

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.230071

含多类型异质资源的微电网两阶段黑启动恢复优化方法研究

何立钢¹, 王怡聪², 王廷涛¹, 艾小猛¹, 谭昊宇¹, 柯方超², 苗世洪¹

(1. 华中科技大学电气与电子工程学院, 强电磁工程与新技术国家重点实验室, 电力安全与高效湖北省重点实验室, 湖北 武汉 430074; 2. 国网湖北省电力有限公司经济技术研究院, 湖北 武汉 430077)

摘要: 实现失电微电网的黑启动恢复, 可以加快电力系统的恢复进程, 有助于减少大停电事故造成的社会经济损失。为此, 提出了一种考虑可调度机组、新能源以及储能等多类型异质资源的微电网两阶段黑启动恢复方法。首先, 对多类型异质资源的恢复特性进行分析, 确定其在黑启动恢复过程中的运行约束。其次, 提出了一种改进的微电网节点重要度与线路权值评估方法, 并以此构建了微电网黑启动恢复两阶段优化模型。第一阶段以最大化微电网的可用有功出力为目标优化微源的恢复方案, 第二阶段以最大化负荷综合恢复量为目标优化负荷的恢复方案。最后, 基于 21 节点系统进行了算例分析, 结果表明所提模型能够提升微电网的黑启动恢复效率, 有效降低停电事故造成的损失。

关键词: 微电网; 黑启动恢复; 微源恢复; 负荷恢复; 两阶段优化

A two-stage black-start restoration optimization method for a microgrid containing multi-type heterogeneous resources

HE Ligang¹, WANG Yicong², WANG Tingtao¹, AI Xiaomeng¹, TAN Haoyu¹, KE Fangchao², MIAO Shihong¹

(1. State Key Laboratory of Advanced Electromagnetic Engineering and Technology, Hubei Electric Power Security and High Efficiency Key Laboratory, School of Electrical and Electronic Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China; 2. Economic Research Institute of State Grid Hubei Electric Power Co., Ltd., Wuhan 430077, China)

Abstract: Enabling black-start restoration of power-losing microgrids can speed up the restoration process of the power system and help mitigate the socio-economic losses caused by major power outages. Thus this paper proposes a two-stage black-start restoration method for microgrids considering the participation of multi-type heterogeneous resources. First, the restoration characteristics of multi-type heterogeneous resources are analyzed to determine their operational constraints in the black-start restoration process. Second, an evaluation index to improve the importance of existing nodes and line weights is proposed, and a two-stage optimization model for microgrid black-start restoration is constructed. In the first stage, it optimizes the restoration scheme of micro-sources to maximize the available generation capacity of the microgrid, and in the second stage, the restoration scheme of the load is optimized to maximize comprehensive load restoration. Finally, the results of case studies based on the 21-node system show that the proposed model can improve the black-start restoration efficiency of the microgrid and mitigate the losses caused by microgrid outages.

This work is supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 52177088).

Key words: microgrid; black-start restoration; micro-sources restoration; load restoration; two-stage optimization

0 引言

随着分布式电源的大规模接入^[1-3], 电力系统运行结构日趋复杂, 发生大停电事故的风险大大增加^[4]。

基金项目: 国家自然科学基金项目资助(52177088); 国网湖北省电力有限公司科技项目资助(521538220007)

微电网因其控制手段灵活, 可在并网与孤岛两种工作模式间平滑切换, 已成为当前电力系统黑启动恢复的重要辅助手段^[5-7]。然而, 在失去大电网支撑的孤网运行情况下, 微电网抗扰动能力大大降低, 在设备故障、外部环境突变等内外部因素影响下, 极易失稳并进入“全黑”状态^[8]。随着微电网供电可靠性要求的不断提高, 黑启动恢复也逐渐成为微电

网所必需的功能之一。

与大电网相似,微电网的黑启动恢复,也需要内部的黑启动电源带动附近的非自启动微源与停电负荷,逐步扩大恢复范围,最终才能完成整个微电网的恢复;但微电网的各类型分布式电源在运行特性、过载能力等方面不同于大电网的传统大型旋转机械类电源^[9],无法直接沿用大电网的黑启动恢复方法。因此,有必要对孤岛微电网的黑启动恢复问题开展深入的研究。

目前,国内外学者已经针对微电网的黑启动恢复方法开展了相关研究。文献[10]提出了一种多 Agent 系统的黑启动电源控制优化方案,实现了黑启动恢复过程中电源控制方法的平滑切换;文献[11-12]提出了以光-储联合发电系统作为黑启动电源的控制策略,通过储能的 V-f 控制平抑光伏出力的波动,保障微电网黑启动电源的稳定运行;文献[13]在文献[12]的基础上,采用模型预测控制技术设计控制方法和滚动优化模型,优化调节风-光-储的出力,提出了风-光-储联合发电系统作为黑启动电源的协调控制策略;文献[14]针对以上策略需要配置大规模储能导致成本过高的问题,基于永磁直驱风电机组的构网型控制策略,提出了以风电机组作为孤岛微电网黑启动电源的控制策略。上述研究表明,合理的控制策略可以实现微源的快速黑启动与稳定运行。然而,以上文献仅针对电源黑启动阶段的控制策略开展了研究,未计及后续恢复微电网内非自启动微源与停电负荷的过程,难以满足微电网黑启动恢复过程中不同阶段的需求。

随着用电需求的增长微电网的规模不断扩大,微源恢复与负荷恢复在微电网黑启动恢复过程中的重要性日益彰显,逐渐成为当前微电网黑启动恢复方法研究的重点^[15-18]。文献[15]搭建了分布式电源的黑启动能力评估模型选取黑启动电源,并采用功率趋势率作为线路恢复指标,提出了微源的串行恢复策略;文献[16]通过熵权法确定微源的恢复顺序,并采用 Warshall-Floyd 路径寻优算法与改进粒子群算法搜索恢复路径,提出了微源恢复的路径优化方法;文献[17]基于最小生成树的 Prim 算法构建负荷恢复路径,计及异步电动机感性负荷的影响,提出了海岛微电网的负荷恢复优化方法;文献[18]采用深度强化学习框架,提出了基于深度强化学习算法的微电网停电负荷恢复策略,有效提升了负荷恢复的效率。尽管上述文献均对微电网的微源恢复与负荷恢复方法开展了研究,但在选取黑启动恢复路径时,存在对微电网节点与线路选取指标不够全面的

问题,没有综合考虑节点和线路的拓扑属性和电气属性,且没有计及黑启动恢复过程的安全性要求,存在一定的局限性。此外,上述研究大多集中于微源恢复或者负荷恢复其中一个阶段,鲜有同时考虑两个阶段的恢复方法。实际上微源恢复与负荷恢复两个阶段相互影响,针对单独一个阶段的研究不利于求取黑启动恢复的整体最优方案。

针对上述问题,本文提出了一种微电网两阶段黑启动恢复方法。首先,针对微电网内多类型异质资源的恢复特性开展分析;其次,面向微电网黑启动恢复过程中不同阶段的要求,综合考虑微电网节点和线路的拓扑属性和电气属性,提出了一种改进的微电网节点重要度与线路权值评估方法,并以此搭建了微电网黑启动恢复的两阶段优化模型,通过启发式算法与混合整数规划模型进行求解;最后,通过算例仿真进行验证,结果表明所提方法能够有效提升微电网黑启动恢复过程的效率与安全性。

1 微电网多类型异质资源的恢复特性分析

微电网内的多类型异质资源包括以内燃发电机组为代表的可调度机组(dispatchable unit, DU),以光伏、风电为代表的新能源发电机组(renewable energy resources, RES)以及以蓄电池为代表的储能设备(energy storage system, ESS)。对这些异质资源恢复特性的分析是制定微电网黑启动恢复方法的必要前提。

1.1 可调度机组的恢复特性分析

本文将 DU 在微电网黑启动恢复过程中的恢复特性描述为机组启动过程中的吸收功率曲线与启动后的发电功率曲线,同时定义机组的可用有功出力为曲线与坐标轴围成的面积^[19]。

若 DU 被设置为黑启动电源,那么可以忽略其启动过程的吸收功率曲线,该机组在黑启动恢复过程中的可用有功出力 W_{DU} 表示为

$$W_{DU} = \frac{(P_{\max})^2}{2R} + \left(T - \frac{P_{\max}}{R}\right)P_{\max} \quad (1)$$

