

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.231547

含分布式储能系统的交直流配电网动态故障恢复策略

李英量¹, 孙楠¹, 王德明², 郭飞燕¹, 李飞¹

(1. 西安石油大学电子工程学院, 陕西 西安 710065; 2. 陕西铁路工程职业技术学院, 陕西 渭南 714000)

摘要: 在多故障场景下, 考虑到故障抢修时间差异、分布式电源出力和负荷需求时变性对交直流配电网故障恢复策略的影响, 提出了一种面向多故障场景的交直流配电网动态故障恢复策略。对含分布式储能系统的交直流配电网, 首先采用分阶段孤岛划分策略以实现失电区的紧急供电。随后, 以故障恢复综合满意度指标的最大化为目标, 综合考虑了交直流潮流约束、节点电压约束、支路载流量约束和电能约束等多重约束条件。同时, 结合故障抢修的进度以及分布式电源出力、负荷需求等因素, 确定最优的故障恢复策略。最后, 通过对 IEEE33 节点系统改造的交直流配电网模型进行算例分析。结果表明, 所提出的动态故障恢复策略有效解决了交直流配电网的故障问题。并能根据实时信息对故障恢复策略进行灵活调整, 保证了交直流配电网运行的可靠性和安全性。

关键词: 交直流配电网; 故障恢复; 动态策略; 交直流潮流; 综合满意度

A dynamic fault recovery strategy for an AC/DC distribution network with distributed energy storage system

LI Yingliang¹, SUN Nan¹, WANG Deming², GUO Feiyan¹, LI Fei¹

(1. School of Electronic Engineering, Xi'an Shiyou University, Xi'an 710065, China;

2. Shaanxi Railway Institute, Weinan 714000, China)

Abstract: When there are multiple faults, then considering the impact of differences in fault repair times, and the variability in distributed power generation and dynamic changes in load demands on the fault recovery strategy for AC/DC distribution networks, this paper proposes a dynamic fault recovery strategy tailored to such scenarios. For AC/DC distribution networks with distributed energy storage systems, an emergency power supply is achieved through a staged islanding strategy for blackout areas. Subsequently, with the maximization of the comprehensive satisfaction index for fault recovery as the objective, it comprehensively addresses multiple constraints, including AC/DC power flow, node voltage, branch current, and energy constraints. Concurrently, the optimal fault recovery strategy is determined by integrating the progress of fault repairs with factors such as distributed power generation and load demands. Finally, a case study is carried out on a modified IEEE 33-bus system representing an AC/DC distribution network. The results demonstrate the effectiveness of the proposed dynamic fault recovery strategy in resolving faults. The strategy allows for flexible adjustments to the fault recovery approach based on real-time information, ensuring the reliability and safety of the AC/DC distribution network operation.

This work is supported by the Natural Science Basic Research Program of Shaanxi Province (No. 2024JC-YBMS-405).

Key words: AC/DC distribution network; fault recovery; dynamic strategy; AC/DC power flow; comprehensive satisfaction

0 引言

在加快构建新型电力系统的背景下, 电力系统

基金项目: 陕西省自然科学基金基础研究计划项目资助 (2024JC-YBMS-405); 西安市科技计划项目资助 (2024JH-GXFW-0165); 国家重点研发计划项目资助 (2023YFC2810902); 西安石油大学研究生创新基金项目资助 (YCX2413088)

正在进入交直流混联区域大电网与融合了多种电力电子装置的微网并存的时代^[1-2]。与传统的交流配电网相比, 交直流配电网的网架结构更灵活, 源荷类型更多样, 其内部的电力电子设备也更复杂。这些差异为交直流配电网带来了供电效率高、线路损耗低和功率传输灵活等优势, 但同样也提高了网络安全可靠运行的难度^[3-5]。

设置灵活高效的故障恢复策略是提高配电网可

靠性的一种重要手段^[6-7]，尤其是在应对极端情况时，这一目标可通过将故障恢复问题转化为多目标、多约束的规划问题并利用随机优化算法进行求解^[8-10]来实现。随着配电网内的分布式电源渗透率不断提升，一些学者将分布式电源融入到配电网故障恢复体系中^[11-14]，以减少故障造成的停电损失，但分布式电源并网带来的电压波动和电压越限等问题不容忽视^[15-16]。在这种情况下，更适宜接入分布式电源的交直流配电网具有更高的研究价值，其特殊的网架结构具有不同的电气特性，在处理配电网故障恢复问题时也表现出新的特点，因此有必要对交直流配电网的故障恢复问题进行深入研究。

目前关于交直流配电网的故障恢复问题主要聚焦于研究其与传统的交流配电网之间的差异，包括二者在目标函数以及约束条件上的异同^[17]，以及交直流配电网内直流运行方式对故障恢复策略的影响^[18]。同时，借助交直流配电网灵活的网络结构以及供电方式等优势来确定故障恢复策略^[19-20]也是研究的重点之一。这些研究大多未充分考虑分布式电源出力与负荷需求的时序特性，以及实时故障信息对交直流配电网故障恢复方案的影响。

在交直流配电网故障恢复问题中，源荷时变性与实时故障信息不容忽视。例如，文献^[21]考虑一天内分布式电源和负荷变化的实时数据，并通过软开关设置了交直流配电网重构方案，成功降低了网络的功率损耗，证明了时变性和对交直流配电网运行存在一定影响。文献^[22]提出考虑分布式电源和负荷需求时变性的故障恢复方案，证明了这二者的时变性能会对配电网故障恢复产生重要影响。文献^[23]考虑分布式电源出力的波动性以及负荷需求的时变性，提出一种动态修复模型，验证了其可行性，但这种动态修复模型是基于多代理系统的分布式控制，无法充分利用配电网内的资源。文献^[24]建立的动态决策系统可应对不同故障时间的场景制定合适的恢复策略，相比离线决策系统使用更少的资源保证了供电恢复时间，提高了配电网对突发故障的应对能力，但其重点主要是根据故障信息实时调整恢复策略，而忽视了时变性，故其动态决策有一定漏洞。

