

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.251009

含 SOP 的有源配电网多时段故障恢复方法研究

郑涛, 马慧, 沈文韬, 王瑜璇, 马通芳

(新能源电力系统国家重点实验室(华北电力大学), 北京 102206)

摘要: 电力电子设备以及分布式电源(distributed generation, DG)在配电网中的渗透率逐渐提高, 现有故障恢复方案未能充分利用智能软开关(soft open point, SOP)的短时过载能力以及 DG 的爬坡支撑作用, 资源利用不充分。提出一种考虑 SOP 短时过载能力和 DG 爬坡特性的有源配电网多时段故障恢复方法。首先, 介绍 SOP 的基本原理, 构建考虑 SOP 短时过载能力的数学模型。然后, 分析 DG 爬坡支撑特性, 给出 DG 故障恢复中的数学模型, 建立含 SOP 的有源配电网多时段故障恢复数学模型。并且明确了 SOP 与 DG 的动态协同过程, 提出多时段故障恢复流程。最后, 在 IEEE33 节点配电系统上开展仿真分析, 结果表明所提方法能够显著提升配电网故障恢复的能力, 验证了该方法的有效性。

关键词: 分布式电源; 智能软开关; 短时过载能力; 多时段故障恢复; 有源配电网

Multi-period fault recovery method for active distribution networks incorporating SOP

ZHENG Tao, MA Hui, SHEN Wentao, WANG Yuxuan, MA Tongfang

(State Key Laboratory of Alternate Electrical Power System with Renewable Energy Sources
(North China Electric Power University), Beijing 102206, China)

Abstract: With the increasing penetration of power electronic devices and distributed generation (DG) in distribution networks, existing fault recovery schemes fail to fully utilize the short-term overload capability of soft open points (SOPs) and the ramping support of DGs, leading to insufficient resource utilization. To address this issue, this paper proposes a multi-period fault recovery method for active distribution networks, incorporating SOP short-term overload capability and DG ramping capability. First, the operating principle of SOPs is described, and its mathematical model with short-term overload capability is formulated. Then, the post-fault ramping behavior of DGs is analyzed, and a corresponding mathematical model for DG participation in fault recovery is developed. Based on these models, a multi-period fault recovery optimization framework is established, in which the dynamic coordination between SOPs and DGs is explicitly characterized, and a corresponding recovery procedure is developed. Case studies on the IEEE 33-node system verify that the proposed method can significantly enhance fault recovery capability of distribution networks, proving its effectiveness.

This work is supported by the Smart Grid-National Major Science and Technology Project of China (No. 2025ZD0804600).

Key words: distributed generation; soft open point; short-term overload capability; multi-period fault recovery; active distribution network

0 引言

面对全球气候治理的紧迫形势, 中国在实现经

基金项目: 智能电网国家科技重大专项(2030)资助(2025ZD0804600); 国家电网有限公司总部科技项目资助(SGHEDK00PYJS2500225)“高比例分布式资源接入下主配微多级协同调控示范工程”

济高质量发展的同时, 正经历着能源消费结构的深刻变革。为应对日益严峻的环境挑战, 中国明确提出“双碳”目标, 并将构建以可再生能源为主导的新型电力系统作为实现这一目标的核心路径。在此背景下, 电网系统对分布式能源(distributed generation, DG)的大规模接入与高效利用, 已成为推动能源体系低碳化转型的重要技术支撑^[1-3]。

配电网作为电力系统与终端用户间的关键连

接, 不仅承担着电能传输与分配的重任, 更是新型电力系统实现低碳化、智能化转型的关键节点。在“双碳”目标的引领下, 配电网正从传统的单向供电模式, 逐步向具备高弹性、强互动能力的有源网络转变。配电网故障恢复对于保障电力系统韧性和供电可靠性至关重要, 故障恢复作为有源配电网故障处理的核心环节, 也是实现配电网自愈功能的必要条件^[4]。

当前, 在有源配电网故障恢复领域, 围绕分布式电源支撑配电网故障恢复开展了大量研究工作, 其主要通过孤岛^[5-8]、微网^[9-10]和网络重构^[11-13]等形式为失电区域供电, 由于 DG 的出力具有不确定性, 很多学者针对此问题提出了解决方法^[14-17]。然而, 当前配电网中接入的 DG 普遍缺乏主动电压支撑能力, 在系统故障时通常被迫脱网运行, 导致可再生能源利用率降低; 或者等待 DG 稳定出力后才进行负荷恢复, 无法及时恢复供电^[18]。怎样高效挖掘 DG 的支撑潜能, 让更多负荷得以快速恢复供电, 已成为迫切需要研究的关键课题。

此外, 新型电力电子装置的发展为故障恢复策略开辟了新路径^[19]。智能软开关(soft open point, SOP)不仅具有单纯的开关作用, 还可以调节流过自身的功率改变系统潮流分布, 进而改善整个配电系统的运行状态。在配电网故障隔离后, SOP 可作为失电区域提供的电源, 为失电区域传输有功功率, 并且提供无功功率为失电区域提供电压支撑, 增强配电系统的故障恢复能力, 充分展现其灵活可控的特性以及对电压的支撑功效。目前已有学者研究 SOP 在配电网故障恢复中发挥的优势^[20-23], 其控制简单、安全、可靠, 使得故障后失电区域能够更大范围地恢复供电, 显著提高了恢复能力。但是, 上述文献均未充分考虑 SOP 的短时过载能力, 忽略了其在配电网故障恢复初期对失电区域的快速支撑作用。文献[24]分析了 SOP 短时过载能力对故障后负荷多阶段恢复过程的支撑作用, 并在此基础上构建了面向柔性互联配电网(flexible interconnected distribution network, FIDN)的混合整数线性规划(mixed-integer linear programming, MILP)可靠性评估模型。然而, 该文未进一步探讨在初期恢复后, SOP 短时过载能力与 DG 爬坡能力之间的协同调控机制, 对配电网多时段故障恢复的动态复杂过程未进行深入研究。

基于上述问题, 本文提出了一种考虑 SOP 短时过载能力及 DG 爬坡相协同的配电网多时段故障恢复方法。首先, 介绍了 SOP 的主要功能, 考虑 SOP 短时过载能力构建了其快速转供模型; 其次, 深入分析高比例 DG 接入对柔性配电网故障恢复的影响, 充分考虑 DG 的低电压穿越策略, 明确 DG 爬

坡过程中的出力变化; 最后, 建立了考虑 SOP 短时过载与 DG 爬坡协同的配电网多时段故障恢复数学模型, 提出配电网多时段故障恢复流程, 该方案旨在充分发挥 SOP 短时过载快速转供能力及 DG 的主动支撑作用, 在最短时间内实现最大范围的故障恢复, 并在 IEEE33 节点上进行分析, 验证了所提方案能有效提高故障恢复速度, 全面提高故障恢复能力。