式中: P_{\max} 为 DU 的最大输出功率; R 为 DU 的最大爬坡速率; T 为黑启动恢复过程的总时长。

而作为非自启动微源的 DU,其可用有功出力的表达式为

$$W_{DU} = (T - t_{11})P_{\max} - \frac{1}{2} \cdot \frac{(P_{\max})^2}{R} - P_{DU}^{\text{start}}(t_{11} - t_{10}) \quad (2)$$

式中: P_{DU}^{start} 为 DU 启动所需的功率; t_{10} 与 t_{11} 分别为 DU 开始启动的时刻与完成启动开始向微电网输送功率的时刻。

1.2 新能源机组的恢复特性分析

与 DU 类似, 本文将 RES 在微电网黑启动恢复过程中的恢复特性描述为机组启动过程中的吸收功率曲线与启动后的发电功率曲线。相比于可调度机组, 新能源机组启动后的发电功率存在较大的不确定。但考虑到微电网黑启动恢复的过程通常较短, 且目前新能源出力的超短期预测结果精确度较高^[20], 因此本文忽略新能源出力的随机性, 仅考虑其波动性对微电网黑启动恢复过程的影响, 同时为方便计算, 假定每一时步内新能源的出力恒定。

对于作为黑启动电源的 RES, 同样可以忽略启动过程的吸收功率曲线, 计算得到黑启动恢复过程中的可用有功出力 W_{RES} 为

$$W_{RES} = \sum_{t=1}^{N_T} P_{RES}^{pre}(t) \cdot \Delta t \quad (3)$$

式中: N_T 为黑启动恢复过程的总时步数; Δt 为时步的长度; $P_{RES}^{pre}(t)$ 为 RES 在第 t 个时步内最大出力的预测值。

而对于非自启动微源的 RES, 其在黑启动恢复过程中的可用有功出力 W_{RES} 可表示为

$$W_{RES} = \Delta t \left(\sum_{t=t_{e1}+1}^{N_T} P_{RES}^{pre}(t) - \sum_{t=t_{e0}}^{t_{e1}} P_{RES}^{start} \right) \quad (4)$$

式中: P_{RES}^{start} 为 RES 启动所需的功率; t_{e0} 与 t_{e1} 分别为 RES 开始启动与完成启动的时步。

1.3 储能设备的恢复特性分析

ESS 在微电网黑启动恢复过程中的作用为: 辅助微电网内的 DU 或 RES 作为黑启动电源、通过充/放电平抑 RES 的出力波动并满足一定的功率需求。

ESS 通常具有“即插即用”的特性, 因此 ESS 的恢复特性只考虑接入微电网后的发电功率曲线。储能设备的可用有功出力 W_{ESS} 表示为

$$W_{ESS} = \sum_{t=t_{e0}}^{N_T} \min\{\eta_{dc}(E(t) - E_{min}), P_{dc}^{max} \cdot \Delta t\} \quad (5)$$

式中: P_{dc}^{max} 为 ESS 的最大放电功率; $E(t)$ 为 ESS 在第 t 个时步的剩余能量; E_{min} 为 ESS 的最小容量限制; η_{dc} 为储能设备的放电效率; t_{e0} 为 ESS 接入微电网的时刻。

2 微电网的黑启动恢复两阶段优化模型

微电网的黑启动恢复过程涉及微源、线路、节点以及负荷等不同对象的多阶段恢复, 不同阶段制定的恢复目标与恢复方法有所不同。因此, 微电网的黑启动恢复是一个多目标、高维度、非线性的动态决策问题^[21]。为方便研究, 通常将微电网的黑启

动恢复过程分为电源黑启动、微源恢复和负荷恢复三个阶段。

在黑启动电源完成自启动后, 微电网的黑启动恢复工作可以分为两个阶段: 阶段 1 为微源恢复, 此阶段的主要目的是为了恢复微电网的重要节点、线路及部分关键负荷以及为不具备黑启动能力的微源提供启动功率, 并建立一个稳定可靠的供电拓扑; 阶段 2 为负荷恢复, 在阶段 1 得到的供电拓扑基础上, 进一步恢复仍处于失电状态的节点、线路和负荷, 最终实现整个微电网的恢复。

2.1 阶段 1: 微源恢复优化模型

阶段 1 需要制定微源的恢复方案, 解决微源恢复顺序的安排问题和微源恢复路径的选择问题。考虑到两个问题之间存在耦合关系, 在优化求解过程中相互影响, 属于双层规划问题的范畴^[22]。因此, 本文搭建双层优化模型求解微电网内非自启动微源的恢复优化问题。

在本文所建立的微源恢复双层模型中, 上层模型以最大化微电网的可用有功出力为主要目标, 同时恢复已带电区域内的负荷, 考虑不同微源的恢复特性与出力约束, 优化非自启动微源的恢复时间, 并将微源的恢复顺序传递给下层; 下层基于上层给定的恢复顺序, 搜索微源的最优恢复路径, 并将网架恢复情况返回给上层。此时上层模型将网架恢复情况作为新的约束, 生成新的恢复顺序传递至下层。重复上述过程, 直至同时满足上、下层约束的条件, 获得微源恢复的最优方案。

2.1.1 上层恢复顺序优化模型

上层模型用于实现非自启动微源恢复顺序的优化, 其决策变量为非自启动微源的启动时刻, 参考因素包括非自启动微源的有功出力、运行特性以及启动所需功率等。

1) 目标函数

非自启动微源恢复顺序优化模型的首要目标为在满足微电网运行约束的前提下, 最大化黑启动恢复过程中微电网的可用有功出力, 其次要目标则为尽可能多地恢复已带电区域内的停电负荷, 具体表示为

$$\max C_{up} = C_w + \varepsilon \cdot C_{Load} \quad (6)$$

式中: C_{Load} 为阶段 1 已带电区域内负荷的恢复量; ε 为负荷恢复的调整系数, 用于表征对停电负荷恢复的程度; C_w 为微电网黑启动恢复过程中的可用有功出力, 如式(7)所示。

$$C_w = C_{DU} + C_{RES} + C_{ESS} \quad (7)$$

式中, C_{DU} 、 C_{RES} 以及 C_{ESS} 分别表示微电网内 DU、

RES 以及 ESS 的可用有功出力总和。

2) 约束条件

(1) 非自启动微源的启动过程约束

定义非自启动微源的恢复状态变量 $\mu_g(t)$ 满足式(8)。

$$\mu_g(t) = \begin{cases} 0, & t \leq t_g^{\text{res}} \cup t \geq t_g^{\text{res}} + t_g^{\text{start}} \\ 1, & t_g^{\text{res}} \leq t \leq t_g^{\text{res}} + t_g^{\text{start}} \end{cases} \quad (8)$$

式中: t_g^{res} 为微电网内的非自启动微源 g 开始启动的时刻; t_g^{start} 为非自启动微源 g 完成启动所需的时步数。

(2) 微源的工作状态约束

$$u_{\text{bs}}(t) = 1, \forall t \quad (9)$$

$$u_g(t) = \begin{cases} 0, & 1 \leq t \leq t_g^{\text{res}} + t_g^{\text{start}} \\ 1, & t_g^{\text{res}} + t_g^{\text{start}} < t \leq T_{s1} \end{cases} \quad (10)$$

式中: $u_g(t)$ 为非自启动微源 g 的工作状态; $u_{\text{bs}}(t)$ 为黑启动电源的工作状态; T_{s1} 为阶段 1 的总时长, 本文设定阶段 1 的结束时刻为微源全部完成启动的时刻, 通过各非自启动微源的工作状态进行判断。式(9)表明, 黑启动电源一直处于运行状态; 式(10)表明, 非自启动微源必须在启动过程结束后才能进入运行状态。

(3) 可调度机组的出力约束

在黑启动恢复过程中, DU 的出力情况与正常状态下有所不同, 因此本文对 DU 的出力约束作如下修改。

$$\begin{cases} u_l(t) \cdot P_l^{\text{min}} \leq P_l(t) \leq u_l(t) \cdot P_l^{\text{max}}, \forall l \in N_{\text{DU}}, \forall t \\ u_l(t) \cdot Q_l^{\text{min}} \leq Q_l(t) \leq u_l(t) \cdot Q_l^{\text{max}}, \forall l \in N_{\text{DU}}, \forall t \\ -R_l \leq P_l(t) - P_l(t-1) \leq R_l, \forall l \in N_{\text{DU}}, \forall t \geq 2 \end{cases} \quad (11)$$

