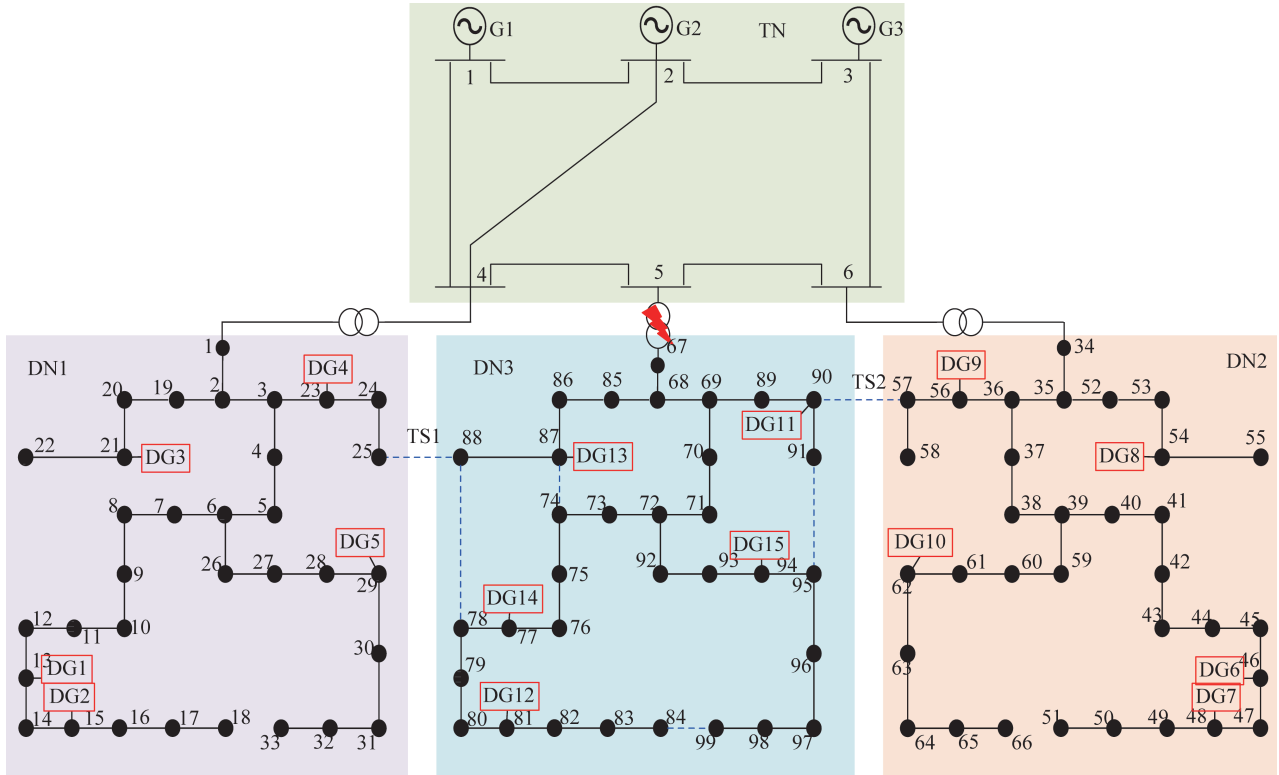


图 2 输配电网系统拓扑图

Fig. 2 Topology diagram of transmission and distribution networks system

IEEE 33 节点配电网的线路阻抗与负荷参数参见文献[41]。系统安全运行电压范围设定为 $[0.95, 1.05]$ p. u., Δt 设为 1 h。关于经济性参数,电价 c_p 设定为 0.4 元/kWh,光伏削减成本 c_c 设定为 0.7 元/kWh,负荷停电损失成本 c_L 设定为 1 元/kWh。输电网模型参数可见 MATPOWER 7.0 标准算例库,各发电机组具体发电成本系数见表 1。