综上所述，现有的交直流配电网故障恢复研究未充分考虑分布式能源和负荷需求的时变性以及故障信息的实时变化，未能充分发挥交直流配电网内灵活资源的作用。故本文针对含分布式储能系统的交直流配电网的故障恢复中实时故障信息变化以及故障时段内分布式电源出力和负荷需求的时变特性等问题，提出一种动态故障恢复策略。该策略以故障恢复综合满意度指标最大为目标，确定故障恢复

策略，随后根据交直流配电网各故障的恢复情况以及分布式电源和负荷需求的实时变化，对故障恢复策略进行动态调整，确保方案的可行性和实用性。最后通过模拟不同场景的故障恢复策略，验证所提方法能够在交直流配电网发生故障后快速形成负荷恢复策略，同时保证交直流配电网的稳定性。

1 交直流配电网

1.1 交直流配电网基本结构

为适应配电网的低碳化转型，交直流配电网需满足新型源荷(如光伏、风电、移动储能等)正在日益增加的接入需求。本文参照文献^[25]对现有交流配电网进行改造得到交直流配电网的结构，构建交直流配电网模型如图 1 所示，包含交流网络、直流网络、换流站 3 部分。

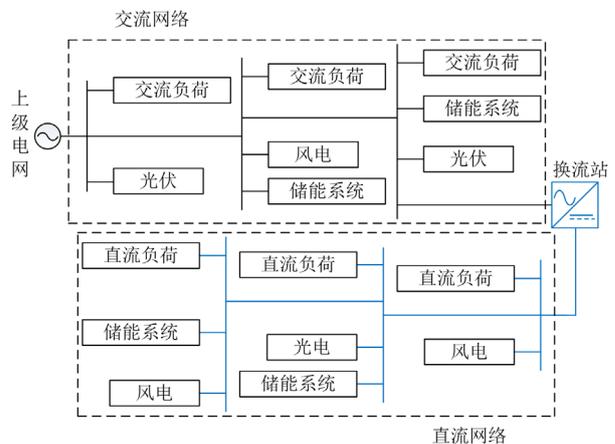


图 1 交直流配电网示意图

Fig. 1 Schematic diagram of AC/DC distribution network

交直流配电网整体上以交流网络为中心，通过交流部分接入上级电网对整个配电网进行供电，直流网络与交流网络之间则通过换流站进行连接。

1.2 换流站

作为直流电与交流电互相转换的枢纽，换流站是交直流配电网稳定运行的核心，目前换流站中两种主流的换流器类型为电网换相换流器(line-commutated converter, LCC)以及电压源换流器(voltage source converter, VSC)两类^[26]。

LCC 借助晶闸管在交流电压下的开断实现换流，具有耐高压和换流损耗小等优点。然而，考虑到 LCC 对交流网络依赖程度高，它不适合应用在需要面对配电网故障情况的网络的换流站中。因此，本文选择使用 VSC 作为交直流配电网的换流站。VSC 在交流网络发生故障时仍可独立运行，向孤岛供电，且基于绝缘栅双极型晶体管的 VSC 可以实现

电流的双向流动, 便于构成多端网络, 提高配电网在发生故障时的供电可靠性。

1.3 问题描述

交直流配电网作为未来配电网发展的重要形态, 其特殊的网络结构具有的电气特性在处理配电网故障恢复问题上也表现出来新的特点。本文研究含分布式储能系统的交直流配电网中日内故障处理及其对故障恢复的影响。为突出问题的主要矛盾, 做以下假设:

- 1) 交直流配电网为集中式控制, 可通过调度中心对换流站、储能装置以及开关进行实时控制, 调度中心可准确预测配电网内分布式电源出力数据和负荷数据。
- 2) 交直流配电网交流部分线路参数三相对称。
- 3) VSC 采用主从控制方式, 由主线路上换流站对直流侧进行电压调节。
- 4) 系统内故障均为永久性故障, 须人为检修。

2 分阶段孤岛划分策略

交直流配电网内发生多点故障后, 会导致大范围的断电, 为保障配电网供电可靠性, 降低故障损失, 可通过孤岛划分引导系统内的光伏、风力发电等可调度资源作为临时电源。

2.1 初级孤岛划分

孤岛划分是将配电网划分为若干部分, 借助分布式电源为无法与主网联络的节点进行供电。初级孤岛划分的目的是在故障后第一时间恢复供电。

尽管接入分布式电源的交直流配电网是配电网形态转变的必经之路, 但由于大容量的分布式电源并入会增加运行控制的难度, 且考虑到装设成本等因素, 无法无限制地增加分布式电源容量。因此, 交直流配电网内的分布式电源无法为所有失电负荷提供持续的供电。为提高初级孤岛划分效率, 需要确定分布式电源的最大供电范围。

可以选择分布式电源接入节点为根节点, 利用深度优先算法进行搜索来确定最大供电范围。结果应满足节点关系约束, 即孤岛内节点的上一级节点一定属于该孤岛, 对每次搜索到的节点进行标记, 当搜索至不存在未标记节点时, 算法终止。

在得到最大供电范围后, 根据电能约束得到供电范围内的所有初级孤岛划分组合。

电能约束: 即节点 i 处光伏、风电以及储能放电的总和应大于以节点 i 为根节点的孤岛的用电负荷总量, 如式(1)所示。

$$W_i = W_{pv,i} + W_{wt,i} + W_{ess,i} - W_{lose,i} \geq 0 \quad (1)$$

式中: W_i 为节点 i 处电能盈余, 即节点 i 的供电能力超出孤岛用电负荷需求的部分; $W_{pv,i}$ 、 $W_{wt,i}$ 、 $W_{ess,i}$ 分别为故障时段内节点 i 的光伏、风电以及储能所释放的电能; $W_{lose,i}$ 为故障时段内以节点 i 为根节点的供电线路消耗的电能。