式中: N_{DU} 为微电网内可调度机组的集合; $u_l(t)$ 为可调度机组 l 的工作状态; $P_l(t)$ 与 $Q_l(t)$ 分别为第 t 个时步内可调度机组 l 的有功和无功出力; P_l^{max} 与 P_l^{min} 分别为可调度机组 l 的有功出力上、下限; Q_l^{max} 与 Q_l^{min} 分别为可调度机组 l 的无功出力上、下限; R_l 为可调度机组 l 的爬坡率。

(4) 新能源机组的出力约束

$$\begin{cases} 0 \leq P_r(t) \leq u_r(t) \cdot P_r^{\text{pre}}(t), \forall r \in N_{\text{RES}}, \forall t \\ 0 \leq Q_r(t) \leq u_r(t) \cdot Q_r^{\text{pre}}(t), \forall r \in N_{\text{RES}}, \forall t \end{cases} \quad (12)$$

式中: N_{RES} 为微电网内新能源机组的集合; $u_r(t)$ 为新能源机组 r 的工作状态; $P_r(t)$ 与 $Q_r(t)$ 分别为第 t 个时步内新能源机组 r 的有功和无功出力; $P_r^{\text{pre}}(t)$ 与 $Q_r^{\text{pre}}(t)$ 分别为新能源机组 r 在第 t 个时步内的有功、无功出力预测值。

(5) 储能的出力约束

$$\begin{cases} u_e^c(t) + u_e^{\text{dc}}(t) = u_e(t) \\ u_e^c(t) \cdot P_e^{\text{c,min}} \leq P_e^c(t) \leq u_e^c(t) \cdot P_e^{\text{c,max}} \\ u_e^{\text{dc}}(t) \cdot P_e^{\text{dc,min}} \leq P_e^{\text{dc}}(t) \leq u_e^{\text{dc}}(t) \cdot P_e^{\text{dc,max}} \\ \forall e \in N_{\text{ESS}}, \forall t \end{cases} \quad (13)$$

式中: N_{ESS} 为微电网内储能设备的集合; $u_e(t)$ 为储能装置 e 的工作状态; $u_e^c(t)$ 与 $u_e^{\text{dc}}(t)$ 分别为储能装置 e 的充、放电状态; $P_e^c(t)$ 与 $P_e^{\text{dc}}(t)$ 分别为储能装置 e 在第 t 个时步内的充、放电功率; $P_e^{\text{c,min}}$ 与 $P_e^{\text{c,max}}$ 分别为储能装置 e 的最小/最大充电功率; $P_e^{\text{dc,min}}$ 与 $P_e^{\text{dc,max}}$ 分别为储能装置 e 的最小/最大放电功率。储能装置的荷电状态约束与正常运行状态相同, 已有大量文献进行描述, 此处不作赘述。

(6) 部分关键负荷恢复约束

在微源恢复的过程中, 为了加快微电网的黑启动恢复效率以及保障系统的功率平衡, 通常会在此阶段接入已带电区域内的部分关键负荷。但负荷的接入会给微电网带来功率冲击, 因此需要对每一时步内负荷的投入量进行限制, 防止微电网在黑启动恢复过程中出现较大的频率波动。

$$\begin{cases} P_i^{\text{L}}(t) = u_i^{\text{L}}(t) \cdot P_i^{\text{Load}} \\ Q_i^{\text{L}}(t) = u_i^{\text{L}}(t) \cdot Q_i^{\text{Load}} \\ \Delta P_{\text{L}}(t) = \sum_{i=1}^{n_{\text{node}}} P_i^{\text{L}}(t) - \sum_{i=1}^{n_{\text{node}}} P_i^{\text{L}}(t-1), \forall t \geq 2 \\ \Delta P_{\text{L}}(t) \leq \zeta \left(\sum_{l \in N_{\text{DU}}} u_l(t) P_l^{\text{max}} + \sum_{r \in N_{\text{RES}}} u_r(t) P_r^{\text{pre}} + \sum_{e \in N_{\text{ESS}}} u_e^{\text{dc}}(t) P_e^{\text{dc,max}} \right) \end{cases} \quad (14)$$

$$\begin{cases} \sum_{i=1}^{n_{\text{node}}} P_i^{\text{L}}(t) + \sum_{e \in N_{\text{ESS}}} P_e^c(t) + \sum_{g \in N_{\text{nbs}}} \mu_g(t) P_g^{\text{start}} = \\ \sum_{l \in N_{\text{DU}}} P_l(t) + \sum_{r \in N_{\text{RES}}} P_r(t) + \sum_{e \in N_{\text{ESS}}} P_e^{\text{dc}}(t) \\ \sum_{l \in N_{\text{DU}}} Q_l(t) + \sum_{r \in N_{\text{RES}}} Q_r(t) = \sum_{i=1}^{n_{\text{node}}} Q_i^{\text{L}}(t) \end{cases} \quad (15)$$

式中: n_{node} 为微电网内节点的数量; $P_i^{\text{L}}(t)$ 与 $Q_i^{\text{L}}(t)$ 分别为节点 i 处负荷在第 t 个时步内的有功、无功功率恢复量; $\Delta P_{\text{L}}(t)$ 为微电网在第 t 个时步内新增的负荷恢复量; P_i^{Load} 与 Q_i^{Load} 分别为节点 i 所接负荷的有功、无功功率需求量; $u_i^{\text{L}}(t)$ 为负荷的恢复状态变量; ζ 为微电网的频率响应比例因子^[23], 取值为 0.2; N_{nbs} 为微电网内非自启动微源的集合; P_g^{start} 为非自启动微源 g 在启动过程中所需的功率。式(14)为负

荷的恢复约束; 式(15)为微电网的功率平衡约束。

(7) 节点、线路以及设备状态约束

上层模型对各个时步内微源启动与负荷接入情况的求解必须基于下层模型反馈的网架恢复情况, 具体如式(16)—式(19)所示。

$$\begin{cases} \sum_{t=1}^{T_{s1}} u_{\text{node},i}(t) = T_{s1} - t_i + 1 \\ \sum_{t=1}^{T_{s1}} u_{\text{line},ij}(t) = T_{s1} - t_{\text{line},ij} + 1 \end{cases} \quad (16)$$

$$\begin{cases} u_{\text{node},i}(t-1) \leq u_{\text{node},i}(t), \forall t > 2 \\ u_{\text{line},ij}(t-1) \leq u_{\text{line},ij}(t), \forall t > 2 \end{cases} \quad (17)$$

$$t_g^{\text{res}} \geq t_{\text{node},g} \quad (18)$$

$$u_i^{\text{L}}(t) \leq u_{\text{node},i}(t), \forall i, \forall t \quad (19)$$

式中: t_i 与 $t_{\text{line},ij}$ 分别为下层模型返回的节点、线路恢复时刻; $u_{\text{node},i}(t)$ 为节点 i 在第 t 个时段内的恢复状态变量; $u_{\text{line},ij}(t)$ 为线路 ij 在第 t 个时段内的恢复状态变量; $t_{\text{node},g}$ 为非自启动微源 g 所在节点的恢复时刻。式(16)为微电网内节点与线路状态的计算公式; 式(17)表明, 节点、线路在恢复供电后不会再次停电; 式(18)与式(19)表明, 非自启动微源与负荷恢复的前提是所在节点得到恢复。

(8) 潮流约束

本文采用线性化的 Distflow 模型^[23]描述微电网的潮流, 并结合黑启动恢复过程增加如式(20)、式(21)所示的约束。

$$\begin{cases} -P_{\text{line},ij}^{\text{max}} \cdot u_{\text{line},ij}(t) \leq P_{\text{line},ij}(t) \leq P_{\text{line},ij}^{\text{max}} \cdot u_{\text{line},ij}(t) \\ -Q_{\text{line},ij}^{\text{max}} \cdot u_{\text{line},ij}(t) \leq Q_{\text{line},ij}(t) \leq Q_{\text{line},ij}^{\text{max}} \cdot u_{\text{line},ij}(t) \\ \alpha_{\omega} P_{\text{line},ij}(t) + \beta_{\omega} Q_{\text{line},ij}(t) \leq \delta_{\omega} S_{\text{line},ij}^{\text{max}} \end{cases} \quad (20)$$

$$\begin{cases} u_{\text{node},i}(t) \cdot V_{\min} \leq V_i(t) \leq u_{\text{node},i}(t) \cdot V_{\max} \\ x_{ii} \cdot V_0 \leq V_i(t) \leq V_0 \end{cases} \quad (21)$$