表 1 IEEE 6 节点系统发电机组发电成本

Table 1 Generation cost of generating units in the IEEE 6-bus system

发电成本/(元/kWh)	发电机所在母线
0.23	1
0.34	2
0.27	3

4.1 输电网边界安全域刻画结果

为验证本文所提安全域刻画算法的性能,将其与 FME 算法进行对比分析。图 3 展示了两种算法生成的输配边界功率安全域对比结果,其中图 3(a)与图 3(b)分别对应本文所提算法与 FME 算法的刻画结果。对比分析可知,本文所提算法提取的安全域几何轮廓与 FME 算法完全重合,从几何拓扑角度验证了所提算法的精确性。这表明本文引入的伞约束辨识与动态剪枝机制在显著降低约束规模的同时,并未对精度造成任何损失。

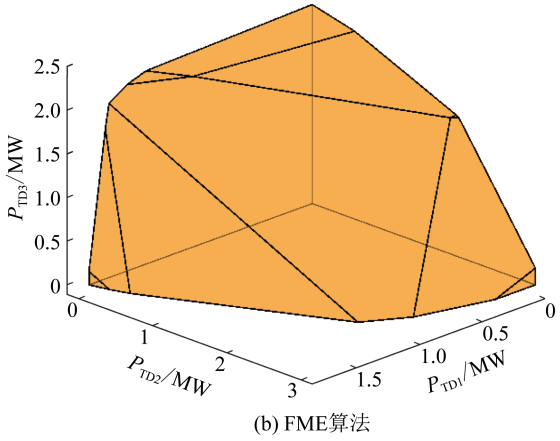
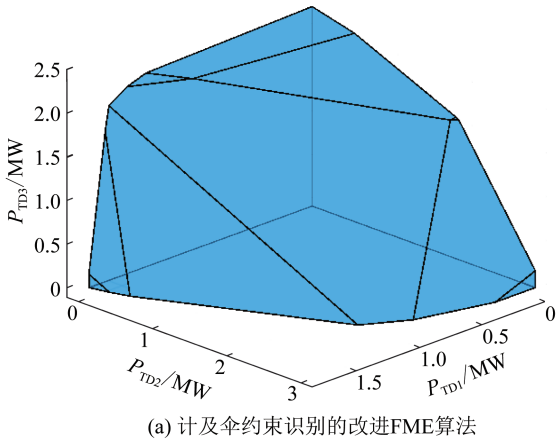


图 3 本文所提算法与 FME 算法安全域对比图

Fig. 3 Comparison diagram of security regions between algorithm proposed in this paper and FME algorithm

表 2 对本文所提算法与 FME 算法的计算性能进行了详细对比。结果表明,本文所提算法得益于伞约束辨识技术,在安全域刻画前即可有效识别并剔除原始约束集中的大量冗余约束,最终仅需依据 15 条核心边界约束即可完成刻画,相比传统 FME 算法的 46 条约束显著降低了计算维度。这证明伞约束辨识能够显著精简初始搜索空间,避免冗余约束引起的无效计算。此外,在保持刻画精度的前提下,凭借“生成-剪枝-再生成-再剪枝”的动态策略,本文所提算法的计算效率明显优于 FME 算法。在节点规模更大的电力系统中,本文算法在提升求解速度方面的优势将更为显著。

表 2 本文所提算法与 FME 算法性能对比
Table 2 Performance comparison between the algorithm proposed in this paper and the FME algorithm

方法	待刻画约束/ 条	安全域等值 约束/条	刻画时间/s
本文所提算法	15	13	0.734
FME	46	13	2.532

4.2 输配协同供电恢复结果

在 ADMM 算法的离散变量整型阶段中,对偶残差与原始残差的收敛阈值 ε_d 设定为 3×10^{-3} 。考虑到松弛阶段的主要功能是后续整形阶段提供启动初值,可以通过适度放宽其收敛判据以加速迭代过程,因此,将松弛阶段的阈值 ε_r 设定为 1.5×10^{-2} 。在 ADMM 算法分布式供电恢复计算过程中,对偶残差 r_d 与原始残差 r_p 随迭代次数的变化曲线如图 4 所示。

