

doi:10.3969/j.issn.1673-9833.2025.01.005

基于储能型智能软开关节联合网络重构 的配电网供电恢复策略

喻希, 杨杉, 兰征, 高芷蓉

(湖南工业大学 电气与信息工程学院, 湖南 株洲 412007)

摘要: 为应对自然灾害、网路攻击等极端事件导致的停电事故, 并降低电网的失负荷率与经济损失, 提出了一种极端事件下储能型智能软开关 (energy storage integrated soft open point, E-SOP) 联合网络重构的主动配电网供电恢复策略。首先, 介绍了 E-SOP 接入配网的拓扑结构示意图, 并建立其在故障恢复下的数学模型。其次, 考虑三级负荷的重要程度和网络损耗, 以配网各节点损失程度和网络损失最小为目标函数, 构建 E-SOP 和网络重构联合进行供电恢复的运行模型, 实现极端事件下主动配电网的快速恢复。最后, 以改进的 IEEE33 节点配电网为例分别研究了 E-SOP 安装容量、位置、数量等参数对电网恢复能力的影响, 并对其供电恢复策略进行验证分析。研究表明: 所提策略可减少配电网故障下的失负荷率, 进一步提升供电恢复水平。

关键词: 极端事件; 储能型智能软开关; 供电恢复策略; 网络重构

中图分类号: TM732

文献标志码: A

文章编号: 1673-9833(2025)01-0035-08

引文格式: 喻希, 杨杉, 兰征, 等. 基于储能型智能开关节联合网络重构的配电网供电恢复策略 [J]. 湖南工业大学学报, 2025, 39(1): 35-42.

Power Supply Restoration Strategy for Distribution with Integrated Network Reconstruction Based on Energy Storage Intelligent Soft Switches

YU Xi, YANG Shan, LAN Zheng, GAO Zhirong

(College of Electrical and Information Engineering, Hunan University of Technology, Zhuzhou Hunan 412007, China)

Abstract: In view of power outages caused by extreme events such as natural disasters and cyber attacks, and a reduction of the load loss rate and economic losses of the power grid, an active distribution network power supply restoration strategy has thus been proposed with energy storage integrated soft open point (E-SOP) combined with network reconstruction under extreme events. Firstly, with an introduction of the topology diagram of E-SOP connected to the distribution network, its mathematical model under fault recovery is established. Secondly, taking into consideration the importance of the tertiary load and network losses, with the objective function of minimizing the loss of each node in the distribution network and minimizing network losses, a joint operation model of E-SOP and network reconstruction for power supply recovery is constructed for a rapid recovery of the active distribution network under

收稿日期: 2023-05-31

基金项目: 湖南省教育厅科学研究基金资助项目 (22C0308)

作者简介: 喻希, 男, 湖南工业大学硕士生, 主要研究方向为新型电力系统的应急与供电恢复,

E-mail: hutyuxi@163.com

通信作者: 杨杉, 女, 湖南工业大学讲师, 博士, 主要研究方向为电力系统的运行状态分析与计算, 安全性分析与威胁检测等, E-mail: 54803510@qq.com

extreme events. Finally, taking the improved IEEE33 node distribution network as an example, a research is carried out on the effects of E-SOP installation parameters such as capacity, location, and quantity on the restoration capability, followed by a validation and analysis of the proposed power restoration strategy. The research results indicate that the proposed strategy helps to reduce the loss of load rate under distribution network faults, thus further improving the level of power supply recovery.

Keywords: extreme event; energy storage intelligent soft switch; power restoration strategy; network reconstruction

1 研究背景

在新型电力系统下,配电网的安全运行面临着多重挑战,包括极端自然灾害和网络数据攻击等不确定事件^[1],这些因素可能会导致配电网发生连锁故障,进而引起大规模的停电事故,从而无法满足用户的供电需求^[2]。因此,为了减少这些事件对社会经济造成的损失,提高配电网对极端事件的抵御能力变得至关重要^[3]。

目前,电力系统研究领域将这种抵御能力称为“韧性”,其核心在于提升配电网的抗扰动力和恢复力^[4]。在国家“双碳”政策的推行下,大量分布式电源(distributed generation, DG)通过接入本地配电网,以实现电力系统的低碳运行。在故障发生时,这些电源还能支撑配电网的应急供电恢复。但是这类电源在出力上存在较大的波动性和随机性,接入配电网会给系统带来电压不稳定,甚至越限^[5]、消纳率低^[6]、潮流呈双向流动等问题。为了解决这些问题,一些研究者提出通过孤岛划分和网络重构手段调整联络开关和分段开关的开断,以改变拓扑结构,实现故障恢复^[7-9]。但这些方法只能改变供电恢复路径,对于失电负荷的有功支撑能力有限。