式中: $P_{\text{line},ij}(t)$ 与 $Q_{\text{line},ij}(t)$ 分别为线路 ij 在第 t 个时步传输的有功、无功功率; $P_{\text{line},ij}^{\text{max}}$ 与 $Q_{\text{line},ij}^{\text{max}}$ 分别为线路 ij 允许传输的最大有功、无功功率; α_{ω} 、 β_{ω} 与 δ_{ω} 分别为正十二边形线性化潮流约束的系数, 取值见文献[24]; $S_{\text{line},ij}^{\text{max}}$ 为线路 ij 传输容量的最大值中; V_{\max} 与 V_{\min} 分别为节点允许的电压上、下限, 分别设置为基准电压的 1.05 倍与 0.95 倍; $V_i(t)$ 为节点 i 在第 t 个时步内的电压大小; V_0 为微电网的基准电压; x_{ii} 为黑启动电源所在节点的标志变量。式(20)为额外的微电网线路功率传输约束; 式(21)为额外的微电网节点电压约束。

2.1.2 下层恢复路径优化模型

下层恢复路径模型用于实现微电网已恢复区域到非自启动微源的恢复路径优化, 其决策变量为恢复路径内的微电网节点与线路。因此, 需要对微电网内节点的重要度与线路的权值进行评估。

1) 节点重要度

节点的度通常被定义为邻近节点的数目, 是最常用的节点重要度评估指标。节点的度越大, 说明其连通能力越强, 在黑启动恢复过程中恢复的优先度也就越高。但在实际运行过程中, 由于微电网具有开环运行的特点, 许多节点的度都相同, 单一的度定义无法衡量节点的重要度^[25]。针对这一问题, 本文基于微电网邻近节点的属性与负荷分布的情况, 对节点重要度评估方法进行如下改进。

(1) 改进节点的度指标

采用邻近节点的贡献度对节点的度指标进行修正, 可以综合考虑节点的全局重要性与局部重要性, 得到较为准确的评估结果, 改进节点的度指标具体的计算过程详见文献[25]。

然而, 改进节点的度指标虽然可以有效评估节点在微电网拓扑结构层面的重要程度, 但还需要从电气参数的层面完善节点重要度的综合评价指标。对于微电网内的某一节点, 其所接负荷的重要等级与大小也会对节点的重要度产生影响。

(2) 负荷分布贡献度指标

微电网内负荷的分布也会影响网络中节点的重要度, 一般而言, 节点上的负荷量越大, 负荷等级越高, 节点在微电网中的重要程度也就越高。定义节点的负荷量贡献度 $D_{\text{li},i}$ 为节点所接的负荷量与网络内最大节点所接负荷量的比值, 即

$$D_{\text{li},i} = \frac{P_i^{\text{Load}}}{\max_{1 \leq j \leq n_{\text{node}}} P_j^{\text{Load}}} \quad (22)$$

同时, 定义节点的负荷等级贡献度 $D_{\text{lc},i}$ 为节点所接负荷等级对应的权值, 即

$$D_{\text{lc},i} = \lambda_i^{\text{Load}} \quad (23)$$

式中, λ_i^{Load} 为节点 i 所接的负荷等级对应的权值, 本文设置一级负荷、二级负荷和三级负荷对应的权值分别为 1、0.2 和 0.01。

综上所述, 节点重要度包括节点的度指标、节点的负荷量贡献度与负荷等级贡献度 3 个指标。对 3 个指标进行归一化处理, 采用改进层次分析法确定其权重, 最终得到节点的重要度指标为

$$C_{\text{node},i} = \omega_1 D'_{\text{li}} + \omega_2 D'_{\text{li},i} + \omega_3 D'_{\text{lc},i} \quad (24)$$

式中: $C_{\text{node},i}$ 为节点 i 的重要度; ω_1 、 ω_2 、 ω_3 分别

为节点的度、节点负荷量贡献度以及负荷等级贡献度的权重系数； D'_{v_i} 、 $D'_{lq,i}$ 与 $D'_{lc,i}$ 分别为指标归一化处理后的值。

2) 线路权值

边介数是描述网络中线路重要程度的最常见指标，具体计算方式详见文献[15]，微电网线路的边介数越大，说明线路对微电网电能的传输能力与控制能力越强，那么它在黑启动恢复过程中恢复的优先度也就越高。

同样地，线路的权值也需要考虑电气因素。在微电网线路的恢复过程中，充电空载线路会出现过电压现象，随着微电网电压等级的升高，过电压现象在黑启动恢复过程中造成的危害越来越严重。虽然可以通过逆变器的控制策略实现一定范围内的无功调节^[26]，但是依然存在因过电压现象过于严重导致的线路恢复失败以及电力电子装置损坏风险。为此，在恢复路径的寻找过程中，应当选取充电电容较小的线路，以降低过电压现象产生的危害。同时，为了减少停电带来的损失，需要尽快完成各微源的启动，所以线路的恢复时间也是线路权值需要考虑的因素之一。

综上，线路权值指标 $C_{line,ij}$ 由线路充电电容、线路操作恢复时间以及线路的边介数构成，其具体形式可表示为

$$C_{line,ij} = \omega_4 B'_{ij} + \omega_5 C'_{ij} + \omega_6 T'_{ij} \quad (25)$$

式中： ω_4 、 ω_5 和 ω_6 分别为线路边介数、线路充电电容和线路恢复时间的权重系数，同样采用改进层次分析法进行计算； B'_{ij} 、 C'_{ij} 和 T'_{ij} 分别为线路边介数、线路充电电容和线路恢复时间经过归一化处理后的值。

考虑到边介数与充电电容、恢复时间是不同类型的指标，因此采用不同的归一化计算方式进行处理。具体形式可表示为

$$\begin{cases} B'_{ij} = \frac{\max_{jk \in E} B_{jk} - B_{ij}}{\max_{jk \in E} B_{jk} - \min_{jk \in E} B_{jk}} \\ C'_{ij} = \frac{C_{ij} - \min_{jk \in E} C_{jk}}{\max_{jk \in E} C_{jk} - \min_{jk \in E} C_{jk}} \\ T'_{ij} = \frac{T_{ij} - \min_{jk \in E} T_{jk}}{\max_{jk \in E} T_{jk} - \min_{jk \in E} T_{jk}} \end{cases} \quad (26)$$

式中： E 为微电网中线路的集合； B_{ij} 、 C_{ij} 与 T_{ij} 分别为线路 ij 边介数、充电电容与恢复时间的实际值； B_{jk} 、 C_{jk} 与 T_{jk} 分别为线路 jk 边介数、充电电容与

恢复时间的实际值； $\max_{jk \in E}$ 与 $\min_{jk \in E}$ 分别表示取所有线路中对应指标的最大、最小值。

3) 目标函数

下层恢复路径优化模型的目标为：在满足机组恢复顺序要求的前提下，寻找最优的恢复路径。一般而言，恢复路径中的节点重要度总和越大，那么得到的系统网架连通性也就越强^[27]，对后续的负荷恢复过程也越有利；但是相应地，路径包含线路数目也就越多，导致微源恢复时刻推迟的同时，也可能增大过电压发生的风险。因此，恢复路径选取的目标函数需要综合考虑黑启动恢复过程中的安全性要求与时间紧迫性要求，其具体形式可表示为

$$\min C_{\text{under}} = \sum_{g \in N_{\text{abs}}} C_{\text{path},g} = \frac{1}{\sum_{g \in N_{\text{abs}}} C_{\text{node},g}} + \sum_{g \in N_{\text{abs}}} C_{\text{line},g} \quad (27)$$

式中： $C_{\text{path},g}$ 为待恢复微源 g 恢复路径的评价指标； $C_{\text{node},g}$ 为待恢复微源 g 恢复路径对应的微电网内节点重要度的总和； $C_{\text{line},g}$ 为待恢复微源 g 恢复路径对应的微电网内线路重要度的总和。式(27)表示选取恢复时间较短、较为安全且包含重要节点较多的路径。

4) 恢复路径建模分析

本文参考文献[23]，采用恢复路径矩阵表征微电网的黑启动恢复情况。

在恢复路径矩阵中，如果节点 i 与节点 j 之间存在连通路径，那么 x_{ij} 与 x_{ji} 就作为0-1决策变量，否则， x_{ij} 与 x_{ji} 恒为零；若存在一条从节点 i 到达节点 j 的输电线路，那么 $x_{ij}=1$ 。同时，若节点 i 上连接有黑启动电源，那么 $x_{ii}=1$ ，反之，则 $x_{ii}=0$ 。在恢复路径矩阵的基础上，使用整数变量 t_i 与 $t_{line,ij}$ 表征节点 i 与线路 ij 的恢复时刻，作为返回给上层模型的网架恢复情况。