1 SOP 的基本原理与数学模型

1.1 SOP 的基本原理

SOP 通过其先进的电力电子控制技术, 能够实现多种电网运行优化功能, 主要包括网损优化、电压调节以及故障情况下的快速恢复, 这种灵活性使其成为现代配电网运行控制的重要技术手段。目前 SOP 常用的结构为背靠背电压源型换流器(back-to-back voltage-sourced converter, B2BVSC)^[25], 其结构如图 1 所示, 由两个换流器通过一个直流电容器连接构成。

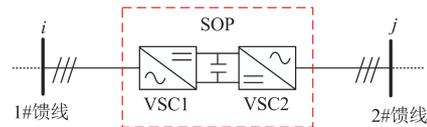


图 1 背靠背电压源型 SOP 的结构图

Fig. 1 Structure of the back-to-back VSC based SOP

在配电网正常运行和故障情况下, SOP 两侧的换流器会切换不同的控制模式, 如表 1 所示。具体而言, 配电网正常运行时, 一个换流器负责控制传输功率, 另一个换流器负责维持直流电压稳定。当系统发生故障时, 故障侧换流器控制模式切换为 Vf 控制, 以此支撑负荷电压, 而另一个换流器则负责直流电压的稳定。本文重点考虑 SOP 在故障时一侧的 VSC 处在非失电区域, 另一侧处在失电区域, 对于失电区域 SOP 相当于电源, 在故障恢复过程中为失电区域提供功率支撑。

表 1 背靠背型电压源型 SOP 的控制模式

Table 1 Control modes of the back-to-back VSC based SOP

| 配电网状态 | VSC1 控制方式 | VSC2 控制方式 |
|--------------------|-----------|-----------|
| 正常运行 | PQ 控制 | VdcQ 控制 |
| 正常运行 | VdcQ 控制 | PQ 控制 |
| 故障恢复 (VSC1 侧失电) | Vf 控制 | VdcQ 控制 |
| 故障恢复 (VSC2 侧失电) | VdcQ 控制 | Vf 控制 |

1.2 SOP 的数学模型

在配电网故障恢复的研究中, SOP 故障侧换流

器采用 Vf 控制模式, 决策变量为电压。在这种模式下, 系统需要对电压进行精确监测和调整, 以确保配电网在故障恢复过程中的电压稳定性。在配电网故障恢复的稳态分析中, 非故障侧的控制可依据文献[26]等效处理为 PQ 控制。此时, 非故障侧的决策变量为有功功率和无功功率, 系统对有功功率和无功功率进行精准调控, 通过合理分配无功功率来改善配电网的潮流分布和电压质量。

SOP 在运行过程中, 两端的换流器所在节点除了需要满足一般节点的约束条件之外, 还要满足自身的一些安全运行约束, 主要包括有功功率约束和容量约束。由于直流环节的隔离作用, 这两个换流器的无功输出相互独立, 互不影响。因此, SOP 在进行无功功率分配时, 仅需确保每个换流器的无功输出满足各自的容量约束即可。SOP 传输的有功功率约束为

$$P_{i,t}^{\text{SOP}} + P_{j,t}^{\text{SOP}} = 0 \quad (1)$$

式中: i 和 j 分别为 SOP 所接入配电网的节点编号; $P_{i,t}^{\text{SOP}}$ 、 $P_{j,t}^{\text{SOP}}$ 分别为 SOP 在 t 时段注入节点 i 和节点 j 的有功功率。

一般情况下, SOP 在设计阶段会预留一定的短时过载能力, 以应对实际运行中的负荷波动和设备启动所引起的电流冲击[27]。在配电网发生故障后, 尤其对于重要负荷, 需在短时间内实现快速故障恢复, 以降低停电损失。因此, 可在故障隔离后的初期, 充分利用 SOP 的短时过载能力, 快速调度主网电能以支撑失电区域的故障恢复。

SOP 的过载能力可以用过载功率与额定容量的比值 α 表示, 在短时过载情况下 SOP 的容量约束可以表示为

$$\sqrt{(P_{i,t}^{\text{SOP}})^2 + (Q_{i,t}^{\text{SOP}})^2} \leq \alpha S_i^{\text{SOP}} \quad (2)$$

$$\sqrt{(P_{j,t}^{\text{SOP}})^2 + (Q_{j,t}^{\text{SOP}})^2} \leq \alpha S_j^{\text{SOP}} \quad (3)$$

式中: $Q_{i,t}^{\text{SOP}}$ 和 $Q_{j,t}^{\text{SOP}}$ 分别为 SOP 在 t 时段注入节点 i 和节点 j 的无功功率; S_i^{SOP} 和 S_j^{SOP} 分别为节点 i 和节点 j 上换流器的额定容量。一般而言, SOP 在 α 取 1.5 时, 能够持续运行 1 min; α 取 1.2 时, 能够持续运行 1 h[27]。本文 SOP 短时过载能力主要用于 DG 爬坡期间紧急支撑, 因此, 在满足快速恢复负荷和安全裕度的情况下 α 取 1.5。

2 高比例 DG 接入柔性配电网对故障恢复的影响分析

2.1 DG 故障穿越特性

当配电网发生故障时, 具备良好故障穿越能力

的 DG 能够维持并网运行, 为系统提供必要支撑, 从而显著提升配电网故障恢复的速度和恢复能力。我国目前的电力行业标准要求, 在故障发生时, 必须在 2 s 内切断 DG, 以防止非计划孤岛现象[28]。然而, 随着 DG 在配电网中的比例不断增加, 这种做法不仅限制了 DG 对电压的支撑作用, 还可能加剧电网功率的不平衡。因此, 许多国家逐步提高了对 DG 低电压穿越能力(low-voltage ride through, LVRT)的要求。

以光伏为例的 DG 低电压穿越条件要求如图 2 所示, T_1 和 T_2 取值分别为 0.625 s 和 2 s。若并网点电压跌落至图中曲线以上区域, 则可以保持并网运行; 若并网点电压跌落至曲线以下的区域, 则 DG 脱网[29]。

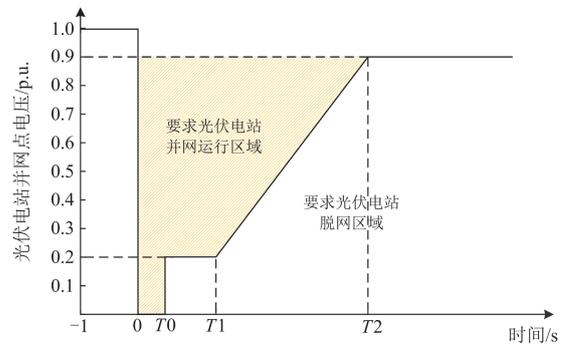


Fig. 2 LVRT requirements for photovoltaic power plants

2.2 故障恢复过程中 DG 支撑能力分析

随着逆变型分布式能源(如风能、太阳能)的广泛应用, 其并网控制策略主要分为两类: 跟网型(grid-following)与构网型(grid-forming)。构网型 DG 通过模拟同步发电机的运行机制, 可自主建立电网电压与频率的参考基准, 从而为系统提供主动支撑; 相比之下, 跟网型 DG 需依赖外部电网的电压和频率信号进行同步, 但其动态响应速度优势使其在功率波动场景中具有显著调节潜力。在配电网故障恢复阶段, 鉴于不同类型 DG 特性各异, 在恢复过程中需针对其特点制定差异化的处理策略[30]。