近年来,随着电力电子技术的快速发展,大量电力电子器件被应用于新型电力系统中。智能软开关(soft open point, SOP)便是其中之一,作为一种全控型电力电子器件,一般被安装在系统中的传统联络开关处,可以实现馈线之间的灵活互联^[10]。与传统联络开关相比,SOP具有空间上的动态调整功率传输能力,降低系统损耗,实现配网经济运行。此外,在故障发生时,SOP的直流隔离作用可防止故障扩散^[11],在故障恢复中,通过功率传输能为失电负荷提供有功支撑,保障大面积用户的供电需求。

针对供电恢复中DG带来的不确定性影响,储能系统(energy storage system, ESS)可以通过实时充放电来实现能量的时间转移,有效抑制分布式电源

带来的出力波动,并解决电压频繁越限等问题^[12]。通过将储能系统的直流变换器与智能软开关电力电子部分相连接,构成储能智能软开关(energy storage integrated soft open point, E-SOP),使其兼具两者优点,包括在时间和空间上调控配网潮流分布^[13],降低网络损耗以及治理电压越限。

目前,关于配电网正常工况下的E-SOP的研究已经较为广泛^[14-16],主要集中在从经济性角度出发进行E-SOP的规划配置和最优运行。而在遭遇极端事件后的故障工况下,利用E-SOP对配电网进行供电恢复的相关研究还相对较少。

为了解决上述问题,本研究考虑将E-SOP应用于配电网故障下的供电恢复,充分发挥SOP的可灵活传输有功潮流能力以及电压支撑能力,并且利用ESS改善DG的不确定性问题。首先,本文将阐述E-SOP的原理和数学模型;然后,构建包含E-SOP和DG的故障供电恢复模型,并结合网络重构和孤岛划分手段,以关键负荷损失成本与网络损失成本为目标函数,制定最优的E-SOP运行策略和网络恢复架构;最后,通过改进的IEEE33节点配电网对本文的供电恢复策略进行验证与分析,结果表明,本文所提出的联合E-SOP和网络重构的配网供电恢复策略,能够有效提高故障工况下负荷的恢复能力,保障重要负荷的供电。

2 E-SOP工作原理与数学模型

2.1 E-SOP工作原理

配电网在极端事件所引发的故障下,往往通过联络开关进行功率传输,而储能型智能软开关正充当这一关键角色替代传统联络开关连接相邻的馈线,工作原理如图1所示。由图1可知,E-SOP主要由两大部分构成,包括储能系统和智能软开关。储能系统通过DC/DC变换装置连接至智能软开关的直流部分,而智能软开关的拓扑主要以背靠背电压源型换流器(back to back voltage source converter, B2B VSC)构成,

最终接入交流配电网^[17]。利用 E-SOP 同时具备 SOP 的功率支撑能力和 ESS 的储能应急能力, 可以构建极端事件下的故障恢复模型。

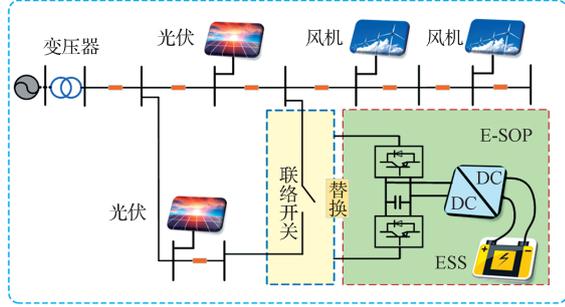


图1 极端事件下 E-SOP 接入配电网示意图

Fig. 1 Schematic diagram of E-SOP access to distribution network under extreme events

2.2 故障恢复下的 SOP 数学模型

E-SOP 的 SOP 模型构建主要包括 E-SOP 功率平衡约束、容量约束以及换流器损耗约束。具体的约束模型如下:

$$P_{i,t}^{E-SOP} + P_{j,t}^{E-SOP} + P_{ij}^{loss} + P_{ij,t}^{ESS} = 0. \quad (1)$$