5) 约束条件

本部分主要分析微电网的节点恢复时刻约束与恢复路径起、终点约束，拓扑约束、结构约束与文献[23]相同，此处不作赘述。

(1) 节点恢复时刻约束，下层模型需要计算节点恢复时刻并传输给上层模型。

$$1 - M(1 - x_{jj}) \leq t_j \leq 1 + M(1 - x_{jj}) \quad (28)$$

$$T_{s1} + 1 - M \cdot \sum_{i=1}^{n_{\text{node}}} x_{ij} \leq t_j \leq T_{s1} + 1 + M \cdot \sum_{i=1}^{n_{\text{node}}} x_{ij} \quad (29)$$

$$t_i + T_{ij} - M(1 - x_{ij}) \leq t_j \leq t_i + T_{ij} - M(1 - x_{ij}) \quad (30)$$

$$\begin{cases} (T_{s1} + 1) \cdot (1 - x_{ij}) \leq t_{\text{line},ij} \leq T_{s1} + 1 \\ t_j - M(1 - x_{ij}) \leq t_{\text{line},ij} \leq t_j + M(1 - x_{ij}) \end{cases} \quad (31)$$

$$t_g \leq t_{\text{DGg}}^{\text{up}}, \forall g \in N_{\text{nbs}} \quad (32)$$

式中: t_j 为节点 j 的恢复时刻; M 为一个非常大的自然数, 本文取值为 1000; $t_{\text{DGg}}^{\text{up}}$ 为上层模型提供给下层模型的微源恢复时刻。式(28)表明, 若节点 j 为连接黑启动电源的节点, 那么节点 j 的恢复时刻即为阶段 1 的开始时刻; 式(29)表明, 若阶段 1 不存在节点 j 的恢复路径, 那么设定节点 j 的恢复时刻为 $T_{s1} + 1$; 式(30)表明, 节点 j 的恢复时刻由其上游节点的恢复时刻以及所接线路的操作恢复时间共同决定; 式(31)表明, 线路的恢复时刻取决于恢复路径是否存在, 若存在, 则线路的恢复时刻等于恢复路径末端节点的恢复时刻; 式(32)表明, 微源所在节点的恢复时刻应早于上层模型设定的微源恢复时刻。

(2) 恢复路径起、终点约束。

$$\begin{cases} \sum_{j=1, j \neq i}^{n_{\text{node}}} x_{ij} \geq 1, \sum_{j=1, j \neq i}^{n_{\text{node}}} x_{ji} = 0, i \in N_{\text{bs}} \\ \sum_{j=1, j \neq i}^{n_{\text{node}}} x_{ij} = 0, \sum_{j=1, j \neq i}^{n_{\text{node}}} x_{ji} = 1, \forall i \in N_{\text{nbs}} \end{cases} \quad (33)$$

式(33)中连接黑启动电源的节点为源节点, 其特点为没有上游节点, 只有下游节点; 连接非自启动微源的节点为汇节点, 其特点为只有上游节点, 没有下游节点。

2.2 阶段 2: 负荷恢复优化模型

阶段 2 的主要任务是基于阶段 1 得到的供电拓扑, 进一步恢复仍处于停电状态的节点、线路与负荷, 最终实现整个微电网供电的恢复。由于阶段 2 最终会实现所有节点的恢复, 所以恢复路径选取仅需要考虑线路的权值。因此, 阶段 2 采用 Floyd 算法直接求解剩余节点的恢复路径。

综上所述, 阶段 2 模型的决策变量为停电负荷的恢复时刻。

2.2.1 目标函数

负荷恢复优化模型用于实现负荷的高效恢复, 因此目标函数设置为最大化整个恢复过程中的负荷综合恢复量, 具体表示为

$$\begin{aligned} \max C_{s2} &= \sum_{t=T_{s1}+1}^{T_{s1}+T_{s2}} \Delta t \cdot (\sigma \cdot C_{\text{load},1}(t) + \gamma \cdot C_{\text{load},2}(t)) \\ \begin{cases} C_{\text{load},1}(t) &= \sum_{i=1}^{n_{\text{node}}} P_i^L(t) \\ C_{\text{load},2}(t) &= \sum_{i=1}^{n_{\text{node}}} \lambda_i^{\text{Load}} \cdot P_i^L(t) \end{cases} \end{aligned} \quad (34)$$

式中: T_{s2} 为负荷恢复阶段持续的时长; $C_{\text{load},1}(t)$ 与 $C_{\text{load},2}(t)$ 分别为阶段 2 的负荷恢复量与负荷重要度恢复量; σ 与 γ 分别为负荷恢复量与负荷重要度恢复量的权重系数。

2.2.2 约束条件

1) 微源出力约束。此时微电网内所有的微源均已启动, 出力情况与正常运行状况相同, 详见文献[24]。

2) 阶段 2 的负荷接入约束、潮流约束与阶段 1 相同, 此处不作赘述。

3 模型求解

3.1 阶段 1 模型求解方法

阶段 1 所提模型为双层规划问题, 难以直接调用商业求解器进行求解, 且下层模型为非线性模型, 无法通过 Karush-Kuhn-Tucher 条件进行转化。因此, 本文采用基于惯性权重的改进蝙蝠算法进行求解, 具体实施步骤如下。

1) 初始化微电网模型参数与蝙蝠速度、响度、脉冲强度以及惯性权重系数等算法参数。

2) 随机初始化若干个代表待启动微源恢复顺序的蝙蝠个体。

3) 对于每一个蝙蝠个体, 分别调用双层优化模型进行求解。下层优化模型求解结果为待启动微源的恢复路径, 上层优化模型的求解结果为微源的恢复方案, 并根据上层优化模型求出的恢复时刻计算微电网的可用有功出力, 作为蝙蝠的适应度值。

4) 根据计算得到的适应度值, 执行全局搜索, 计算最优蝙蝠个体。

5) 产生随机数, 确定蝙蝠个体的位置更新公式。

6) 执行局部搜索, 更新蝙蝠个体的最优值、位置、响度以及脉冲频率。

7) 重复步骤 3)~步骤 6), 直至结果收敛或者达到最大迭代次数。

8) 输出微源的最优恢复方案。

3.2 阶段 2 模型求解方法

阶段 2 优化模型为混合整数线性规划问题(mixed integer linear problem, MILP), 本文采用 Yalmip 调用 Gurobi 9.0.1 求解器进行求解。

4 算例分析

4.1 算例参数介绍

本文以一个 21 节点系统为例来分析验证所提方法的有效性。21 节点系统网架结构如图 1 所示, 共有 5 个分布式电源节点, 分布式电源的编号与节点

编号保持一致。其中, DG₁ 为风-光-储联合发电机组, 且设置为黑启动电源; DG₂、DG₃ 与 DG₄ 均为可调度机组; DG₅ 为配置储能设备但不具备黑启动能力的光伏发电机组(启动所需功率为 75 kW, 启动所需时步数为 1)。

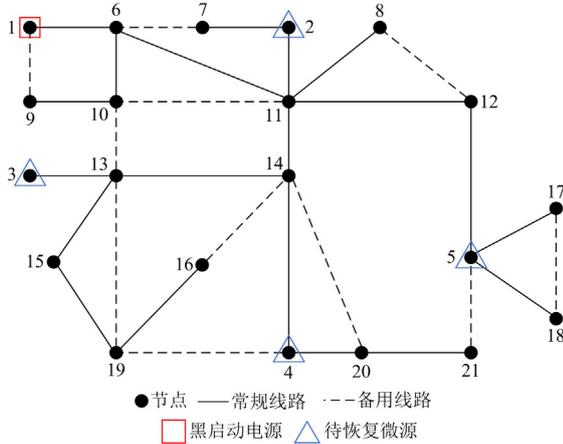


图 1 21 节点系统网架结构

Fig. 1 Grid structure of the 21-node system

可调度机组与储能设备的配置参考文献[28]; DG₁ 与 DG₅ 的功率预测曲线则参考文献[20]; 微电网内的负荷与线路参数等参考文献[18,29]。

本算例假设微电网在外部故障的影响下与主网脱离, 且进入完全失电状态。选取 DG₁ 完成自启动的时刻为初始时刻, 并设置时步长 Δt 为 4 min。采用改进层次分析法得到的节点重要度权重系数依次为 $\omega_1 = 0.6670$ 、 $\omega_2 = 0.1665$ 、 $\omega_3 = 0.1665$; 线路权值的系数依次为 $\omega_4 = 0.1047$ 、 $\omega_5 = 0.6370$ 、 $\omega_6 = 0.2583$ 。