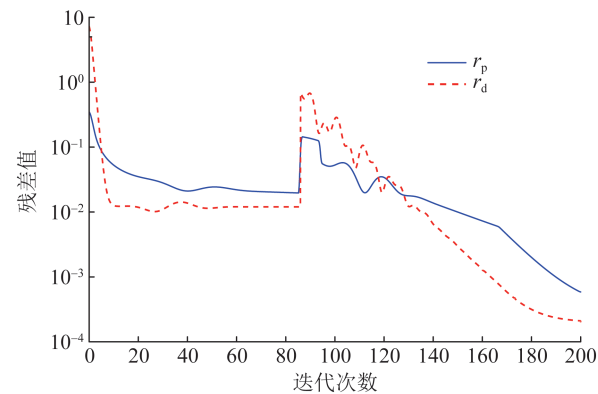


图 4 对偶残差和原始残差变化曲线图

Fig. 4 Evolution curves of primal residual and dual residual

在第 86 次迭代计算后, r_d 与 r_p 均已降至设定的精度要求,松弛阶段收敛。在第 174 次迭代计算后,满足 ε_d 的收敛条件,此时整型阶段收敛,输出配电网最优供电恢复结果。结果表明所提算法在解决供电恢复问题时具有良好的收敛特性。

分布式算法迭代收敛后,失电配电网 3 的内部供电恢复重构拓扑如图 5 所示。为实现目标函数最优,失电配电网通过以下开关操作实现重构:断开内部馈线 70-71、77-78、83-84 与 93-94,并闭合内部联络线 74-87、78-88、84-99 与 91-95。经上述调整,网络被划分为 2 个独立的子区域,分别通过联络线由正常运行的配电网 1 和配电网 2 供电,实现了全网负荷供电 100% 恢复。

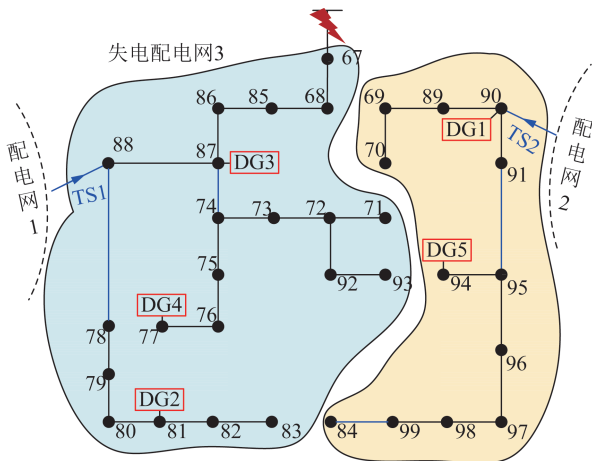


图 5 失电配电网 3 内部供电恢复拓扑

Fig. 5 Topology diagram of internal power restoration for de-energized distribution network 3

图 6 进一步展示了互联配电网的节点电压分布情况。在本文所提分布式供电恢复方法下,全网节点电压的峰值与谷值分别为 1.035 p. u. 和 0.978 p. u., 全网节点电压均严格处于安全运行约束范围内,未出现电压越限现象。这验证了本文所提策略在保障供电可靠性的同时,能够有效兼顾系统的电压安全性。

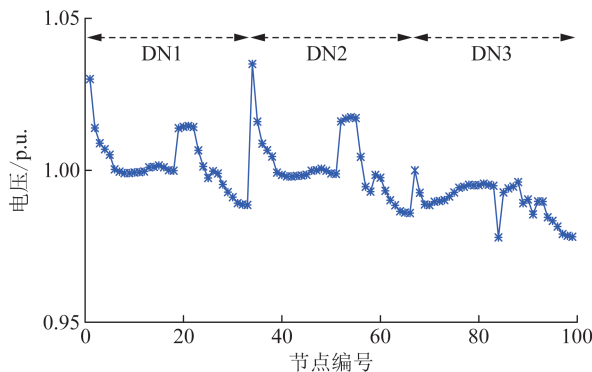


图 6 互联配电网节点电压分布图

Fig. 6 Node voltage profile of the interconnected distribution network

为了进一步验证所提算法的准确性,本文将所提分布式策略与集中式优化结果进行对比,详细对比数据如表 3 所示。对比结果显示,本文所提分布式优化

方法的负荷恢复率、光伏削减量与集中式优化方法下的结果完全一致。在发电成本和配电网网损成本方面略微存在差距,分布式优化与集中式优化所得的机组发电成本相差 6.47 元,配电网总体优化成本相差 1.3 元,总成本仅相差 5.17 元,偏差率约为 0.01%。