式中: $P_{i,t}^{E-SOP}$ 和 $P_{j,t}^{E-SOP}$ 分别为储能型智能软开关的两个 VSC 在 t 时刻注入配电网节点 i 和 j 的有功功率; P_{ij}^{loss} 为连接节点 i 和 j 处的 SOP 换流器损耗, 且

$$P_{ij}^{loss} = P_{i,t}^{loss} + P_{j,t}^{loss}; \quad (2)$$

$$\text{其中, } P_{i,t}^{loss} = \mu \sqrt{(P_{i,t}^{E-SOP})^2 + (Q_{i,t}^{E-SOP})^2}, \quad (3)$$

$$P_{j,t}^{loss} = \mu \sqrt{(P_{j,t}^{E-SOP})^2 + (Q_{j,t}^{E-SOP})^2}; \quad (4)$$

$$\sqrt{(P_{i,t}^{E-SOP})^2 + (Q_{i,t}^{E-SOP})^2} \leq S_{ij,t}^{E-SOP}; \quad (5)$$

$$\sqrt{(P_{j,t}^{E-SOP})^2 + (Q_{j,t}^{E-SOP})^2} \leq S_{ij,t}^{E-SOP}. \quad (6)$$

式(3)~(6)中: μ 为损耗系数; $Q_{i,t}^{E-SOP}$ 和 $Q_{j,t}^{E-SOP}$ 分别为储能型智能软开关的两个 VSC 在 t 时刻注入配电网节点 i 和 j 的无功功率; $S_{ij,t}^{E-SOP}$ 为 ij 处 E-SOP 的配置容量。

式(3)(4)分别为连接节点 i 和 j 的换流器损耗计算公式, 式(5)(6)表示 E-SOP 的容量上限约束。

2.3 故障恢复下的 ESS 数学模型

对于 E-SOP 中的储能系统, 主要包括储能充电标识约束、充放电功率上限约束、电量守恒约束, 以及荷电状态约束等。具体模型如下:

$$a_{ESS,ij}^{ch}(t) + a_{ESS,ij}^{dis}(t) \leq 1, \quad \forall i, j, t; \quad (7)$$

$$0 \leq P_{ESS,ij}^{ch}(t) \leq a_{ESS,ij}^{ch}(t) P_{ESS,ij}^{ch,max}, \quad \forall i, j, t; \quad (8)$$

$$0 \leq P_{ESS,ij}^{dis}(t) \leq a_{ESS,ij}^{dis}(t) P_{ESS,ij}^{dis,max}, \quad \forall i, j, t; \quad (9)$$

$$E_{ij,t+1}^{ESS} = E_{ij,t}^{ESS} + \left(\eta_{ch} P_{ij,t}^{ch} - \frac{P_{ij,t}^{dis}}{\eta_{dis}} \right) \Delta t; \quad (10)$$

$$S_{min}^{SOC} \leq E_{ij,t}^{ESS} / E_{ESS,ij}^{CAP} \leq S_{max}^{SOC}, \quad \forall i, j, t; \quad (11)$$

$$E_{ij,0}^{ESS} = E_{ij,t}^{ESS}. \quad (12)$$

式(7)~(12)中: $a_{ESS,ij}^{ch}$ 、 $a_{ESS,ij}^{dis}$ 分别为 E-SOP 中储能系统的充放电功率标识, 取值为 $\{0, 1\}$; $P_{ESS,ij}^{ch}$ 、 $P_{ESS,ij}^{dis}$ 分别为储能在 t 时刻的充放电功率; $E_{ij,t}^{ESS}$ 为储能在 t 时刻的电量; η_{ch} 、 η_{dis} 分别为储能系统的充放电效率; $E_{ESS,ij}^{CAP}$ 为储能容量; S_{max}^{SOC} 、 S_{min}^{SOC} 为荷电状态的上下限。

式(10)的目的是保证储能系统日内能量守恒。

3 联合 E-SOP 和网络重构进行供电恢复的运行模型

在配电网发生故障时, 确保关键一级负荷的供电至关重要。在此基础上, 应尽可能地恢复二级负荷, 并逐步恢复其他负荷。为此, 本节提出了一个目标函数, 旨在最小化配电网各节点的负荷损失和网络损耗; 通过结合 E-SOP 和网络重构策略, 旨在实现配电网在故障发生后的高效供电恢复。

3.1 目标函数

$$\min f = f_1 + f_2, \quad (13)$$

$$f_1 = \sum_{i \in N_b} \omega_i P_{i,t}^L, \quad (14)$$

$$f_2 = \sum_{ij \in N_l} I_{ij,t}^2 r_{ij}. \quad (15)$$

式(13)~(15)中: f_1 为负荷恢复程度; f_2 为线路损耗; $P_{i,t}^L$ 为节点 i 在 t 时刻的有功负荷需求; ω_i 为不同等级负荷点损失后的价值系数; $I_{ij,t}$ 为 t 时刻线路 ij 上的电流值; r_{ij} 为线路 ij 上的电阻值。