2.2 次级孤岛划分

孤岛划分要保证孤岛内节点在故障时段的电能供应, 即在最大供电范围下划分的初级孤岛仍可满足电能供应。但初级孤岛仅考虑了电能缺额, 未充分考虑如何确保各失电节点的电源为最优电源。

次级孤岛划分是在初级孤岛的基础上, 寻找最大供电范围内存在多个电源的失电节点, 比较各电源与失电节点之间的电气距离。

$$Z_{mn} = \sum_{m \in M} R_{mn} + jX_{mn} \quad (2)$$

式中: Z_{mn} 为供电线路的阻抗; R_{mn} 、 X_{mn} 分别为线路 mn 的电阻和电抗; M 为失电节点与电源之间线路的集合。

优先将失电节点划分到电气距离小的电源孤岛中。最终将确认最优电源后的孤岛方案进行孤岛可行性校验, 以确定次级孤岛划分方案。

分阶段孤岛划分策略的整体流程图如图 2 所示。

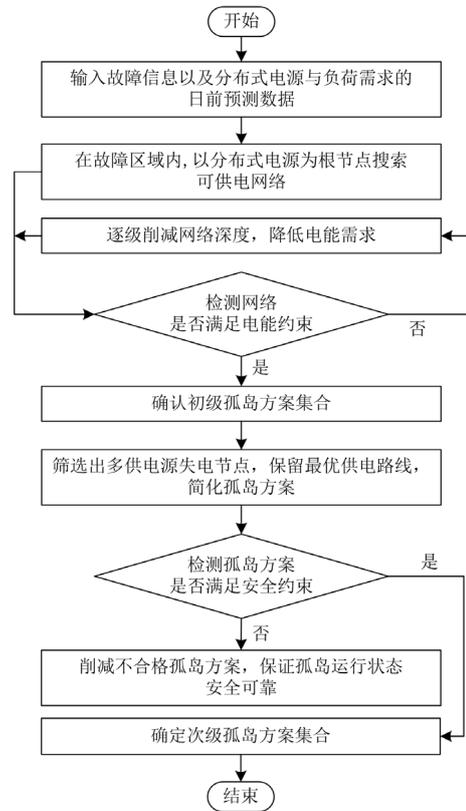


图 2 分阶段孤岛划分策略流程图

Fig. 2 Phased islanding partitioning strategy flowchart

2.3 孤岛可行性校验

确定连接多电源节点的最优电源后,可实现在故障时段内对失电节点最大限度供电。然而,目前的孤岛方案在划分时仅考虑了电能约束以及电气距离最小,而没有考虑节点电压、线路载流量等安全约束。故需要在确认最优电源后对其进行潮流计算,确保孤岛的安全运行。以每个孤岛的根节点作为平衡节点进行计算,如果出现超出约束的数据,则切除线路末端负荷再重新进行计算,以确保线路的平稳运行。

3 交直流配电网动态故障恢复策略

3.1 综合满意度指标

为了兼顾配电网恢复能力和电能质量,采用故障恢复综合满意度指标来评估恢复方案,以重构后交直流配电网的恢复供电量、节点电压偏差以及网络损耗对恢复方案做出总体评估。多目标的综合满意度指标目标函数 F 如式(3)所示。

$$F = \sum_{x=1}^3 \lambda_x f_x \quad (3)$$

式中: λ_x 为目标 x 的权重系数; f_x 为目标 x 的评估值。

子目标一 f_1 用以评价方案对失电负荷整体的恢复程度。

$$f_1 = W_{\text{re}} / W_{\text{lose}} \quad (4)$$

$$W_{\text{re}} = \int_{t_s}^{t_e} P_{\text{re}}(t) dt \quad (5)$$

$$W_{\text{lose}} = \int_{t_s}^{t_e} P_{\text{lose}}(t) dt \quad (6)$$

$$P_{\text{re}}(t) = \sum_{i \in N_{\text{re}}} P_{\text{load},i}(t) \quad (7)$$

$$P_{\text{lose}}(t) = \sum_{i \in N_{\text{lose}}} P_{\text{load},i}(t) \quad (8)$$

式中: W_{re} 为方案故障时段总恢复供电量; W_{lose} 为故障时段总失电量; t_s 为故障发生时刻; t_e 为故障恢复时刻; $P_{\text{re}}(t)$ 为 t 时刻配电网总恢复供电量; $P_{\text{lose}}(t)$ 为 t 时刻配电网总失电量; $P_{\text{load},i}(t)$ 为 t 时刻节点 i 的负荷; N_{re} 为恢复供电节点的集合; N_{lose} 为所有因故障导致失电节点的集合。

子目标二 f_2 用以评估恢复后配电网整体电压水平的影响。

$$f_2 = 1 - \sigma(V) \quad (9)$$

$$\sigma(V) = \sqrt{(V - \bar{V})^2 / N} \quad (10)$$

式中: σ 为均方差,表示各数据偏离平均数的距离的平均数; V 为交直流配电网各节点的电压幅值; \bar{V} 为各节点电压幅值的算术平均值; N 为总节点数。

子目标三 f_3 用以评价方案对配电网网络损耗的影响。

$$f_3 = 1 - (P_{\text{loss}} - P'_{\text{loss}}) / P_{\text{loss}} \quad (11)$$

$$P_{\text{loss}} = P_{\text{loss}}^{\text{ac}} + P_{\text{loss}}^{\text{dc}} + P_{\text{loss}}^{\text{vsc}} \quad (12)$$

$$P_{\text{loss}}^{\text{ac}} = \sum_{a \in M_{\text{ac}}} [P_a^2 + Q_a^2] R_a / V_a^2 \quad (13)$$

$$P_{\text{loss}}^{\text{dc}} = \sum_{b \in M_{\text{dc}}} P_b^2 R_b / V_b^2 \quad (14)$$

$$P_{\text{loss}}^{\text{vsc}} = \sum_{c \in M_{\text{vsc}}} (1 - \eta_c) P_c \quad (15)$$