故障隔离后, DG 可分为 3 类: 退出运行类、故障穿越类和计划孤岛[18]。在本文的研究范畴内, 重点讨论故障穿越类 DG, 深入探究其于电网故障恢复过程中所发挥的主动支撑能力。相较于退出运行类 DG 以及计划孤岛类 DG, 故障穿越类 DG 能够及时提供功率, 当 DG 电压处于低电压穿越所规定的阈值区间时, 该类 DG 能够持续维持并网运行状态。一旦电网电压逐步恢复至正常工作范围, 故障穿越类 DG 提供一定的功率支撑, 积极为负荷恢

复提供必要的电能支持。本文的核心研究思路在于，故障隔离后，如果需要转供的失电负荷大于 SOP 容量，则先由 SOP 过载快速转供失电负荷，随后故障穿越类 DG 在电压恢复至正常区间这一关键阶段释放功率，SOP 传输的功率相应逐渐减少，后期转为 DG 主要为失电区域提供电能。这种协同恢复方法充分利用了两种响应速度不同的资源，提升配电网在故障后的自愈能力与供电可靠性。

2.3 故障恢复过程中 DG 功率输出特性

本文中接入配电网的 DG 均为故障穿越类 DG，即在规定时间内电压值达到要求的范围内，则 DG 保持并网。本文的 DG 均为光伏电站，DG 在故障隔离后的功率输出按照现有的光伏电站接入电力系统技术标准 GB/T19964—2024 规定，在故障隔离后，DG 的有功功率输出以不小于每秒 30% 装机容量的速率爬升，则以规定要求的最小速率得出 DG 有功功率与时间的关系如图 3 所示，黑色曲线代表的是功率恢复最低要求。在图 3 中，如果 DG 有功功率恢复过程中位于曲线以上的部分则正常并网；反之，位于曲线以下的部分则不能正常并网。在现有的配电网故障恢复研究中，DG 的支撑作用通常仅在其功率完全恢复后才被考虑，而本文则将 DG 出力爬坡过程纳入恢复策略，利用其在爬坡阶段的出力对系统提供实时支撑，并且与 SOP 短时过载能力协同，故障恢复初期先由 SOP 短时过载转供失电负荷，随着 DG 出力的爬坡，后期 DG 转为主要承担供电的资源，由此可以实现最短时间内恢复更多失电负荷。

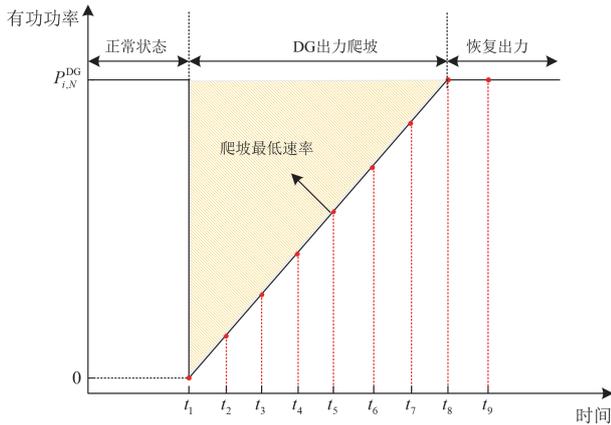


图 3 DG 有功功率输出曲线

Fig. 3 Active power output curve of DG

图 3 中： $P_{i,N}^{DG}$ 为节点 i 上的 DG 故障前的有功功率输出。配电网发生故障后，DG 的有功功率会降至较低水平，在故障隔离完成后，其有功功率将

逐步恢复至故障前的输出。在此过程中，DG 需同时提供一定的无功功率以支撑电压在规定时间内恢复到要求的范围内，并随着电压回升逐渐减少无功输出，且有功功率与无功功率始终受制于容量约束。基于这一功率输出特性，本文给出式(4)、式(5)所示的 DG 故障恢复过程中的模型，来模拟定时间步长下 DG 的功率输出。

$$P_{i,t}^{DG} = P_{i,1}^{DG} + \beta t, t \in T \quad (4)$$

$$P_{i,t}^{DG} \leq P_{i,N}^{DG} \quad (5)$$

$$\sqrt{(P_{i,t}^{DG})^2 + (Q_{i,t}^{DG})^2} \leq S_i^{DG}, t \in T \quad (6)$$

式中： T 为故障恢复时段数集合； $P_{i,t}^{DG}$ 和 $Q_{i,t}^{DG}$ ($t \in T$) 分别为节点 i 上的 DG 在 t 时段注入的有功功率和无功功率； β 为 DG 有功功率每个时段的增量， $\beta > 0$ ； S_i^{DG} 为节点 i 上的 DG 额定容量。

3 考虑 SOP 短时过载及 DG 爬坡协同配电网多时段恢复策略

3.1 目标函数及约束条件

本文构建的目标函数，以负荷恢复量最大化为主要目标，力求在最短时间内恢复更多的失电负荷；将系统损耗最小化作为重要因素，降低能源浪费，提升系统运行经济性；把开关操作次数最少化纳入其中，减少因频繁操作开关带来的设备磨损与操作风险。由于三者不是一个数量级，因此需要进行归一化，再通过对这 3 个关键因素的归一化表达式进行合理加权求和，形成综合目标函数 F ，确保系统在故障后能快速且高效地恢复至正常运行状态。

$$F = \min \{k_1 g'_1 + k_2 g'_2 + k_3 g'_3\} \quad (7)$$

$$g'_1 = \sum_{t \in T} \sum_{i \in N} \lambda_{i,t} \omega_i P_i^{\text{LOAD}} / g_1^{\text{max}} \quad (8)$$

$$g'_2 = \sum_{t \in T} \sum_{ij \in O} r_{ij} I_{ij,t}^2 / g_2^{\text{max}} \quad (9)$$

$$g'_3 = \sum_{t \in T} (\text{abs}(Z_t - Z_0)) / g_3^{\text{max}} \quad (10)$$

式中： g'_1 、 g'_2 和 g'_3 分别为负荷恢复量、网络损耗和开关操作次数的归一化量； k_1 、 k_2 和 k_3 分别为 g'_1 、 g'_2 和 g'_3 的权重系数； g_1^{max} 、 g_2^{max} 、 g_3^{max} 分别为负荷恢复量、系统网损和开关操作次数的最大值； N 为系统节点集合； $\lambda_{i,t}$ 为 t 时段节点 i 的恢复系数，若节点 i 恢复，则 $\lambda_{i,t}$ 为 1，反之为 0； ω_i 为负荷 i 的权重系数； P_i^{LOAD} 为节点 i 处负荷消耗的有功功率； O 为系统支路集合； r_{ij} 为支路 ij 的电阻； $I_{ij,t}$ 为 t 时段节点 i 流向节点 j 的电流幅值； Z_t 为 t 时段系统拓扑状态。