经算例调试, 得到的最优参数如下: 蝙蝠种群规模为 40, 最大迭代次数为 200, 收敛阈值取 0.1%, 初始、最终惯性权重系数以及惯性权重因子分别为 0.9、0.4 以及 0.8; 阶段 1 上层模型中停电负荷恢复的调整系数 ε 取值为 0.01; 阶段 2 负荷恢复量与负荷重要度恢复量的权重系数 σ 与 γ 取值分别为 0.4 与 0.6。

4.2 结果分析

4.2.1 本文优化结果

对本文所提的阶段 1 优化模型进行求解, 得到阶段 1 非自启动微源的恢复优化方案如表 1 所示。

微电网进入“全黑”状态后, DG₁ 作为黑启动电源, 在满足启动功率与安全性约束的条件下应该优先恢复距离 DG₁ 较近且容量较大的微源, 增大微电网可用的有功出力。根据微电网模型参数可以求得最先恢复的微源为 DG₂ 与 DG₃。根据潮流计算结

果可知, 恢复 DG₂ 与 DG₃ 满足微电网的电压约束与线路传输功率约束, 因此 DG₁ 与 ESS₁ 可以向 DG₂ 与 DG₃ 输送功率实现启动。DG₂ 与 DG₃ 启动后, 以当前已恢复区域为电源, 根据表 1 中的恢复方案, 进一步恢复其余的非自启动微源并建立供电拓扑。

表 1 非自启动微源恢复优化方案

Table 1 Optimal restoration scheme of non-black-start

micro-source				
微源编号	节点所在位置	最优恢复路径	恢复所需时步数	恢复路径评价指标
DG ₂	2	[1→6→11→2]	4	3.6614
DG ₃	3	[1→6→10→13→3]	4	5.6613
DG ₄	4	[1→6→11→14→4]	6	5.8527
DG ₅	5	[1→6→11→12→5]	7	7.1053

微电网各节点、线路以及设备在阶段 1 的具体恢复情况如表 2 所示。可以看出, 在微源得到恢复的同时, 节点 6、10、11、12、13 与 14 上的负荷也得到了恢复。说明阶段 1 的恢复方案在确保微源及时启动的同时, 实现了已带电节点上负荷的恢复, 提升了微电网黑启动恢复的效率。

表 2 阶段 1 微电网具体恢复情况

Table 2 Microgrid restoration situations in stage 1

时步	节点恢复情况	线路恢复情况	设备恢复情况
1	节点 1	—	DG ₁ 、ESS ₁
2	节点 6	线路 1-6	负荷 6
3	节点 10	线路 6-10	负荷 10
4	节点 13、11	线路 10-13、6-11	负荷 11
5	节点 3、14、2	线路 13-3、11-14、11-2	负荷 14
6	节点 12	线路 11-12	DG ₂
7	节点 4	线路 14-4	DG ₃ 、负荷 13
8	节点 5	线路 12-5	ESS ₂ 、负荷 12
9	—	—	DG ₄ 、DG ₅

在阶段 1 供电拓扑的基础上, 阶段 2 采用 Floyd 算法, 求解得到剩余节点的恢复路径如图 2 所示。基于恢复路径计算得到的节点恢复时刻, 调用阶段 2 的负荷恢复优化模型进行求解, 得到剩余停电负荷的具体恢复情况如表 3 所示。

由表 3 可以看出, 根据节点恢复情况, 第 10 时步可以恢复的负荷为节点 7、9、15、17、18、20 以及 21 上的负荷。根据阶段 2 模型求得, 在满足节点电压、频率以及线路传输功率约束的条件下, 恢复节点 9、15、18 以及 20 上的负荷可以获得最大的负荷综合恢复量。同样地, 根据表 3 中的恢复方案, 进一步恢复剩余的停电负荷, 最终完成微电网内所有停电负荷的恢复。

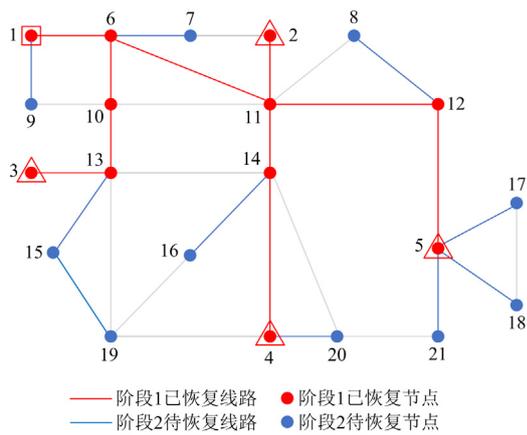


图2 阶段2 恢复路径求解结果

Fig. 2 Restoration path solving results of stage II

表3 阶段2 微电网具体恢复情况

Table 3 Microgrid restoration situations in stage II

时步	节点恢复情况	线路恢复情况	负荷恢复情况
10	节点 7、8、9、15、17、18、20、21	线路 6-7、5-17、1-9、5-18、4-20、5-21、12-8、13-15	负荷 8、18、20、21
11	节点 19、16	线路 15-19、14-16	负荷 9、15
12	—	—	负荷 16、19
13	—	—	负荷 17

整个微电网黑启动恢复过程中微源的有功出力与负荷恢复情况如图3所示。

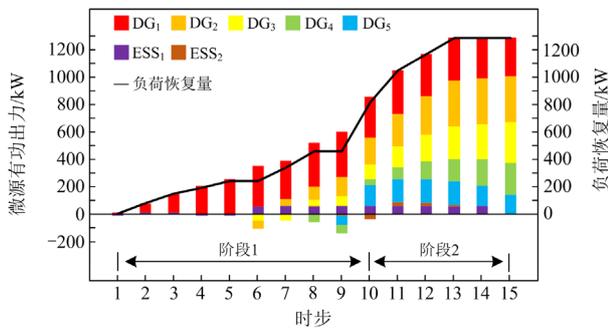


图3 微源有功出力与负荷恢复情况

Fig. 3 Micro-sources active power output and load restoration situation

由图3可知, 阶段1, DG_1 与 ESS_1 作为黑启动电源, 在第1时步开始运行; DG_2 与 DG_3 分别第7时步和第8时步开始工作, 为后续分布式电源以及部分关键负荷的恢复提供功率; ESS_2 在第8时步开始工作; DG_4 与 DG_5 在第10时步同时开始工作, 并逐步提高功率的输出。

从第10时步开始, 黑启动恢复过程进入阶段2。

此时微电网内的微源均完成启动, 因此每一时步可恢复的负荷量大大增加, 微电网内各微源逐渐增大出力满足接入负荷的功率需求; 在第14时步以后, 微电网内所有负荷均得到恢复, 但由于作为新能源机组的 DG_1 与 DG_2 出力发生波动, 其他微源的出力也随之发生调整, 微源总有功出力仍保持不变。

4.2.2 对比优化结果

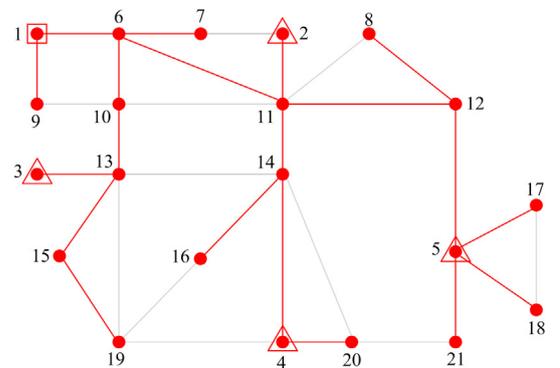
为进一步证明本文所提优化方法的有效性, 本文设置3个场景进行对比, 具体情况如下。

场景1: 采用本文所提的黑启动恢复两阶段优化方法;

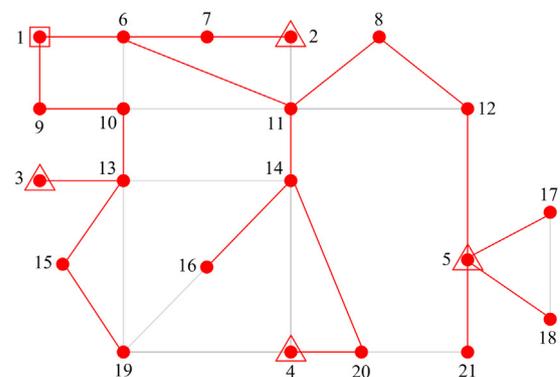
场景2: 采用黑启动恢复两阶段优化方法, 其中阶段1采用文献[15]的微源串行恢复策略, 阶段2采用本文的负荷恢复方法;