表 3 不同优化方法下目标函数对比
Table 3 Comparison of objective functions under different optimization methods 元

方法	负荷失电损失	配电网网损成本	光伏发电损失	输电网运行成本	总目标函数值
分布式优化	0	124.6	0	53 089.11	53 213.71
集中式优化	0	125.9	0	53 082.64	53 208.54

产生偏差的原因是集中式优化基于输配统一模型,优化结果为全局最优解。而本文所提分布式算法中,配电网侧模型主要关注自身优化目标与输电网安全约束,未直接考虑输电网运行目标,因而所得结果为满足双方安全约束的优质局部解。若在分布式优化中引入完整的输电网模型以追求全局最优,将显著增加迭代时间与通信负担,降低求解效率。因此,本文所提分布式恢复策略在计算效率与解的质量之间达到了平衡。

5 结 论

针对配电网发生大范围停电后的供电恢复问题,本文提出了一种基于边界安全域刻画的输配电网协同分布式供电恢复方法。首先基于结合伞约束辨识预处理的改进 FME 投影算法刻画输配边界交互功率的输电网安全域模型。然后,构建基于 ADMM 算法和边界安全域模型的互联配电网分布式供电恢复方法,实现输配电网协同优化模型的分布式求解。最后,以主变压器故障导致的极端失电场景为例,通过仿真算例验证得到以下结论:

- 1) 所提结合伞约束辨识预处理的改进 FME 投影算法在保证刻画精度的同时,显著降低了安全域刻画的计算复杂度,有效提升了计算效率。
- 2) 所提出的输配电网协同分布式供电恢复策略可求得接近全局最优的恢复方案,相较于集中式优化方法总成本仅偏差 0.01%,实现了失电区域的最大化负荷供电恢复。

利益冲突声明 (Conflict of Interests):

所有作者声明不存在利益冲突。

作者贡献声明 (Authors' Contributions):

柴园园提出研究方向并构建研究框架,张昱泽

负责主要程序编写并撰写论文,陈海文负责论文内容润色修改,李青松参与算例分析验证,马泽超负责文献调研、论文最终版本修订。所有作者均阅读并同意了论文终稿内容。

6 参考文献

[1] 尹积军,夏清. 能源互联网形态下多元融合高弹性电网的概念设计与探索[J]. 中国电机工程学报, 2021, 41(2): 486-497.
Yin Jijun, Xia Qing. Conceptual design and exploration of multi-factor integrated high-elastic power grid in energy internet [J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(2): 486-496.

[2] Alobaidi A H, Fazlhashemi S S, Khodayar M, et al. Distribution service restoration with renewable energy sources: a review [J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2023, 14(2): 1151-1168.

[3] 郑艳,王涛,韦晓广. 考虑交通网的配电网极端灾后多故障抢修策略优化方法[J]. 电力建设, 2026, 47(1): 194-206.
Zheng Yan, Wang Tao, Wei Xiaoguang. Coordinated optimization of multi-fault repair strategies in distribution networks considering transportation disruptions post extreme disasters [J]. Electric Power Construction, 2026, 47(1): 194-206.

[4] 陈冰冰,刘家腾,吴浩天,等. 基于供电能力动态提升的配电网故障抢修与恢复协调优化[J]. 山东电力技术, 2025, 52(8): 25-35, 44.
Chen Bingbing, Liu Jiateng, Wu Haotian, et al. Optimization of distribution network fault repair and restoration coordination under dynamic improvement of power supply capacity [J]. Shandong Electric Power, 2025, 52(8): 25-35, 44.