在有源配电网故障恢复过程中, 需满足一系列约束条件, 以此确保系统的安全、高效运行。这些约束涵盖系统运行安全约束、潮流约束、SOP 相关约束以及 DG 功率约束等, 具体的约束表达式如下。

1) 系统潮流约束

$$\sum_{ji \in O} (P_{ji,t} - r_{ij} I_{ji,t}^2) + P_{i,t} = \sum_{ik \in O} P_{ik,t} \quad (11)$$

$$\sum_{ji \in O} (Q_{ji,t} - x_{ij} I_{ji,t}^2) + Q_{i,t} = \sum_{ik \in O} Q_{ik,t} \quad (12)$$

$$U_{i,t}^2 - U_{j,t}^2 + (r_{ij}^2 + x_{ij}^2) I_{ij,t}^2 - 2(r_{ij} P_{ij,t} + x_{ij} Q_{ij,t}) = 0 \quad (13)$$

$$I_{ij,t}^2 U_{i,t}^2 = P_{ij,t}^2 + Q_{ij,t}^2 \quad (14)$$

$$P_{i,t} = P_{i,t}^{\text{DG}} + P_{i,t}^{\text{SOP}} - \lambda_{i,t} P_i^{\text{LOAD}} \quad (15)$$

$$Q_{i,t} = Q_{i,t}^{\text{DG}} + Q_{i,t}^{\text{SOP}} - \lambda_{i,t} Q_i^{\text{LOAD}} \quad (16)$$

式中: $P_{ji,t}$ 和 $Q_{ji,t}$ 分别为 t 时段支路上节点 j 流向节点 i 的有功功率和无功功率; x_{ij} 为支路 ij 的电抗; $P_{i,t}$ 和 $Q_{i,t}$ 分别为 t 时段节点 i 上注入的有功功率和无功功率之和; $U_{i,t}$ 为 t 时段节点 i 的电压; Q_i^{LOAD} 为节点 i 上负荷消耗的无功功率。

2) 系统运行约束

$$(U^{\min})^2 \leq U_{i,t}^2 \leq (U^{\max})^2 \quad (17)$$

$$I_{ij,t}^2 \leq (I^{\max})^2 \quad (18)$$

式中: U^{\min} 和 U^{\max} 分别为系统最小和最大允许节点电压值; I^{\max} 为系统最大允许支路电流值。

3) 考虑短时过载的 SOP 运行约束

考虑短时过载的 SOP 运行约束为式(1)一式(3)。

4) DG 功率约束

DG 功率约束为式(4)一式(6)。

除了考虑每个时段恢复负荷量最大以及以上提到的各种约束外, 一般规定负荷恢复供电后必须连续供电一段时间, 对此本文有以下约束: 某一节点恢复供电后, 后面时段不会再次失电, 具体约束如式(19)所示。

$$\lambda_{i,t} \geq \lambda_{i,t-1}, t \geq 2 \quad (19)$$

3.2 二阶锥模型转化

要进行二阶锥模型转化需要保证目标函数是决策变量的线性函数, 首先将数学模型中的二次项线性化, 即节点电压幅值的平方用 u_i 表示, 支路电流幅值的平方用 i_{ij} 表示; 其次将 SOP 运行约束式进行旋转锥约束转化, 如式(20)一式(22)所示。

$$(P_{j,t}^{\text{SOP}})^2 + (Q_{j,t}^{\text{SOP}})^2 \leq 2 \frac{S_j^{\text{SOP}}}{\sqrt{2}} \frac{S_j^{\text{SOP}}}{\sqrt{2}} \quad (20)$$

$$(P_{i,t}^{\text{SOP}})^2 + (Q_{i,t}^{\text{SOP}})^2 \leq 2 \frac{S_i^{\text{SOP}}}{\sqrt{2}} \frac{S_i^{\text{SOP}}}{\sqrt{2}} \quad (21)$$

$$\| [2P_{ij,t} \quad 2Q_{ij,t} \quad i_{ij,t} - u_{i,t}]^T \|_2 \leq i_{ij,t} + u_{i,t} \quad (22)$$

通过以上转化, 将含 SOP 的有源配电网故障恢复模型由难以求解的混合整数非线性规划模型转换为二阶锥规划模型, 通过二阶锥算法求解。

3.3 考虑 SOP 短时过载及 DG 爬坡协同配电网多时段故障恢复流程

与现有研究相比, 本文所提出的方案在配电网故障恢复过程中, 考虑 SOP 短时过载能力及 DG 功率爬坡特性, 充分利用了 SOP 快速转供和 DG 动态支撑, 实现更高效的故障恢复。此方案不仅能确保配电网以最快速度恢复供电, 还能在恢复过程中充分挖掘 DG 对电网的支撑潜力, 优化电力资源的调配与利用。针对高比例 DG 接入的柔性配电网故障恢复问题, 本文构建的总体恢复方案详细实施流程如图 4 所示。

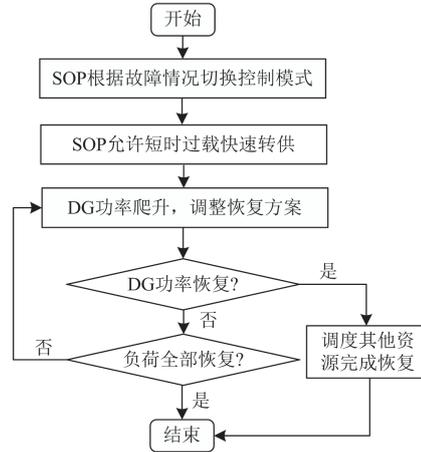


图 4 故障恢复流程图

Fig. 4 Fault recovery flowchart

当配电网发生故障, 在完成故障定位及有效隔离故障区域后, SOP 根据故障情况切换控制模式, 如果失电负荷大于 SOP 容量, 则 SOP 可以先短时过载快速转供失电负荷。随后 DG 开始功率爬坡, SOP 可根据配电网的负荷需求和功率分布情况, 将电力输送至尚未完全恢复供电或重要负荷的区域, 并且调整自身功率传输减轻负担。同时联络开关选择合适的路径进行闭合, 优化网络的拓扑结构, 将还未恢复的失电负荷与主网连接起来, 实现进一步恢复供电。通过上述协同工作方式, 能够快速恢复一些关键负荷, 并且确保电力能够沿着最合理的路径传输, 提高故障恢复的效率与质量。在失电负荷没有完全恢复之前, 根据 DG 的功率爬升情况, 不断地调整恢复方案; 当 DG 的功率爬升到故障之前的功率输出, 其故障恢复支撑能力已得到充分发挥, 若