式中: P_{loss} 为故障前网络损耗; P'_{loss} 为重构后网络损耗; $P_{\text{loss}}^{\text{ac}}$ 、 $P_{\text{loss}}^{\text{dc}}$ 和 $P_{\text{loss}}^{\text{vsc}}$ 分别为交流网络损耗、直流网络损耗和换流站损耗; P_a 、 Q_a 、 R_a 和 V_a 分别为第 a 条交流线路的有功功率、无功功率、电阻和电压; P_b 、 R_b 和 V_b 分别为第 b 条直流线路的有功功率、电阻和电压; η_c 和 P_c 分别为第 c 条换流支路的换流效率和有功功率; M_{ac} 、 M_{dc} 和 M_{vsc} 分别为交流支路、直流支路和换流站的集合。

3.2 约束条件

交直流配电网因其内部复杂的网络结构导致各部分具有不同的电气特性,故其故障恢复模型的约束条件也不尽相同。

1) 网络拓扑约束

交直流配电网的交流部分需满足拓扑约束,确保其为放射状网络,不会出现环流而损伤设备。而直流部分具有灵活的网络结构,环状结构、放射状结构、两端供电结构均可。

$$g \in G \quad (16)$$

式中: g 为交直流配电网交流部分的拓扑结构; G 为交流部分所有放射状拓扑结构的集合。

2) 支路载流量约束

$$P_a^2 + Q_a^2 \leq (S_a^{\text{max}})^2 \quad a \in M_{\text{ac}} \quad (17)$$

$$-S_b^{\text{max}} \leq P_b \leq S_b^{\text{max}} \quad b \in M_{\text{dc}} \quad (18)$$

式中: S_a^{max} 为第 a 条交流支路的最大载流量; S_b^{max} 为第 b 条直流线路的最大载流量。

3) 节点电压约束

$$V_{i,\text{ac}}^{\text{min}} \leq V_{i,\text{ac}} \leq V_{i,\text{ac}}^{\text{max}} \quad (19)$$

$$V_{j,\text{dc}}^{\text{min}} \leq V_{j,\text{dc}} \leq V_{j,\text{dc}}^{\text{max}} \quad (20)$$

式中: $V_{i,\text{ac}}$ 为交流节点 i 的节点电压; $V_{i,\text{ac}}^{\text{min}}$ 和 $V_{i,\text{ac}}^{\text{max}}$ 分别为交流节点 i 的节点电压下限和上限; $V_{j,\text{dc}}$ 为直流节点 j 的节点电压; $V_{j,\text{dc}}^{\text{min}}$ 和 $V_{j,\text{dc}}^{\text{max}}$ 分别为直流节点 j 的节点电压下限和上限。

4) 系统潮流约束

交流部分潮流约束为

$$P_{is} - V_i \sum_{j \in N_i} V_j (G_{ij} \cos \theta_{ij} + B_{ij} \sin \theta_{ij}) = 0 \quad (21)$$

$$Q_{is} - V_i \sum_{j \in N_i} V_j (G_{ij} \sin \theta_{ij} + B_{ij} \cos \theta_{ij}) = 0 \quad (22)$$

式中: P_{is} 和 Q_{is} 分别为节点 i 给定的有功功率和无功功率; V_i 和 V_j 分别为节点 i 和 j 的电压幅值; θ_{ij} 为节点 i 、 j 之间的电压相角差; G_{ij} 和 B_{ij} 分别为节点 i 、 j 之间的电导和电纳; N_i 为所有与节点 i 直接相连的节点集合。

直流部分潮流约束为

$$P_{is} - V_i \sum_{j \in N_i} V_j (G_{ij} \cos \theta_{ij} + B_{ij} \sin \theta_{ij}) \pm V_k I_k = 0 \quad (23)$$

式中: “ \pm ” 中的正、负号分别对应逆变器与整流器; V_k 和 I_k 分别为换流器 k 的电压与电流。

3.3 动态故障恢复策略

当交直流配电网内发生永久性故障后, 先确认故障信息, 在隔离故障点后, 按照分阶段孤岛划分策略, 寻求一种在保持原有拓扑结构不变的前提下, 能够最大限度地恢复失电区域负荷的孤岛划分方案。对该方案进行可行性检验, 确定方案可行后, 再进行综合满意度指标计算。得到在基础网络结构下, 以综合满意度指标最大为目标的最优孤岛方案, 以此为基准, 开始下一阶段的网络重构。

本文提出的交直流配电网动态故障恢复策略是以最大程度恢复失电区域为首要目标, 故重构网络的恢复程度不应低于在保持原拓扑结构不变时所能达到的恢复效果。在重构网络中再次进行分阶段孤岛划分、可行性检验、综合评价指标计算等流程, 最终保留最优拓扑结构下的最优孤岛划分方案作为当前故障状态下的临时供电方案。

交直流配电网动态故障恢复策略框架如图 3 所示, 图中展示了在故障恢复中信息的流动情况。

3.4 求解算法

在确定最优孤岛方案后, 需要通过配电网重构来调整网络拓扑结构, 以使灵活资源发挥出更大作用。由于不同拓扑结构之间的效果是离散的、非线性的, 且要使用 0-1 状态来表示联络开关的开合, 故选用离散二进制粒子群算法来求解模型, 在保证全局寻优能力的基础上, 还具有易实现、鲁棒性强等特点。