[5] 冯德金,赵毅,钱小毅,等. 考虑灵活性资源调节能力的供电恢复策略[J]. 电力科学与技术学报, 2025, 40(3): 85-95.
Feng Dejin, Zhao Yi, Qian Xiaoyi, et al. Power supply restoration strategy considering regulation capability of flexible resources [J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2025, 40(3): 85-95.

[6] 海迪,张瑞颖,成江东,等. 基于改进 ADMM 的配电网分布式供电恢复方法[J]. 电测与仪表, 2025, 62(10): 183-191.
Hai Di, Zhang Ruiying, Cheng Jiangdong, et al. Distributed power supply restoration method for distribution network based on improved ADMM [J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2025, 62(10): 183-191.

[7] 陈曦,柴润德,闫申,等. 光储网分层协同的交直流混合配电网自愈方法[J/OL]. 电力系统及其自动化学报, 2025-11-11. <https://doi.org/10.19635/j.cnki.csu-epsa.001741>.
Chen Xi, Chai Runde, Yan Shen, et al. Self-healing method for AC/DC hybrid distribution networks based on hierarchical collaboration of photovoltaic, energy storage and distribution network [J/OL]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2025-11-11. <https://doi.org/10.19635/j.cnki.csu-epsa.001741>.

[8] 汪顺其,丁涛,丁玉杰,等. 考虑快速可拆卸变压器的变电站-配电网协同故障恢复方法[J]. 电力自动化设备, 2025, 45(10): 100-109.
Wang Shunqi, Ding Tao, Ding Yujie, et al. Substation-distribution