仍存在未恢复负荷，则可结合实际情况进一步调度其他资源完成故障恢复。

4 算例分析

4.1 仿真参数

为验证所提方案的正确性和有效性，在 MATLAB 软件上编写上述程序，并采用 CPLEX 算法包进行求解，以 IEEE33 节点^[31]为测试算例，算例结构如图 5 所示。考虑到 DG 的接入也会给配电系统故障恢复带来影响，在 IEEE33 节点测试算例中接入 5 组 DG，位置和容量见表 2， β 取 $0.3 P_{i,N}^{DG}$ 。针对含 DG 的配电网，为了能够充分体现所提方案恢复的效果，选取支路 2-3 发生故障。故障隔离后进行故障恢复，设定恢复节点电压标么值允许波动区间为 $[0.95, 1.05]$ p.u.，根据仿真经验，目标函数的加权系数 k_1 取 -0.8 ， k_2 取 0.1 ， k_3 取 0.1 ，SOP 接入位置为支路 12-22，容量为 2 MVA。本文单个时步 Δt 设为 1 s，DG 的初始功率和爬坡速率都做保守的设置：初始功率为 0，爬坡速率为 30% 装机容量。结合上述条件，本文 DG 爬坡阶段可分为 4 个时段。

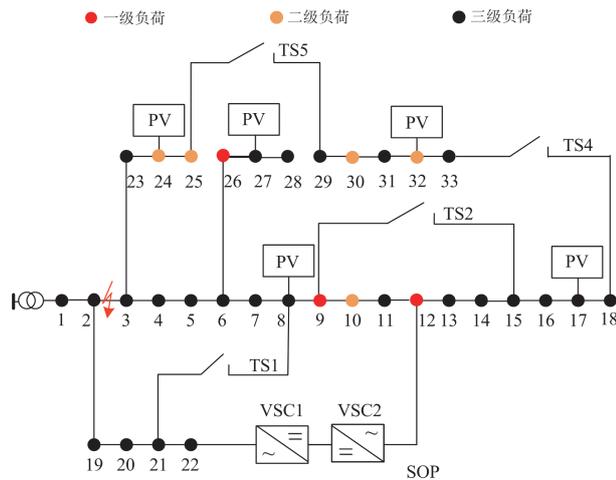


图 5 IEEE 33 节点算例结构图

Fig. 5 Structure of the IEEE 33-node test feeder

表 2 DG 的配置参数

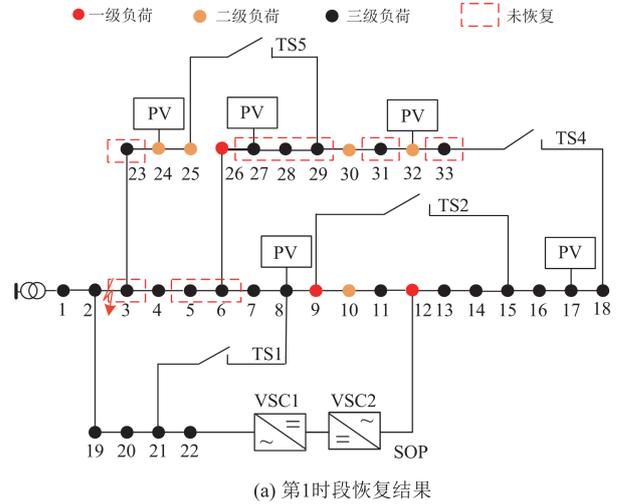
Table 2 Configuration parameters of DG

| 接入位置 | 8 | 17 | 24 | 27 | 32 |
|--------|-----|-----|-----|-----|-----|
| 容量/kVA | 400 | 400 | 400 | 400 | 400 |

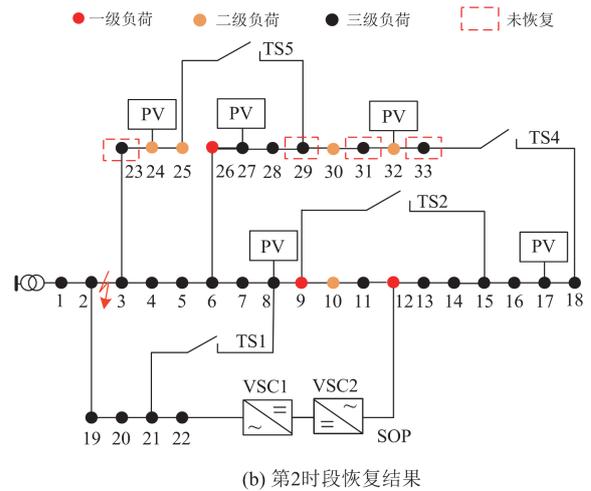
4.2 仿真结果分析

由于算例中失电负荷在第 4 时段已全部恢复，本文仅对前 4 个时段的恢复过程进行分析。此外，基于 SOP 和 TS 的响应速度的不同，本文对其动作时序进行了合理协调：SOP 先于 TS 动作，给 TS 动作留有一定的时间裕度。第 1 时段利用 SOP 毫秒

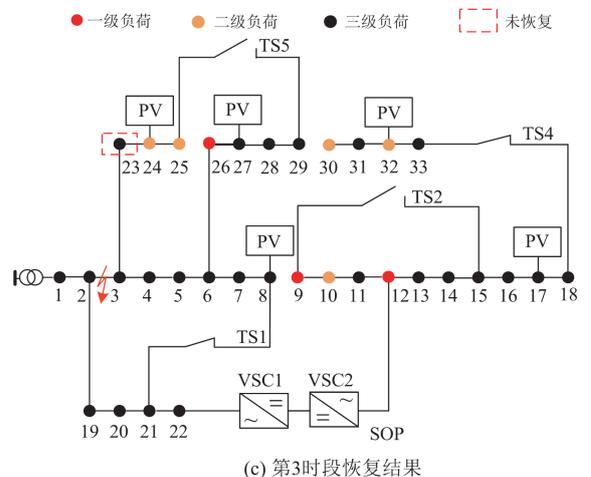
级的功率调节能力^[32]，故障隔离后第一时间为失电区域传输功率，紧急恢复大量的失电负荷；第 2 时段 DG 出力增大继续恢复更多的失电负荷；第 3 时段通过操作联络开关和分段开关进行网络重构，继续恢复失电负荷；最终在第 4 时段实现全部恢复，具体恢复结果拓扑图如图 6 所示。