离散二进制粒子群算法中的变异机制是粒子摆脱局部最优陷阱的关键。求解具体过程如下。

Step1: 输入参数及约束条件;

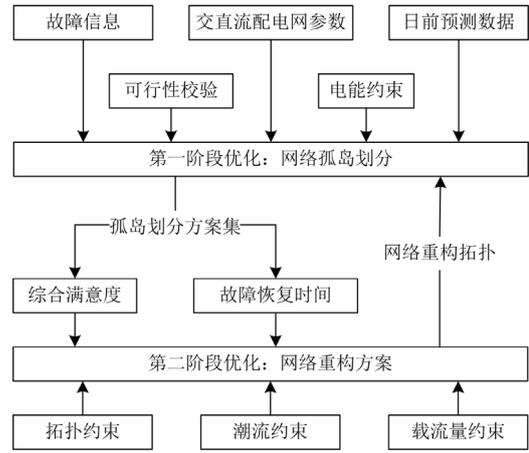


图 3 交直流配电网动态故障恢复策略框架图

Fig. 3 Dynamic fault recovery strategy framework diagram of AC/DC distribution network

Step2: 随机生成粒子群(粒子维度为故障前支路数减去故障支路数);

Step3: 针对每个粒子生成一组数量与其维度相同的 0 到 1 间的随机数, 若小于 0.05, 则变异;

Step4: 检测是否满足所有约束条件, 若不满足转到 Step2, 若满足则继续下一步;

Step5: 更新粒子群适应度, 更新局部最优组合和全局最优组合;

Step6: 检测是否达到迭代次数, 若达到迭代次数则转到 Step8, 输出结果, 否则进行下一步;

Step7: 检测全局最优组合是否变化, 未变化则转到 Step3, 变化则更新粒子状态与速度, 转到 Step4;

Step8: 输出重构后的网络拓扑结构。

4 算例分析

4.1 算例设置

本文以文献[27]中配置的含分布式储能系统的 49 节点交直流配电网为例, 对所建立的交直流配电网动态故障恢复策略进行验证。整个网络以 IEEE33 节点算例系统为基础, 在各线路末端装设 VSC 及直流支路, 接入 8 组分布式光伏与 4 组储能系统, 各元件接入位置及参数见表 1, 网络拓扑如图 4 所示, 系统负荷及光伏出力曲线与文献[27]相同。

4.2 仿真验证

假设交直流配电网在 14:00 时线路 8-9、28-29、47-48 发生故障, 故障修复耗时分别为 1.25 h、2.5 h、4 h。以 15 min 为一个时段使用本文的动态故障恢复策略, 故障恢复过程网络变化如下所述。

表 1 各元件接入位置及参数

Table 1 Access position and parameters of each component

接入位置	元件类型	额定容量	功率因数	无功补偿 区间/kvar
13、21、24、32、 36、41、49	VSC	2 MVA	—	[-300, 300]
17、30	光伏	50 kW	0.95	—
34、36、40、 45、47、49	光伏	100 kW	0.95	—
35、48	储能	1800 kW	—	—
39、44	储能	1400 kW	—	—

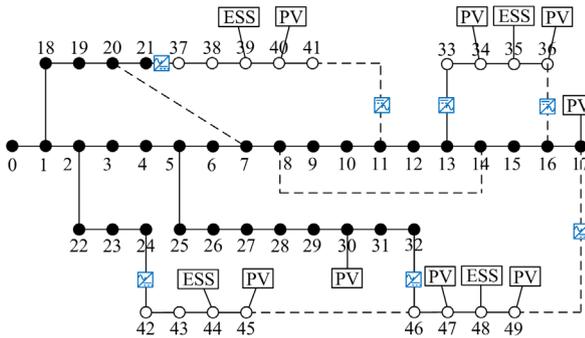


图 4 交直流配电网拓扑图

Fig. 4 AC/DC distribution network topology

1) I 阶段

故障初期，配电网整体情况如图 5 所示，其中红色虚线内为网络失电区，失电率为 42.85%。I 阶段对故障网络进行紧急供电并重构网络保证供电可靠性，首先通过分阶段孤岛划分策略紧急恢复供电，孤岛供电网络如图 6 所示，34、35、36 节点的光伏与储能系统为失电节点 12、13、14、33、34、35、36 进行临时供电，受放电功率上限影响，供电范围无法扩大至更远的节点，17、30、47 节点的光伏出力仅能保证其接入位置的供电恢复，48、49 节点的光伏与储能系统因 47-48 线路故障只能恢复 48、49 节点供电。在该孤岛划分方案下，失电率降至 18.36%。

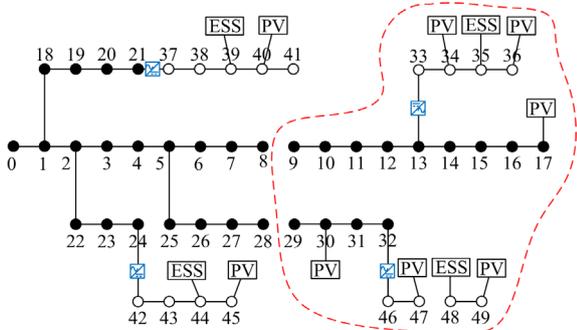


图 5 I 阶段故障网络

Fig. 5 Faulty distribution network during I stage

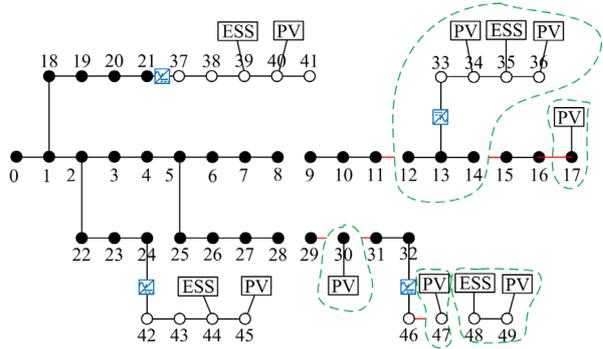


图 6 I 阶段孤岛供电网络

Fig. 6 Islanded distribution network during I stage

然后以孤岛划分恢复供电的结果为基准进行网络重构，重构结果如图 7 所示，闭合联络开关，通过联络线路 41-11、17-49、45-46 使所有负荷恢复供电，不需要通过孤岛供电。