3.2 含 E-SOP 的供电恢复运行约束

3.2.1 辐射状约束

本研究考虑网络重构和 E-SOP 结合进行故障供电恢复, 由于配电网中包含可控电源与分布式电源, 在配电网网络拓扑进行重构时可能会出现孤岛支撑负荷局部供电的情况。因此, 需要让网络在故障发生前后均保持辐射状, 本研究采用单商品流法构建虚拟网络进行约束^[18]。具体约束如下:

$$\sum_{s \in \delta(j)} H_{js} - \sum_{i \in \pi(j)} H_{ij} = -1, \quad j \in N_b \setminus N_{DG}; \quad (16)$$

$$\sum_{s \in \delta(j)} H_{js} - \sum_{i \in \pi(j)} H_{ij} = W_j, \quad j \in N_{DG}; \quad (17)$$

$$-Mu_{ij} < H_{ij} < Mu_{ij}, \quad ij \in N_l; \quad (18)$$

$$-M(2-u_{ij}) < H_{ij} < M(2-u_{ij}), ij \in N_i; \quad (19)$$

$$W_j \geq 1, j \in N_{DG}; \quad (20)$$

$$\sum_{ij \in N_i} u_{ij} = |N_b| - |N_{DG}|. \quad (21)$$

式(16)~(21)中: H_{js} 、 H_{ij} 为虚拟网络中的虚拟功率流; W_j 是虚拟网络中的“源”; u_{ij} 为一个开关函数,取值为{0,1},表示线路 ij 是否通断,取1值时,表示线路 ij 连通,否则断开; M 为一个较大的常数; N_b 、 N_{DG} 分别为配电网节点数和分布式电源数。

3.2.2 运行约束

含分布式电源和E-SOP的配电网供电恢复运行模型包含潮流约束、失负荷约束、电源出力约束、系统安全约束、E-SOP的其余约束。

1) 配电网潮流约束为

$$\begin{cases} \sum_{k \in \delta(j)} P_{jk,t} - \sum_{i \in \pi(j)} (P_{ij,t} - I_{ij,t}^2 r_{ij}) = P_{inv}, \\ P_{inv} = P_{j,t}^{grid} + P_{j,t}^{DG} + P_{j,t}^{E-SOP} - (1 - \rho_{j,t}) P_{j,t}^L, \forall j \in N_b, \forall t \in T; \\ \sum_{k \in \delta(j)} Q_{jk,t} - \sum_{i \in \pi(j)} (Q_{ij,t} - I_{ij,t}^2 x_{ij}) = Q_{inv}, \\ Q_{inv} = Q_{j,t}^{grid} + Q_{j,t}^{E-SOP} - (1 - \rho_{j,t}) Q_{j,t}^L, \forall j \in N_b, \forall t \in T; \\ V_{i,t}^2 - V_{j,t}^2 + (r_{ij}^2 + x_{ij}^2) I_{ij,t}^2 - 2(r_{ij} P_{ij,t} + x_{ij} Q_{ij,t}) = 0. \end{cases} \quad (22)$$

式中: $\delta(j)$ 为配电网中以 j 为父节点的支路子节点集合; $\pi(j)$ 为配电网中以 j 为子节点的支路父节点集合; $P_{ij,t}$ 、 $Q_{ij,t}$ 分别为线路 ij 上传输的有功和无功功率; $P_{j,t}^{grid}$ 、 $Q_{j,t}^{grid}$ 分别为根节点经过变压器与配电网的交互有功、无功功率; $Q_{j,t}^L$ 为节点 j 处 t 时刻的负荷无功需求; $P_{j,t}^{DG}$ 为分布式电源的有功功率输出; $P_{j,t}^L$ 、 $Q_{j,t}^L$ 分别为 t 时刻节点 j 处的正常有功和无功负荷需求; $V_{i,t}$ 、 $V_{j,t}$ 分别为节点 i 和 j 的电压值; $\rho_{j,t}$ 为节点 j 处的失负荷率; x_{ij} 为线路 ij 上的电抗; T 为运行时间。