场景3: 采用文献[23]的顺序恢复方法。

通过模型求解, 微电网在3种场景下通过黑启动恢复得到的最终拓扑结构如图4所示。可以看出场景1与场景2在阶段1的微源恢复方案区别在于 DG_3 的恢复路径, 这是由于设置的目标函数不同所导致的: 场景2的目标函数为恢复路径中的节点重要度与线路权值最大化, 因此场景2的恢复路径包含了线路20-4与节点20; 场景3为顺序恢复方法, 会优先恢复重要度较高的负荷, 如节点20上的负荷。



(a) 场景1微电网拓扑结构



(b) 场景2微电网拓扑结构

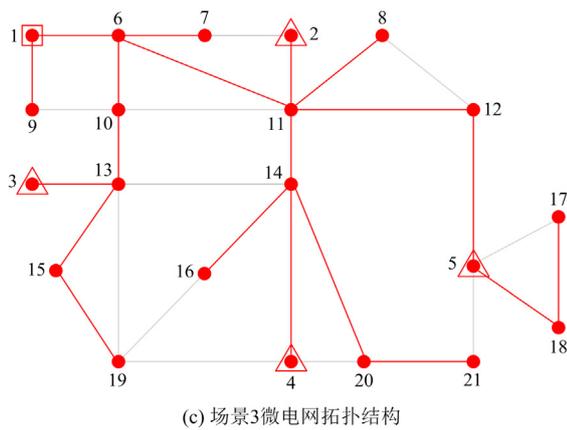
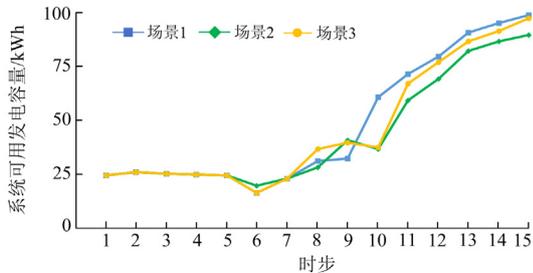


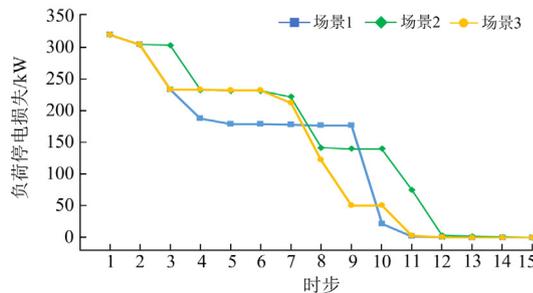
图 4 3 种场景最终恢复拓扑结构对比

Fig. 4 Comparison of the final restoration topology for three scenes

3 种场景的黑启动恢复结果对比情况如图 5 所示。结合图 4 分析可知，前 5 个时步内微电网恢复过程只包含节点与线路的恢复，系统可用的有功出力只由黑启动电源 DG_1 与 ESS_1 提供，因此 3 种场景下，系统的可用有功出力相同；3 种场景的微源恢复在第 6 至第 10 时步之间进行，其中场景 1 微源的恢复集中于第 6 时步与第 9 时步，在这两个时步内系统可用有功出力的增长较少，且没有恢复停电负荷。场景 2 与场景 3 由于目标函数的设置导致第 6 时步与第 7 时步内可用有功出力的使用偏向于停电负荷的恢复，使得微源恢复有所滞后，集中于第



(a) 3 种场景下系统可用有功出力对比



(b) 3 种场景下负荷停电损失对比

图 5 3 种场景黑启动恢复结果对比

Fig. 5 Comparison of black-start results for three scenes

9 时步与第 10 时步。对比场景 2 与场景 3，场景 1 内微源完成恢复时刻更早，因此从第 10 时步开始，场景 1 的系统可用有功出力较其他两个场景得到了很大的提升，每一时步内的负荷停电损失也开始快速减小；从第 11 时步开始，所有的微源均得到恢复并开始爬坡，各场景的系统可用有功出力开始稳步提升，微电网每一时步内的负荷停电损失也开始快速下降至零。

3 种场景的最终对比结果如表 4 所示。可以看出，对比场景 2 与场景 3，场景 1 可以获得最大的系统可用有功出力，因此黑启动恢复过程中负荷总停电损失最小；同时，场景 1 所投入的线路平均充电电容(线路过电压产生的危害)最小，证明本文所提的两阶段黑启动恢复方法可以有效提升黑启动恢复过程中的安全性。

表 4 3 种场景最终结果对比

Table 4 Final comparison results of three scenes

场景	恢复所用时步数	系统可用有功出力/kW	线路平均充电电容/p.u.	负荷总停电损失/kWh
1	13	730.2813	0.3954	131.761
2	15	665.2335	0.4132	158.024
3	13	703.4392	0.4272	134.285

5 结论

本文综合考虑微电网内多类型异质资源的恢复特性与黑启动恢复过程中不同阶段的需求，建立了微电网黑启动恢复两阶段优化模型，并提出了一种高效的微电网黑启动恢复方法，算例结果表明：

1) 针对 DU、RES 以及 ESS 等异质资源的恢复特性开展了分析，并据此提出了微电网黑启动恢复方法，更加贴近微电网实际运行状况；

2) 对微电网内节点重要度与线路权值的评估指标进行了改进，求得的恢复路径更加符合黑启动恢复过程的安全性与时间紧迫性要求；

3) 相较于以往研究的微电网黑启动恢复方法，本文所提微电网黑启动恢复方法在保障恢复过程安全性的同时，可有效提升恢复的效率。

最后需要指出的是，在实际工程中，微电网通常以互联的方式形成微电网群。考虑群间支撑作用的互联互动微电网多层次黑启动恢复方法将是下一步研究的重点。

参考文献

[1] 欧阳曾恺, 段梅梅, 田正其, 等. 基于网损二阶灵敏度的分布式电源出力鲁棒优化方法[J]. 电测与仪表, 2022, 59(9): 69-75.