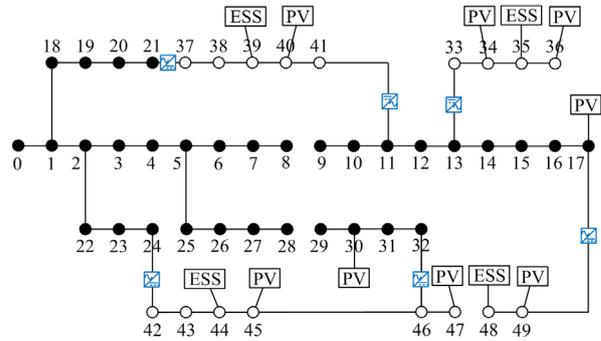


图 7 I 阶段重构网络

Fig. 7 Reconfigured network during I stage

2) II 阶段

在 I 阶段对故障网络进行重构保证可靠供电后，由重构网络进行暂时供电，直至网络故障修复情况变化。II 阶段对网络故障修复情况变化后的网络再次进行重构，以达到更高的综合满意度指标，即在保证配电网可靠供电的前提下，追求更高的电能质量。

首先线路 8-9 处故障修复完成，将更新后的网络故障情况作为算法迭代寻优的初始条件，最终得到如图 8 所示的重构网络，即闭合线路 8-9，断开联络线路 41-11。

其后线路 28-29 及线路 47-48 的故障修复完成，也按上述方法更新故障情况，进行迭代寻优，最终交直流配电网的网络结构如图 9 所示。

4.3 不同情景下故障恢复效果

为体现含分布式储能系统的交直流配电网对故障恢复问题的作用，本文设计 3 种情景进行仿真分析。

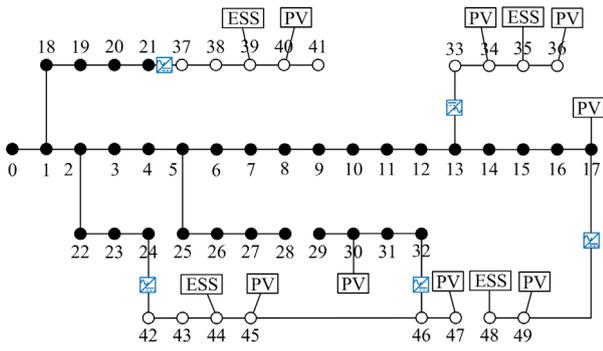


图 8 II 时段重构网络

Fig. 8 Reconfigured network during II stage

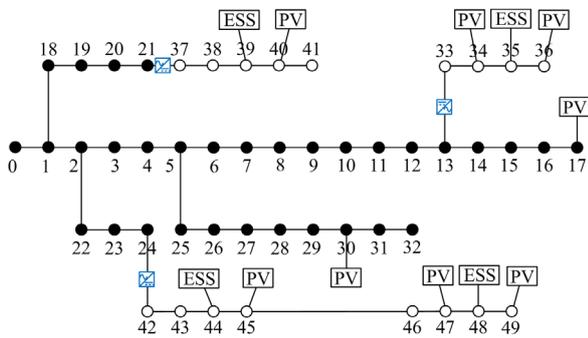


图 9 最终交直流配电网拓扑图

Fig. 9 Final AC/DC distribution network topology

情景 1: 将 IEEE33 节点系统扩展为 49 节点交流配电网。

情景 2: 在情景 1 基础上接入分布式电源及储能系统。

情景 3: 将情景 2 配电网改造为交直流配电网。

通过对比这 3 种情景在面对相同故障时不同阶段的恢复情况, 来验证含分布式储能系统的交直流配电网在故障恢复时更优的恢复效果。

设置故障发生时间为 15:00, 故障发生位置为线路 6-7、20-21 以及 40-41, 故障修复耗时分别为 45 min、1.5 h、2.25 h。这 3 种情景下故障恢复过程中恢复情况如表 2 所示。

表 2 不同情景下故障恢复效果

Table 2 Failure recovery effect in different scenarios

情景	失电率/%	I 阶段失电率变化/%	II 阶段综合指标变化
1	42.85	42.85→10.21	0.7157→0.7392→0.8091→0.8215
2	42.85	42.85→18.37→0	0.7807→0.8018→0.8144→0.8228
3	42.85	42.85→14.29→0	0.8023→0.8326→0.8299→0.8373

从表 2 可以看出, 相同故障对于各种情景下的配电网影响是相同的, 但从 I 阶段和 II 阶段的配电网故障恢复过程中可以体现出 3 种情景的配电网的

差异。

通过分析 I 阶段失电率变化数据可知, 情景 1 中失电率的改变是一步完成但不彻底的, 而情景 2 和情景 3 则是渐进且彻底的, 这是由于后两者拥有分布式电源与储能系统, 可以承担临时供电的任务, 在面对较为极端的情况下有一定的抵抗能力, 而情景 1 则不具备这种能力, 故会出现重构网络后仍不能满足失电区所有负荷的供电需求。从 I 阶段失电率变化还可以看到情景 2 与情景 3 在由分布式电源与储能系统进行临时供电时所达到的效果不同, 这是由于情景 3 中有直流线路, 在直流线路上可装设更大容量的分布式电源和储能系统。