2) 故障下配网失负荷约束为

$$0 \leq \rho_{j,t} \leq 1, \forall j \in N_b, \forall t \in T. \quad (23)$$

3) 电源出力约束为

$$P_{min}^{grid} \leq P_{j,t}^{grid} \leq P_{max}^{grid}, \quad (24)$$

$$0 \leq P_{j,t}^{DG} \leq P_{pre}^{DG}. \quad (25)$$

式(24)(25)中: P_{max}^{grid} 、 P_{min}^{grid} 为根节点电源出力上下限; P_{pre}^{DG} 为分布式电源的预测有功功率输出。

4) 系统安全约束为

$$\begin{cases} V_{j,min}^2 \leq V_{j,t}^2 \leq V_{j,max}^2, \\ 0 \leq I_{ij,t}^2 \leq I_{ij,max}^2. \end{cases} \quad (26)$$

式中: $V_{j,min}$ 、 $V_{j,max}$ 分别为节点 j 处的电压值下限和

上限。

5) E-SOP 其余运行约束为

$$Q_{min}^{E-SOP} \leq Q_{ij,t}^{E-SOP} \leq Q_{max}^{E-SOP}, \quad (27)$$

$$V_N^2 \leq V_{j,t}^2. \quad (28)$$

式(27)(28)中: Q_{max}^{E-SOP} 、 Q_{min}^{E-SOP} 分别为E-SOP的无功上下限; V_N^2 为电压标幺值的最低值。

式(28)表示故障时E-SOP故障侧节点电压约束。

3.2.3 二阶锥算法

上述提到的数学模型从本质上属于混合整数非线性优化问题,直接进行求解比较困难,往往需要通过一些数学方法将非线性部分进行线性化,并运用二阶锥算法^[19]进行松弛处理。

首先,将E-SOP模型中的式(3)~(6)转化成如下二阶锥形式:

$$\left\| \begin{bmatrix} P_{i,t}^{E-SOP} & Q_{i,t}^{E-SOP} \end{bmatrix}^T \right\|_2 \leq S_i^{E-SOP}, \quad (29)$$

$$\left\| \begin{bmatrix} P_{j,t}^{E-SOP} & Q_{j,t}^{E-SOP} \end{bmatrix}^T \right\|_2 \leq S_j^{E-SOP}, \quad (30)$$

$$\left\| \begin{bmatrix} P_{i,t}^{E-SOP} & Q_{i,t}^{E-SOP} \end{bmatrix}^T \right\|_2 \leq \frac{P_{i,t}^{E-SOP,loss}}{\mu^{E-SOP}}, \quad (31)$$

$$\left\| \begin{bmatrix} P_{j,t}^{E-SOP} & Q_{j,t}^{E-SOP} \end{bmatrix}^T \right\|_2 \leq \frac{P_{j,t}^{E-SOP,loss}}{\mu^{E-SOP}}. \quad (32)$$

其次,对配电网安全约束中的二次非线性部分,通过 $\tilde{V}_{j,t} = V_{j,t}^2$ 和 $\tilde{I}_{ij,t} = I_{ij,t}^2$ 进行转化^[20]。

最后,对式(22)进行二阶锥松弛,得到

$$\left\| \begin{bmatrix} 2P_{ij,t} \\ 2Q_{ij,t} \\ \tilde{I}_{ij,t} - \tilde{V}_{j,t} \end{bmatrix} \right\|_2 \leq \tilde{I}_{ij,t} + \tilde{V}_{j,t}. \quad (33)$$

因此,利用E-SOP和网络重构结合的含分布式电源的配电网故障供电恢复模型可以表示如下:

min f

$$\begin{cases} \text{E-SOP运行约束} & \text{式(1)~(2), (7)~(12),} \\ \text{网络重构约束} & \text{式(16)~(21),} \\ \text{潮流约束} & \text{式(22),} \\ \text{失负荷约束} & \text{式(23),} \\ \text{电源出力约束} & \text{式(24)~(25),} \\ \text{系统安全运行约束} & \text{式(33).} \end{cases}$$

4 算例分析

4.1 运行平台与参数设置

本研究使用的硬件平台参数如下:CPU型号为12th Gen Intel(R) Core(TM) i7-12700H;内存型号为

DDR4 16 GB, 频率 3 200 MHz。软件平台为 Matlab R2018b 集成优化工具箱 YALMIP (版本 20200116) 和求解器 IBM ILOG CPLEX (版本 12.8.0)。