- network cooperative fault recovery method considering quickly-detachable transformer[J]. Electric Power Automation Equipment, 2025, 45(10): 100-109.
- [9] 彭寒梅, 张玲, 谭貌, 等. 重构与抢修协同下电-气区域综合能源系统多阶段博弈故障恢复方法[J]. 电力建设, 2024, 45(12): 27-38.
- Peng Hanmei, Zhang Ling, Tan Mao, et al. Multi-stage game fault recovery method for electricity-gas regional integrated energy system under reconfiguration and repair coordination[J]. Electric Power Construction, 2024, 45(12): 27-38.
- [10] 周鹏, 荆江平, 郝威, 等. 考虑多种调度修复策略协同优化的有源配电网韧性提升[J]. 高压电器, 2025, 61(5): 311-321.
- Zhou Peng, Jing Jiangping, Hao Wei, et al. Resilience enhancement of active distribution networks considering collaborative optimization of multiple dispatch and recovery strategies[J]. High Voltage Apparatus, 2025, 61(5): 311-321.
- [11] 侯祖锋, 丘冠新, 曹安琪, 等. 考虑光伏出力时变性的配电网短时供电恢复策略[J]. 电测与仪表, 2024, 61(8): 90-96.
- Hou Zufeng, Qiu Guanxin, Cao Anying, et al. Short-term power supply restoration strategy for distribution network considering time variation of photovoltaic output[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2024, 61(8): 90-96.
- [12] 张建军, 廉杰, 卢泽钰, 等. 网络重构和多设备协同驱动的新能源配电台区两阶段优化模型[J]. 电力系统及其自动化学报, 2026, 38(6): 79-88.
- Zhang Jianjun, Lian Jie, Lu Zeyu, et al. Two-stage optimization model for renewable energy distribution transformer substation based on network reconfiguration and multi-device coordinated driving[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2026, 38(6): 79-88.
- [13] Wang X D, Lin J K. Island partition of the distribution system with distributed generation[J]. Science China Technological Sciences, 2010, 53(11): 3061-3071.
- [14] 汤一达, 吴志, 顾伟, 等. 主动配电网故障恢复的重构与孤岛划分统一模型[J]. 电网技术, 2020, 44(7): 2731-2737.
- Tang Yida, Wu Zhi, Gu Wei, et al. Research on active distribution network fault recovery strategy based on unified model considering reconstruction and island partition[J]. Power System Technology, 2020, 44(7): 2731-2737.
- [15] 楼冠男, 顾远哲, 顾伟. 基于柔性软开关和联络开关协同的配电网分布式故障恢复方法[J]. 电力系统自动化, 2025, 49(24): 30-40.
- Lou Guannan, Gu Yuanzhe, Gu Wei. Distributed restoration method for distribution network based on synergy of soft open point and tie switch[J]. Automation of Electric Power Systems, 2025, 49(24): 30-40.
- [16] 张锐, 徐广钧, 刘恒超, 等. 基于供电可靠性显式计算的低压配电台区柔性互联装置规划[J]. 高电压技术, 2026, 52(4): 1913-1922.
- Zhang Rui, Xu Guangjun, Liu Hengchao, et al. Flexible interconnection device planning of low-voltage distribution station areas based on explicit calculation of power supply reliability[J]. High Voltage Engineering, 2026, 52(4): 1913-1922.
- [17] 郑涛, 沈文韬, 陈冉, 等. 基于柔性互联装备主动控制的配电网故障定位方法[J]. 电力自动化设备, 2024, 44(12): 35-41.
- Zheng Tao, Shen Wentao, Chen Ran, et al. Fault location method for distribution network based on active control of flexible interconnected equipment[J]. Electric Power Automation Equipment, 2024, 44(12): 35-41.
- [18] 夏周武, 马文祚, 杨德昌. 考虑三端智能软开关与孤岛划分结合的主动配电网故障恢复研究[J]. 电力科学与技术学报, 2024, 39(2): 124-133.
- Xia Zhouwu, Ma Wenzuo, Yang Dechang. Fault recovery strategy of active distribution network considering the coordination between islanding partition and three-terminal intelligent soft open point[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2024, 39(2): 124-133.
- [19] 胡益菲, 钱峰, 李海龙, 等. 基于储能型柔性互联装置的配电网孤岛恢复方法[J]. 供用电, 2024, 41(2): 21-27.
- Hu Yifei, Qian Feng, Li Hailong, et al. Island fault recovery method of distribution network based on flexible interconnection device with energy storage[J]. Distribution & Utilization, 2024, 41(2): 21-27.
- [20] 马静, 马伟, 王增平. 基于联络关系的主变故障负荷转供方案[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(19): 1-7.
- Ma Jing, Ma Wei, Wang Zengping. Power restoration scheme for main transformer fault based on the interconnection relationship[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(19): 1-7.
- [21] Yang X D, Xu C B, Wen J Y, et al. Cooperative repair scheduling and service restoration for distribution systems with soft open points[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2023, 14(3): 1827-1842.
- [22] 徐展鹏, 梁远升, 李海峰, 等. 柔性互联配电网故障恢复的云边协同优化算法[J]. 电力系统自动化, 2023, 47(18): 171-184.
- Xu Zhanpeng, Liang Yuansheng, Li Haifeng, et al. Cloud-edge collaborative optimization algorithm for fault restoration of flexible interconnected distribution network[J]. Automation of Electric Power Systems, 2023, 47(18): 171-184.
- [23] 陈艳波, 强涂奔, 田昊欣, 等. 考虑集中式与分布式新能源不确定性的输配协同负荷恢复方法[J]. 电工技术学报, 2026, 41(7): 2281-2299.
- Chen Yanbo, Qiang Tuben, Tian Haoxin, et al. Coordinated load restoration method of transmission and distribution networks considering the uncertainties of centralized and distributed renewable energy sources[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2026, 41(7): 2281-2299.
- [24] Lu P, Lan H Q, Yuan Q W, et al. A bi-level solution strategy based on distributed proximal policy optimization for transmission and distribution network dispatch with EVs and variable energy[J]. Applied Energy, 2025, 384: 125405.
- [25] 周云. 现代城市电网恢复技术研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2017.
- Zhou Yun. Research on modern urban power grid restoration technology[D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2017.
- [26] 张强, 赵晋泉, 戴则梅, 等. 基于目标级联分析的输配电网黑启动分布式协同优化方法[J]. 电力系统自动化, 2021, 45(3): 111-120.
- Zhang Qiang, Zhao Jinquan, Dai Zemei, et al. Distributed coordinated optimization method for black-start of transmission and distribution networks based on analytical target cascading[J].