(a) 第1时段恢复结果



(b) 第2时段恢复结果



(c) 第3时段恢复结果

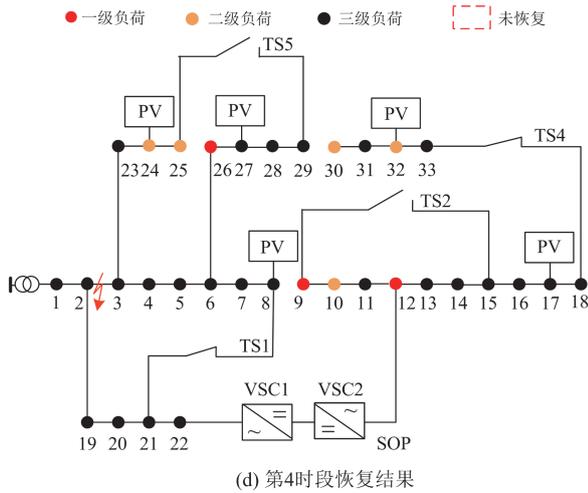


图 6 多时段故障恢复结果拓扑图

Fig. 6 Topology diagrams of multi-period fault recovery results

恢复参数见表 3, 第 1 时段负荷恢复量为 2505 kW, 一、二级负荷全部恢复; 随后 DG 功率爬坡, 逐步完成其余失电负荷的恢复, 至第 4 时段实现全网供电。由此可见, 在结合 SOP 短时过载能力与 DG 爬坡特性的协同恢复方案中, 系统能够在初始阶段迅速恢复关键负荷, 并在末阶段实现全部负荷的供电。同时随着本地 DG 功率不断提升, 系统的供电能力增强, 网络损耗呈逐步下降趋势。在操作层面, 除第 3 时段为实现必要的拓扑调整而进行的开关操作外, 其余时段 TS 和分段开关均未发生额外动作, 充分体现了方案在减少操作次数的同时确保高效恢复的优势。因此, 本方案在提升配电网的恢复速度和整体恢复效果方面具有显著成效。表 4 给出了 SOP 的控制参数情况, 功率以输入为正, 结果显示 SOP 在初期处于过载运行, 将故障下游负荷快速转供, 保障重要负荷区域的供电; 随后逐步恢复至额定功率范围内。

4.3 与现有方案的对比

针对现有的含 SOP 的有源配电网故障恢复方案研究中的不足, 本文设置了以下 3 种对比方案分析考虑 SOP 短时过载和考虑 DG 爬坡对配电网故障恢复的支撑作用。以 IEEE33 节点系统为测试算例,

表 3 多时段故障恢复结果

| 时段 | 负荷恢复量/kW | 网络损耗/kW | 当前时段开关动作次数 | 待恢复负荷/kW |
|----|----------|---------|------------|----------|
| 1 | 2505 | 275.0 | 0 | 750 |
| 2 | 2835 | 188.1 | 0 | 420 |
| 3 | 3165 | 160.1 | 4 | 90 |
| 4 | 3255 | 110.0 | 0 | 0 |

表 4 SOP 控制参数

Table 4 Control parameters of SOP

| 时段 | SOP 换流器 | 控制参数 | 数值 |
|----|---------|-----------------|--------|
| 1 | VSC1 | P/kW | 2617.7 |
| | | Q/kvar | 371.8 |
| | VSC2 | $U/\text{p.u.}$ | 1.05 |
| | | f/Hz | 60 |
| 2 | VSC1 | P/kW | 1932.3 |
| | | Q/kvar | 187.7 |
| | VSC2 | $U/\text{p.u.}$ | 1.05 |
| | | f/Hz | 60 |
| 3 | VSC1 | P/kW | 682.1 |
| | | Q/kvar | 1877.8 |
| | VSC2 | $U/\text{p.u.}$ | 1.05 |
| | | f/Hz | 60 |
| 4 | VSC1 | P/kW | 529.9 |
| | | Q/kvar | 1154.5 |
| | VSC2 | $U/\text{p.u.}$ | 1.05 |
| | | f/Hz | 60 |

对各方案的故障恢复效果进行分析。

方案 1: 考虑 SOP 短时过载, 不计及 DG 爬坡的配电网故障恢复。

方案 2: 不考虑 SOP 短时过载, 计及 DG 爬坡过程的配电网故障恢复。

方案 3: 采用本文方案, 考虑 SOP 短时过载与 DG 爬坡协同的配电网故障恢复。

方案 1 在 DG 达到稳定出力后, 通过结合 SOP 短时过载能力与网络重构实现故障区域的全面恢复, 其具体恢复率与方案 3 的对比如表 5 所示, 旨在分析 SOP 短时过载对故障恢复的影响。方案 2 则在故障恢复过程中, 伴随 DG 有功功率的逐步爬升, 分时段恢复失电负荷, 各时段的恢复率与方案 3 的对比如表 5 所示, 重点突出 DG 爬坡过程在故障恢复中的作用。各方案在不同阶段的负荷恢复量对比如图 7 所示, 可直观反映 3 种策略在恢复节奏与效果上的差异。

表 5 故障恢复方案结果对比

Table 5 Results comparison of fault recovery schemes

| 时段 | 负荷恢复量/kW | | | 负荷恢复率/% | | |
|----|----------|------|------|---------|------|------|
| | 方案 1 | 方案 2 | 方案 3 | 方案 1 | 方案 2 | 方案 3 |
| 1 | 0 | 1855 | 2505 | 0 | 57.0 | 77.0 |
| 2 | 0 | 2485 | 2835 | 0 | 76.3 | 87.1 |
| 3 | 0 | 3075 | 3165 | 0 | 94.5 | 97.2 |
| 4 | 3255 | 3255 | 3255 | 100 | 100 | 100 |

方案 1 最终恢复负荷量为 3255 kW, 实现了全部失电负荷的恢复。但该方案存在明显局限性: 在

恢复过程中未考虑 DG 的爬坡特性,需等待 DG 达到稳定出力后才启动故障恢复,即在第 4 时段才利用 DG 进行故障恢复,既未发挥爬坡阶段有功功率对故障恢复的支撑作用,也未利用 DG 初期较高的无功功率对电压的支撑作用,导致资源利用不足。与之相比,本文方案在第 1 时段的恢复率较方案 1 提高了 77%,这得益于充分利用了故障恢复初期的资源优势,包括 SOP 的短时过载能力以及 DG 在低电压穿越初期提供的较高无功功率,从而在早期即可为失电区域输送有功功率并支撑电压。此优势在后续各时段的恢复量上同样体现出提升效果。因此,在应对大范围突发故障时,本文方案可显著减少停电影响,尤其保障了对供电连续性要求极高的重要用户的运行安全。