- OUYANG Zengkai, DUAN Meimei, TIAN Zhengqi, et al. Robust optimization method of distributed generation output based on second-order sensitivity network loss[J]. *Electrical Measurement & Instrumentation*, 2022, 59(9): 69-75.
- [2] 蔡浩, 施凯, 唐静, 等. 基于改进蚁狮优化算法的可再生能源分布式电源优化配置[J]. *电测与仪表*, 2022, 59(11): 88-95.
- CAI Hao, SHI Kai, TANG Jing, et al. Optimal configuration of renewable energy distributed power generation based on improved ant-lion optimization algorithm[J]. *Electrical Measurement & Instrumentation*, 2022, 59(11): 88-95.
- [3] 石立国, 李延真, 关雪琳, 等. 电动汽车充电桩与分布式电源多阶段协同规划方法[J]. *供用电*, 2022, 39(5): 33-40, 53.
- SHI Liguang, LI Yanzhen, GUAN Xuelin, et al. Combined multi-stage planning method of EV charging piles and distributed generations[J]. *Distribution & Utilization*, 2022, 39(5): 33-40, 53.
- [4] 严道波, 文劲宇, 杜治, 等. 2021年德州大停电事故分析及其对电网规划管理的启示[J]. *电力系统保护与控制*, 2021, 49(9): 121-128.
- YAN Daobo, WEN Jinyu, DU Zhi, et al. Analysis of Texas blackout in 2021 and its enlightenment to power system planning management[J]. *Power System Protection and Control*, 2021, 49(9): 121-128.
- [5] 别朝红, 林雁翎, 邱爱慈. 弹性电网及其恢复力的基本概念与研究展望[J]. *电力系统自动化*, 2015, 39(22): 1-9.
- BIE Zhaohong, LIN Yanling, QIU Aici. Concept and research prospects of power system resilience[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2015, 39(22): 1-9.
- [6] HU C, CAI Z, ZHANG Y, et al. A soft actor-critic deep reinforcement learning method for multi-timescale coordinated operation of microgrids[J]. *Protection and Control of Modern Power Systems*, 2022, 7(3): 423-432.
- [7] XU Y, LIU C, SCHNEIDER K P, et al. Microgrids for service restoration to critical load in a resilient distribution system[J]. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 2018, 9(1): 426-437.
- [8] 张熙, 程小华, 曾君, 等. 基于动态规划与最优流模式的微网孤岛重构[J]. *电网技术*, 2020, 44(12): 4608-4616.
- ZHANG Xi, CHENG Xiaohua, ZENG Jun, et al. Microgrid island reconfiguration based on dynamic programming method and optimal flow pattern[J]. *Power System Technology*, 2020, 44(12): 4608-4616.
- [9] 金甚达, 范春菊, 郭雅蓉, 等. 考虑分布式逆变电源特性的距离 II 段自适应保护整定方案[J]. *电力系统保护与控制*, 2022, 50(23): 41-50.
- JIN Shenda, FAN Chunju, GUO Yarong, et al. Adaptive distance section protection setting scheme considering the characteristics of an inverter-interfaced distributed generator[J]. *Power System Protection and Control*, 2022, 50(23): 41-50.
- [10] 孟强, 牟龙华, 许旭锋, 等. 孤立微电网的黑启动策略[J]. *电力自动化设备*, 2014, 34(3): 59-64.
- MENG Qiang, MU Longhua, XU Xufeng, et al. Black-start strategy of isolated microgrid[J]. *Electric Power Automation Equipment*, 2014, 34(3): 59-64.
- [11] 刘英培, 侯亚欣, 梁海平, 等. 一种适用于黑启动的光储联合发电系统协调控制策略[J]. *电网技术*, 2017, 41(9): 2979-2986.
- LIU Yingpei, HOU Yaxin, LIANG Haiping, et al. A coordinated control strategy of PV battery-energy storage hybrid power system for black start[J]. *Power System Technology*, 2017, 41(9): 2979-2986.
- [12] LI J H, YOU H F, QI J, et al. Stratified optimization strategy used for restoration with photovoltaic-battery energy storage systems as black-start resources[J]. *IEEE Access*, 2019, 7: 127339-127352.
- [13] 李军徽, 尤宏飞, 李翠萍, 等. 基于模型预测控制的风光储黑启动功率协调策略[J]. *电网技术*, 2020, 44(10): 3700-3708.
- LI Junhui, YOU Hongfei, LI Cuiping, et al. Power coordination strategy based on model predictive control for black start with PV-wind-battery system[J]. *Power System Technology*, 2020, 44(10): 3700-3708.
- [14] 桑顺, 齐琛, 张新松, 等. 永磁直驱风电机组的构网型控制与黑启动[J]. *电网技术*, 2022, 46(8): 3168-3180.
- SANG Shun, QI Chen, ZHANG Xinsong, et al. Grid-forming control and black start of PMSG-based direct-driven wind turbine[J]. *Power System Technology*, 2022, 46(8): 3168-3180.
- [15] 杨智豪, 牟龙华, 刘仲, 等. 微电网黑启动中考虑 DG 特性与线路投入顺序的串行恢复策略[J]. *电力系统保护与控制*, 2016, 44(18): 17-23.
- YANG Zhihao, MU Longhua, LIU Zhong, et al. A serial restoration strategy considering characteristics of DG and line restoration sequence for black start of microgrid[J]. *Power System Protection and Control*, 2016, 44(18): 17-23.
- [16] 刘洁. 基于多智能体系统的混合微电网黑启动研究[D]. 济南: 山东大学, 2018.
- LIU Jie. Research on the black start of hybrid micro grid based on multi-agent system[D]. Jinan: Shandong University, 2018.
- [17] 林加阳, 周伟豪, 易永利, 等. 含有大量感性负荷的海岛微电网黑启动优化策略[J]. *重庆大学学报*, 2021, 44(8): 76-90.
- LIN Jiayang, ZHOU Weihao, YI Yongli, et al. Black start

- optimization strategy for island microgrid with large number of inductive load[J]. Journal of Chongqing University, 2021, 44(8): 76-90.
- [18] YAN D, DI W. Deep reinforcement learning from demonstrations to assist service restoration in islanded microgrids[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2022, 13(2): 1062-1072.
- [19] 李明明, 孙磊, 丁明. 考虑系统恢复能力的快速切负荷机组最优布点策略[J]. 电力系统保护与控制, 2023, 51(5): 84-95.
LI Mingming, SUN Lei, DING Ming. An optimal location on strategy of units with FCB function considering the restorability of power systems[J]. Power System Protection and Control, 2023, 51(5): 84-95.
- [20] 谢小瑜, 周俊煌, 张勇军, 等. 基于 W-BiLSTM 的可再生能源超短期发电功率预测方法[J]. 电力系统自动化, 2021, 45(8): 175-184.
XIE Xiaoyu, ZHOU Junhuang, ZHANG Yongjun, et al. W-BiLSTM based ultra-short-term generation power prediction method of renewable energy[J]. Automation of Electric Power Systems, 2021, 45(8): 175-184.
- [21] 顾雪平, 白岩松, 李少岩, 等. 电力系统黑启动恢复问题的研究评述[J]. 电工技术学报, 2022, 37(13): 3183-3200.
GU Xueping, BAI Yansong, LI Shaoyan, et al. Research review of power system black-start restoration[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2022, 37(13): 3183-3200.
- [22] 周吟雨, 董厚琦, 曾博, 等. 考虑灵活性潜力的互联网数据中心与配电网双层协同规划方法[J]. 电力系统保护与控制, 2022, 50(24): 49-59.
ZHOU Yinyu, DONG Houqi, ZENG Bo, et al. Bi-level approach to internet data-center and distribution network collaborative planning considering the potential of flexibilities[J]. Power System Protection and Control, 2022, 50(24): 49-59.
- [23] CAI S, XIE Y, WU Q, et al. Robust coordination of multiple power sources for sequential service restoration of distribution systems[J]. International Journal of Electrical Power and Energy Systems, 2021, 131.
- [24] 王守相, 陈思佳, 谢颂果. 考虑安全约束的交直流配电网储能与换流站协调经济调度[J]. 电力系统自动化, 2017, 41(11): 85-91.
WANG Shouxiang, CHEN Sijia, XIE Songguo. Security-constrained coordinated economic dispatch of energy storage systems and converter stations for AC/DC distribution network[J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(11): 85-91.
- [25] 王子欣, 苗世洪, 郭舒毓, 等. 考虑分布式电源出力随机特性的配电网节点脆弱性评估[J]. 电力自动化设备, 2021, 41(8): 33-40.
WANG Zixin, MIAO Shihong, GUO Shuyu, et al. Node vulnerability evaluation of distribution network considering randomness characteristic of distributed generation output[J]. Electric Power Automation Equipment, 2021, 41(8): 33-40.
- [26] 赵昱宣, 孙磊, 林振智, 等. 微网作为黑启动电源的电力系统网架重构优化策略[J]. 电力系统自动化, 2018, 42(17): 9-17, 147.
ZHAO Yuxuan, SUN Lei, LIN Zhenzhi, et al. Power network reconfiguration strategy with microgrids as black-start power sources[J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(17): 9-17, 147.
- [27] 龚钢军, 张哲宁, 张心语, 等. 分布式信息能源系统的耦合模型、网络架构与节点重要度评估[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(17): 5412-5426.
GONG Gangjun, ZHANG Zhening, ZHANG Xinyu, et al. Coupling model, network architecture and node importance evaluation of distributed information energy system[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(17): 5412-5426.
- [28] 冯丽, 金黎明, 张同尊, 等. 考虑恢复路径充电时间的机组启动次序决策方法[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(18): 4904-4910, 5114.
FENG Li, JIN Liming, ZHANG Tongzun, et al. A new method to determine non-black-start units restoration sequence with consideration of charging time of restoration paths[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(18): 4904-4910, 5114.
- [29] 张开举. 弹性微电网的恢复力评估理论与故障恢复方案研究[D]. 济南: 山东大学, 2021.
ZHANG Kaiju. Research on resilience assessment theory and fault restoration strategy of resilience microgrid[D]. Jinan: Shandong University, 2021.

收稿日期: 2023-01-16; 修回日期: 2023-06-13

作者简介:

何立钢(1998—), 男, 硕士研究生, 研究方向为微电网黑启动恢复方法; E-mail: hlg4869@hust.edu.cn

苗世洪(1963—), 男, 通信作者, 博士, 教授, 博士生导师, 研究方向为电力系统保护与控制、配电网与微电网新技术、电网智能调度与自动化技术、压缩空气储能建模及应用。E-mail: shmiao@hust.edu.cn

(编辑 许威)