- Automation of Electric Power Systems, 2021, 45(3): 111-120.
- [27] Bai Y S, Gu X P, Li S Y, et al. Coordinated restoration method of transmission and distribution network considering distribution network fault repair scenario[J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2023, 151: 109153.
- [28] Zhao J, Liu Y, Wang H T, et al. Receding horizon load restoration for coupled transmission and distribution system considering load-source uncertainty[J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2020, 116: 105517.
- [29] 杨祺铭, 李更丰, 别朝红, 等. 计及间歇性新能源的弹性城市电网输配电协同供电恢复方法[J]. 高电压技术, 2023, 49(7): 2764-2774.
- Yang Qiming, Li Gengfeng, Bie Zhaohong, et al. Coordinated power supply restoration method of resilient urban transmission and distribution networks considering intermittent new energy[J]. High Voltage Engineering, 2023, 49(7): 2764-2774.
- [30] Tan Z F, Yan Z, Zhong H W, et al. Non-iterative solution for coordinated optimal dispatch via equivalent projection: part I: theory[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2024, 39(1): 890-898.
- [31] 袁泉, 孙宇军, 张蔷, 等. 基于日前调度时段组合的联络线功率可行域分析[J]. 电网技术, 2023, 47(2): 636-647.
- Yuan Quan, Sun Yujun, Zhang Qiang, et al. Feasible region of Tie-line capacity based on combination of day-ahead dispatching time intervals[J]. Power System Technology, 2023, 47(2): 636-647.
- [32] Zhang D D, Zhao J Y, Dai W, et al. A feasible region evaluation method of renewable energy accommodation capacity[J]. Energy Reports, 2021, 7: 1513-1520.
- [33] Jahromi A A, Bouffard F. On the loadability sets of power systems: part I: characterization[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2017, 32(1): 137-145.
- [34] Abiri-Jahromi A, Bouffard F. On the loadability sets of power systems: part II: minimal representations[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2017, 32(1): 146-156.
- [35] Wang Q, Wu W C, Lin C H, et al. A spatio-temporal decomposition method for the coordinated economic dispatch of integrated transmission and distribution grids[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2024, 39(3): 4835-4851.
- [36] Silva J, Sumaili J, Bessa R J, et al. Estimating the active and reactive power flexibility area at the TSO-DSO interface[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2018, 33(5): 4741-4750.
- [37] Wang S Y, Wu W C. Aggregate flexibility of virtual power plants with temporal coupling constraints[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2021, 12(6): 5043-5051.
- [38] Yang Y Y, Tan Z F, Jiang Z L, et al. Influences of uncertainties to the generation feasible region for medium- and long-term electricity transaction[J]. Global Energy Interconnection, 2020, 3(6): 595-604.
- [39] Li N, Chen L J, Low S H. Exact convex relaxation of OPF for radial networks using branch flow model[C]//2012 IEEE Third International Conference on Smart Grid Communications (SmartGridComm). IEEE, 2012: 7-12.
- [40] Wang Y, Xu Y, Li J X, et al. On the radiality constraints for distribution system restoration and reconfiguration problems[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2020, 35(4): 3294-3296.
- [41] Dolatabadi S H, Ghorbanian M, Siano P, et al. An enhanced IEEE 33 bus benchmark test system for distribution system studies[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2021, 36(3): 2565-2572.
- 收稿日期: 2026-03-30 修回日期: 2026-05-19
- 作者简介:
- 柴园园(1992),女,博士,副教授,主要研究方向为配电网运行优化与供电恢复,分布式优化等;
- 张昱泽(2001),男,硕士研究生,主要研究方向为输配电网供电恢复;
- 陈海文(1994),男,博士,讲师,通信作者,主要研究方向为灵活性资源聚合调度, E-mail: haiwen.c@hebut.edu.cn;
- 李青松(2001),男,硕士研究生,主要研究方向为配电网供电恢复;
- 马泽超(2001),男,硕士研究生,主要研究方向为柔性互联配电网供电恢复。
- (编辑 张小飞)