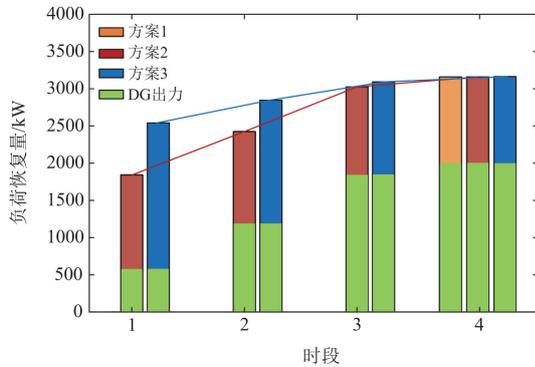


图 7 各方案负荷恢复量对比图

Fig. 7 Comparison of load restoration capacity across schemes

进一步比较方案 2 与本文方案在各时段的恢复量,尤其是第 1 时段,本文方案的恢复量较方案 2 提高了 20%,充分体现了 SOP 短时过载在初期的显著支撑作用。综合来看,本文方案能够在最短时间内实现最大范围的负荷恢复,通过合理挖掘并利用 SOP 与 DG 的潜在特性,使配电网在故障后的恢复过程更加迅速高效,显著增强系统的供电可靠性,为社会经济的稳定运行提供坚实保障。

5 结论

本文提出了一种考虑 SOP 短时过载能力与 DG 爬坡特性协同的配电网多时段故障恢复方案,在 IEEE33 节点系统中进行故障恢复仿真分析表明,本文方案能够提升配电网故障恢复速度,全面提高故障恢复能力。其主要特点如下:

1) 充分利用 SOP 短时过载能力,在故障隔离后可快速转供更多失电负荷,相较传统方案,故障恢复第 1 时段恢复率提高了 20%,显著提高了恢复初期的负荷恢复率。

2) 考虑 DG 的低电压穿越特性,在 DG 出力爬坡的过程中进行故障恢复,与不考虑 DG 爬坡的方案对比,前 3 个时段负荷恢复率分别提高了 57%, 76%和 94.5%,在故障隔离之后能够充分利用分布式能源快速恢复大部分失电负荷,尤其能够保障关键负荷的供电,减小故障对系统的负面影响,具有更好的恢复效果。

3) 综合考虑 SOP 短时过载能力和 DG 爬坡特性提出一种配电网多时段故障恢复方法。在高比例 DG 接入配电网的场景下,配电网故障恢复时充分利用响应速度不同的两种资源,初期利用 SOP 的短时过载能力快速转供更多失电负荷,后续发挥 DG 在恢复中的支撑作用和 SOP 的灵活调控优势,使得故障恢复安全进行的同时提高整体恢复能力。

需要指出的是,本文在考虑 DG 爬坡特性时,对其控制策略进行了适度简化,这在一定程度上可能影响对 DG 在故障恢复过程中复杂动态的精确刻画。后续研究将深入探讨 DG 控制策略对故障恢复过程的具体影响,并在此基础上进一步优化策略。

参考文献

- [1] 陶劲宇, 秦川, 金宇清, 等. 面向新型电力系统的负荷模型研究综述[J]. 电力系统保护与控制, 2025, 53(5): 168-187.
TAO Jinyu, QIN Chuan, JIN Yuqing, et al. A review of load models for new power systems[J]. Power System Protection and Control, 2025, 53(5): 168-187.
- [2] 戴志辉, 张宇, 吴桐, 等. 含高比例新能源配电网的改进重合闸方案[J]. 电力系统保护与控制, 2025, 53(15): 103-112.
DAI Zhihui, ZHANG Yu, WU Tong, et al. An improved reclosing scheme for active distribution networks with high proportion of new energy[J]. Power System Protection and Control, 2025, 53(15): 103-112.
- [3] 欧阳金鑫, 陈纪宇, 袁毅峰, 等. 基于分布式电源主动控制的配电网合环电压波动抑制方法[J]. 电力自动化设备, 2024, 44(1): 49-56.
OUYANG Jinxin, CHEN Jiyu, YUAN Yifeng, et al. Loop-closing voltage fluctuation suppression method of distribution network based on active control of distributed generators[J]. Electric Power Automation Equipment, 2024, 44(1): 49-56.
- [4] 刘健. 现代配电自动化系统[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2013.
- [5] 黄婧杰, 聂焕, 张荐, 等. 主动配电网灾后韧性提升的孤岛划分与故障抢修协同方法[J]. 电力自动化设备, 2025, 45(10): 128-134.