从 II 阶段综合指标变化可以看出, 不同情景下配电网的故障恢复效果从高到低排列为情景 3、情景 2、情景 1。在 II 阶段初期, 情景 1 明显比情景 2 综合指标低, 这是由于情景 1 无法完全恢复失电区域, 而后在故障逐渐修复过程中, 其失电区最后也完全恢复, 故两者最后综合满意度指标相近。情景 1 和情景 2 在最终优化得到的综合满意度指标低于情景 3, 这是由于后者有一部分是经过改造的直流线路, 这部分的网损较低, 所以综合满意度指标得到了提升。

4.4 结果分析

根据以上分析可知, 本文提出的动态故障恢复策略可以满足各种情景下的故障恢复需求。且从不同情景下的故障恢复效果对比可以看出, 面对相同故障时含分布式储能系统的交直流配电网的效果是最好的。分布式储能系统对于故障网络的临时支撑能力、直流线路可容纳更大容量的分布式储能系统并具有较高的网络损耗, 这些因素共同为配电网的故障恢复带来了更加积极且显著的效益。

5 结论

本文提出的含分布式储能系统的交直流配电网动态故障恢复策略, 适用于有特殊电气运行特性的交直流配电网。该策略建立了考虑换流站损耗以及直流网损的故障恢复模型, 并计及其直流部分的潮流、载流量等约束, 可以解决交直流配电网的故障恢复问题。此外, 针对实时故障信息以及故障时段内分布式电源出力和负荷需求的时变特性对故障恢复策略的影响, 将故障恢复策略动态化, 能够适应各种场景下的故障情形。仿真算例表明, 本文的动态故障恢复策略对于故障情形复杂的场景, 可以有效提高故障恢复综合满意度, 确保恢复方案的实时适用性。

参考文献

- [1] 和敬涵, 李猛, 罗国敏, 等. 面向韧性提升的异构多源交直流配电网保护与故障恢复方法研究综述[J]. 供用电, 2019, 36(7): 2-7, 12.
HE Jinghan, LI Meng, LUO Guomin, et al. Review of protection and restoration methods for heterogeneous multi-source AC/DC distribution network facing resilience improvement[J]. Distribution & Utilization, 2019, 36(7): 2-7, 12.
- [2] 李幸芝, 韩蓓, 李国杰, 等. 考虑换流器伪量测建模的交直流混联电网状态估计方法[J]. 全球能源互联网, 2022, 5(3): 271-281.
LI Xingzhi, HAN Bei, LI Guojie, et al. Hybrid AC/DC networks state estimation considering pseudo measurement modeling of converters[J]. Journal of Global Energy Interconnection, 2022, 5(3): 271-281.
- [3] 张兆云, 林璞, 王星华. 交直流混合配电网继电保护研究综述[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(5): 179-187.
ZHANG Zhaoyun, LIN Pu, WANG Xinghua. Review on relay protection of AC/DC hybrid distribution grids[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(5): 179-187.
- [4] SABOUHI H, DOROUDI A, FOTUHI-FIRUZABAD M, et al. Hybrid AC/DC microgrids flexible reliability index by using the axiomatic design concept[J]. IET Generation Transmission & Distribution, 2020, 14(23): 5456-5462.
- [5] 汪洋, 杨仕伟, 王宝华, 等. 基于深度置信网络的交直流配电网直流故障检测技术[J]. 电力工程技术, 2023, 42(1): 251-259.
WANG Yang, YANG Shiwei, WANG Baohua, et al. DC fault detection technology for AC/DC distribution network based on DBN[J]. Electric Power Engineering Technology, 2023, 42(1): 251-259.
- [6] LI Yingliang, WANG Deming. Whole-line fault analysis method for unbalanced distribution networks with inverter interfaced distributed generators[J]. IET Generation, Transmission & Distribution, 2022(15): 3016-3026.
- [7] 石钺, 安锐, 高红均, 等. 基于柔性多状态开关和动态重构的配电网灵活运行方法[J]. 电力系统保护与控制, 2023, 51(22): 133-144.
SHI Cheng, AN Rui, GAO Hongjun, et al. Flexible operation method for a distribution network based on flexible multi-state switching and dynamic reconfiguration[J]. Power System Protection and Control, 2023, 51(22): 133-144.
- [8] ZIDAN A, KHAIRALLA M, ABDRABOU A M, et al. Fault detection, isolation, and service restoration in distribution systems: state-of-the-art and future trends[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2017, 8(5): 2170-2185.
- [9] 顾雪平, 李少岩, 周光奇, 等. 计及特级负荷恢复的网架重构分段全局优化方法[J]. 电工技术学报, 2017, 32(7): 138-149.
GU Xueping, LI Shaoyan, ZHOU Guangqi, et al. Global optimization by multi-time-stage coordination for network reconfiguration considering vital load restoration[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2017, 32(7): 138-149.
- [10] HAFEZ AA, OMRAN WA, HEGAZY Y G. A decentralized technique for autonomous service restoration active radial distribution networks[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2018, 9(3): 1911-1919.
- [11] 杨丽君, 赵宇, 赵优, 等. 考虑交通路网应急电源车调度的有源配电网故障均衡恢复[J]. 电力系统自动化, 2021, 45(21): 170-180.
YANG Lijun, ZHAO Yu, ZHAO You, et al. Balanced fault recovery of active distribution network considering emergency power supply vehicle scheduling in traffic network[J]. Automation of Electric Power Systems, 2021, 45(21): 170-180.
- [12] 田晶京, 李安乐, 高锋阳, 等. 含光伏发电和时变负荷的主动配电网孤岛划分[J]. 太阳能学报, 2021, 42(9): 125-131.
TIAN Jingjing, LI Anle, GAO Fengyang, et al. Islanding division of active distribution network with photovoltaic generation and time-varying load[J]. Acta Energetica Sinica, 2021, 42(9): 125-131.
- [13] 刘琨, 赵丽萍, 李建萍, 等. 考虑开关状态集调整的含光伏并网配电网动态故障恢复方法[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(1): 24-31.
LIU Shen, ZHAO Liping, LI Jianping, et al. Dynamic fault recovery method of a photovoltaic distribution network considering switch state set adjustment[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(1): 24-31.
- [14] 蔡田田, 姚浩, 杨英杰, 等. 基于云-边协同的配电网快速供电恢复智能决策方法[J]. 电力系统保护与控制, 2023, 51(19): 94-103.
CAI Tiantian, YAO Hao, YANG Yingjie, et al. Cloud-edge collaboration-based supply restoration intelligent decision-making method[J]. Power System Protection and Control, 2023, 51(19): 94-103.
- [15] 沈鑫, 曹敏. 分布式电源并网对于配电网的影响研究[J]. 电工技术学报, 2015, 30(增刊 1): 346-351.
SHEN Xin, CAO Min. Research on the influence of distributed power grid for distribution network[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(S1): 346-351.