- HUANG Jingjie, NIE Huan, ZHANG Jian, et al. Collaborative method of island partition and fault repair for post-disaster resilience enhancement in active distribution network[J]. *Electric Power Automation Equipment*, 2025, 45(10): 128-134.
- [6] 李英量, 孙楠, 王德明, 等. 含分布式储能系统的交直流配电网动态故障恢复策略[J]. *电力系统保护与控制*, 2024, 52(18): 179-187.
- LI Yingliang, SUN Nan, WANG Deming, et al. A dynamic fault recovery strategy for an AC/DC distribution network with distributed energy storage system[J]. *Power System Protection and Control*, 2024, 52(18): 179-187.
- [7] WANG Y, SU X, SONG M, et al. Sequential load restoration with soft open points and time-dependent cold load pickup for resilient distribution systems[J]. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 2023, 14(5): 3427-3438.
- [8] 王涵, 孙磊, 文福拴. 考虑孤岛动态划分与融合的配电网系统故障恢复策略[J]. *电力自动化设备*, 2025, 45(10): 92-99.
- WANG Han, SUN Lei, WEN Fushuan. Service restoration strategy of distribution system considering dynamic islanding partition and merging[J]. *Electric Power Automation Equipment*, 2025, 45(10): 92-99.
- [9] 邱海枫, 苏宁, 田松林. 基于改进 BFGS 算法的多 DG 电力系统故障重构研究[J]. *电测与仪表*, 2025, 62(8): 85-92.
- QIU Haifeng, SU Ning, TIAN Songlin. Research on multi-DG power system fault reconstruction method based on improved BFGS algorithm[J]. *Electrical Measurement & Instrumentation*, 2025, 62(8): 85-92.
- [10] 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.
- [11] MOUSAVIZADEH S, ALAHYARI A, GHODSINYA S R M, et al. Incorporating microgrids coupling with utilization of flexible switching to enhance self-healing ability of electric distribution systems[J]. *Protection and Control of Modern Power Systems*, 2021, 6(3): 1-11.
- [12] 葛延峰, 邱雨, 张云旭, 等. 计及多种灵活性资源的园区智能配电网灾时弹性提升策略[J]. *电力系统保护与控制*, 2024, 52(17): 139-149.
- GE Yanfeng, QIU Yu, ZHANG Yunxu, et al. Disaster resilience enhancement strategy of an intelligent distribution network in parks considering a variety of flexibility resources[J]. *Power System Protection and Control*, 2024, 52(17): 139-149.
- [13] 白牧可, 刘洁, 钱志研, 等. 交直流复杂配电网故障恢复重构的双层多目标优化策略[J]. *智慧电力*, 2024, 52(12): 80-87.
- BAI Muke, LIU Jie, QIAN Zhiyan, et al. Bi-level multi-objective optimization strategy for fault recovery and reconstruction of AC/DC complex distribution networks[J]. *Smart Power*, 2024, 52(12): 80-87.
- [14] 杨胡萍, 李晓馨, 曹正东, 等. 考虑风光的两阶段配电网动态重构方法[J]. *电力系统保护与控制*, 2023, 51(21): 12-21.
- YANG Huping, LI Xiaoxin, CAO Zhengdong, et al. A two-stage dynamic reconfiguration method for distribution networks considering wind and solar power[J]. *Power System Protection and Control*, 2023, 51(21): 12-21.
- [15] SONG G, MA C, JI H, et al. Bi-level supply restoration method for active distribution networks considering multi-resource coordination[J]. *Modern Power Systems and Clean Energy*, 2025, 13(3): 967-979.
- [16] 王可淇, 赵子涵, 钟俊, 等. 基于改进模拟退火遗传算法的配电网动态故障恢复策略[J]. *智慧电力*, 2024, 52(6): 16-22.
- WANG Keqi, ZHAO Zihan, ZHONG Jun, et al. Dynamic fault recovery strategy for distribution network based on improved simulated annealing genetic algorithm[J]. *Smart Power*, 2024, 52(6): 16-22.
- [17] 郭嘉雨, 杨祺铭, 丁苒苒, 等. 高比例可再生能源配电网两阶段自适应鲁棒弹性提升策略[J]. *电力工程技术*, 2025, 44(6): 174-182.
- WU Jiayu, YANG Qiming, DING Ranran, et al. Two stage adaptive robust resilience enhancement strategy for distribution network with high penetration of renewable energy[J]. *Electric Power Engineering Technology*, 2025, 44(6): 174-182.
- [18] 孙宁言, 陈羽, 徐丙垠, 等. 含高比例分布式电源配电网分布式供电恢复方法[J]. *电力系统自动化*, 2024, 48(10): 161-170.
- SUN Ningyan, CHEN Yu, XU Bingyin, et al. Distributed power supply restoration method for distribution network with high proportion of distributed generators[D]. *Automation of Electric Power Systems*, 2024, 48(10): 161-170.
- [19] 宋毅, 孙充勃, 李鹏, 等. 基于智能软开关的有源配电网供电恢复方法[J]. *中国电机工程学报*, 2018, 38(15): 4390-4398, 4639.
- SONG Yi, SUN Chongbo, LI Peng, et al. SOP based supply restoration method of active distribution networks

- using soft open point[J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(15): 4390-4398, 4639.
- [20] 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 networks based on synergy of soft open point and tie switch[J]. Automation of Electric Power Systems, 2025, 49(24): 30-40.
- [21] SAAKLAYEN M A, LIANG X, FARIED S O. Soft open point-based service restoration coordinated with distributed generation in distribution networks[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2024, 6(2): 2554-2566.
- [22] 王成山, 宋关羽, 李鹏, 等. 一种联络开关和智能软开关并存的配电网运行时序优化方法[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(9): 2315-2321.
WANG Chengshan, SONG Guanyu, LI Peng, et al. A hybrid optimization method for distribution network operation with SNOP and tie switch[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(9): 2315-2321.
- [23] 解智刚, 韩蓓, 李国杰, 等. 含 SOP 的配电网多阶段供电恢复优化策略[J]. 电测与仪表, 2022, 59(1): 113-119.
XIE Zhigang, HAN Bei, LI Guojie, et al. Multi-stage power supply restoration optimization strategy for distribution network with SOP[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2022, 59(1): 113-119.
- [24] 杨墨缘, 张沈习, 程浩忠, 等. 考虑故障后多阶段恢复的 SOP 柔性互联配电网可靠性评估[J]. 中国电机工程学报, 2026, 46(1): 61-73.
YANG Moyuan, ZHANG Shenxi, CHENG Haozhong, et al. Reliability assessment for SOP-based flexible interconnected distribution network considering post-fault multi-stage recovery[J]. Proceedings of the CSEE, 2026, 46(1): 61-73.
- [25] 孙守晶, 丛伟, 邱吉福, 等. 含智能软开关的智能配电网分布式供电恢复方法[J]. 电力系统自动化, 2022, 46(8): 79-85.
SUN Shoujing, CONG Wei, QIU Jifu, et al. Distributed power restoration method for smart distribution network with soft open point[J]. Automation of Electric Power Systems, 2022, 46(8): 79-85.
- [26] BARAN M E, WU F F. Network reconfiguration in distribution systems for loss reduction and load balancing[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1989, 4(2): 1401-1407.
- [27] 黄武靖, 司方远, 张宁, 等. 面向韧性的城市能源系统安全规则提取及优化运行[J]. 电力系统自动化, 2023, 47(12): 1-8.
HUANG Wujing, SI Fangyuan, ZHANG Ning, et al. Resilience-oriented security rule extraction and optimal operation for urban energy system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2023, 47(12): 1-8.
- [28] 国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. 分布式电源并网技术要求: GB/T 33593—2017[S]. 北京: 中国标准出版社, 2017.
General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China, Standardization Administration of China. Technical requirements for grid connection of distributed generation: GB/T 33593—2017[S]. Beijing: China Standards Press, 2017.
- [29] 国家市场监督管理总局, 国家标准化管理委员会. 光伏发电站接入电力系统技术规定: GB/T 19964—2024[S]. 北京: 中国标准出版社, 2024.
State Administration for Market Regulation, Standardization Administration of China. Technical requirements for connecting photovoltaic power station to power system: GB/T 19964—2024[S]. Beijing: China Standards Press, 2024.
- [30] 王成山, 彭克, 孙绪江, 等. 分布式发电系统电力电子控制器通用建模方法[J]. 电力系统自动化, 2012, 36(18): 122-127.
WANG Chengshan, PENG Ke, SUN Xujiang, et al. Universal modeling method of power electronics controller for distributed generation system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(18): 122-127.
- [31] BLOEMINK J M, GREEN T C. Increasing distributed generation penetration using soft normally-open points[C] // IEEE PES General Meeting, July 25-29, 2010, Minneapolis, MN, USA: 1-8.
- [32] JIANG X, ZHOU Y, MING W, et al. An overview of soft open points in electricity distribution networks[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2022, 13(3): 1899-1910.

收稿日期: 2025-09-11; 修回日期: 2026-01-13

作者简介:

郑涛(1975—), 男, 博士, 教授, 研究方向为电力系统继电保护; E-mail: zhengtao@ncepu.edu.cn

马慧(2000—), 女, 通信作者, 硕士研究生, 研究方向为配电网故障恢复。E-mail: 2417122807@qq.com

(编辑 周金梅)