- [16] 郝文斌, 孟志高, 张勇, 等. 新型电力系统下多分布式电源接入配电网承载力评估方法研究[J]. 电力系统保护与控制, 2023, 51(14): 23-33.
HAO Wenbin, MENG Zhigao, ZHANG Yong, et al. Carrying capacity evaluation of multiple distributed power supply access to the distribution network with the background of a new power system[J]. Power System Protection and Control, 2023, 51(14): 23-33.
- [17] 马天祥, 王春英, 贾静然, 等. 基于二进制粒子群算法的交直流混合配电网故障恢复方法[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(9): 112-119.
MA Tianxiang, WANG Chunying, JIA Jingran, et al. Fault recovery method for AC/DC hybrid distribution network based on binary particle swarm optimization algorithm[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(9): 112-119.
- [18] 唐巍, 王辰, 张璐, 等. 考虑敏感负荷需求和直流故障恢复能力的交直流混合配电网开关配置[J]. 电力自动化设备, 2021, 41(5): 210-218.
TANG Wei, WANG Chen, ZHANG Lu, et al. Switch allocation of AC/DC hybrid distribution network considering requirements of sensitive loads and DC fault restoration ability[J]. Electric Power Automation Equipment, 2021, 41(5): 210-218.
- [19] 廖小兵, 周自强, 乐健, 等. 考虑电池储能老化和需求侧响应的交直流混合配电网动态重构方法[J]. 电力系统保护与控制, 2023, 51(14): 43-54.
LIAO Xiaobing, ZHOU Ziqiang, LE Jian, et al. Dynamic reconfiguration of an AC/DC hybrid distribution network considering battery energy storage aging and demand response[J]. Power System Protection and Control, 2023, 51(14): 43-54.
- [20] 尹航, 刘友波, 高红均, 等. 含分布式储能系统的交直流混合配电网负荷恢复策略[J]. 电力自动化设备, 2021, 41(8): 25-32.
YIN Hang, LIU Youbo, GAO Hongjun, et al. Load recovery strategy of AC/DC hybrid distribution network with distributed energy storage systems[J]. Electric Power Automation Equipment, 2021, 41(8): 25-32.
- [21] KHAN M O, WADOOD A, ABID M I, et al. Minimization of network power losses in the AC-DC hybrid distribution network through network reconfiguration using soft open point[J]. Electronics, 2021, 10(3): 326.
- [22] 杨丽君, 高鹏, 王伟浩, 等. 考虑时间尺度的配电网故障恢复方法研究[J]. 太阳能学报, 2021, 42(1): 453-459.
YANG Lijun, GAO Peng, WANG Weihao, et al. Research on fault recovery method considering time scale for distribution network[J]. Acta Energetica Solaris Sinica, 2021, 42(1): 453-459.
- [23] 孙秀飞, 王宝娜, 荣雅君, 等. 考虑光伏波动性与负荷时变性的ADN多故障修复策略[J]. 分布式能源, 2019, 4(2): 30-39.
SUN Xiufei, WANG Baona, RONG Yajun, et al. Multi-fault repair-recovery strategy for active distribution network considering volatility of photovoltaic and time variation of load[J]. Distributed Energy, 2019, 4(2): 30-39.
- [24] 徐秋童, 于艾清. 基于动态决策系统的黑启动灾后恢复路径优化[J]. 电力工程技术, 2023, 42(5): 185-194.
XU Qiutong, YU Aiqing. Optimization of post disaster recovery path of black start based on dynamic decision system[J]. Electric Power Engineering Technology, 2023, 42(5): 185-194.
- [25] 张璐, 余顺江, 王辰, 等. 计及VSC运行方式与故障恢复优化的交直流混合配电网可靠性评估[J]. 电网技术, 2022, 46(1): 292-300.
ZHANG Lu, YU Shunjiang, WANG Chen, et al. Reliability evaluation of AC/DC hybrid distribution network considering VSC operation mode and fault recovery optimization[J]. Power System Technology, 2022, 46(1): 292-300.
- [26] 彭忠, 孙攀磊, 韩伟, 等. LCC与VSC级联的特高压混合直流输电系统控制策略[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(19): 162-172.
PENG Zhong, SUN Panlei, HAN Wei, et al. Control strategy of a hybrid UHVDC transmission system cascaded by LCC and VSC[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(19): 162-172.
- [27] 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 networks[J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(11): 85-91.

收稿日期: 2023-12-07; 修回日期: 2024-03-30

作者简介:

李英量(1979—), 男, 通信作者, 博士, 教授, 研究方向为电力系统稳定控制、配电网规划与继电保护; E-mail: yingliang.li@hotmail.com

孙楠(2000—), 男, 硕士研究生, 研究方向为交直流配电网的故障恢复;

王德明(1989—), 男, 硕士, 讲师, 研究方向为电力系统自动化、继电保护。

(编辑 周金梅)