本文采用改进的 IEEE33 节点配电网进行算例验证, 如图 2 所示, 在节点 12 和 22 之间接入 E-SOP, 代替传统联络开关。该系统的电压基准值为 12.66 kV, 基准功率为 1 MW, 设置 5 组分布式光伏, 其容量以及位置如表 1 所示。考虑三级负荷的供电优先级, 其各节点权重如表 2 所示。

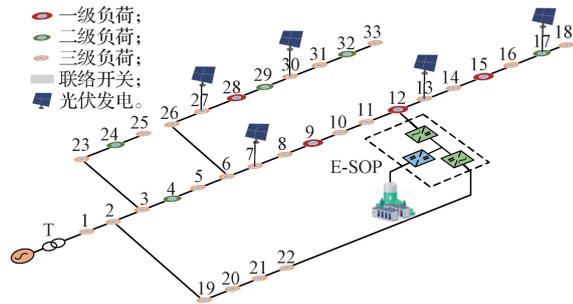


图 2 改进的 IEEE33 节点配电网示意图

Fig. 2 Improved IEEE33 node distribution network diagram

表 1 分布式光伏参数

Table 1 Distributed PV parameters

光伏位置点	7	13	17	27	30
容量 /kW	400	200	300	400	200

表 2 不同负荷等级损失价值

Table 2 Loss value at different load levels

负荷等级	节点位置	负荷损失价值 / (元·kW ⁻¹)
一级负荷	9, 12, 15, 28	100
二级负荷	4, 17, 24, 29, 32	30
三级负荷	其余节点	10

4.2 E-SOP 参数对供电恢复程度分析

4.2.1 E-SOP 配置容量

为探究 E-SOP 是否与 SOP 具备相同的功率支撑特性, 通过改变其配置的容量来分析对供电恢复的能力。改变算例中 E-SOP 的容量, 分别设置为 1, 2, 3, 4, 5, 6 MW 进行算例测试, 并假设极端事件造成线路 2-3 故障, 则系统将有 3.720 8 MW 负荷处于断供电。通过不同容量下的 E-SOP 进行供电恢复, 其效果如表 3 所示。

表 3 E-SOP 不同容量下的负荷恢复供电对比

Table 3 Comparison of load recovery power supply under different E-SOP capacities

E-SOP 容量 / MW	1	2	3	4	5	6
负荷恢复率 / %	36.37	70.59	90.22	95.74	96.40	96.40

通过分析表 3 可知, 随着 E-SOP 所配置的容量增加, 系统的负荷恢复也随之提高, 但容量提高至 5 MW 后, 其恢复率不再变化, 保持最高恢复水平, 最终负荷恢复由原本的 36.37% 提高至 96.40%。由此可见, 在一定范围内合理增加 E-SOP 的配置容量, 可有效提高系统的负荷恢复率。

4.2.2 E-SOP 配置数量与位置

极端事件下, 配电网往往表现为多线路故障, 同时系统中关键负荷节点的位置分散, 若只在一处安装 E-SOP, 其应急供电效果理论上不如分开进行配置要高。因此, 通过将 E-SOP 安装在不同位置处进行功率传输, 分析其对供电恢复能力的影响。本文假设线路 5-6 和 13-14 发生故障, 并将原本安装在 12-22 处 2 MW 容量的 E-SOP 替换为在 12-22 和 18-33 处单独安装容量为 1 MW 的 E-SOP。其示意图如图 3 所示, 负荷恢复效果对比如表 4 所示。

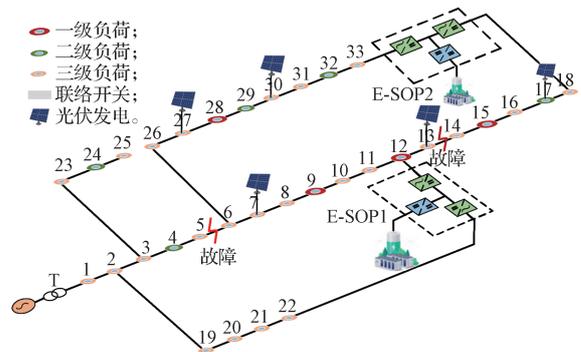


图 3 双 E-SOP 接入配电网示意图

Fig. 3 Schematic diagram of dual E-SOP access to distribution network

表 4 E-SOP 不同容量下的负荷恢复供电对比

Table 4 Comparison of load recovery power supply under different E-SOP capacities

E-SOP 方案	负荷恢复率 / %	最低电压 / (p. u.)
12-22 (2 MW)	75.98	1.002
12-22 (1 MW)	81.25	1.026
18-33 (1 MW)		

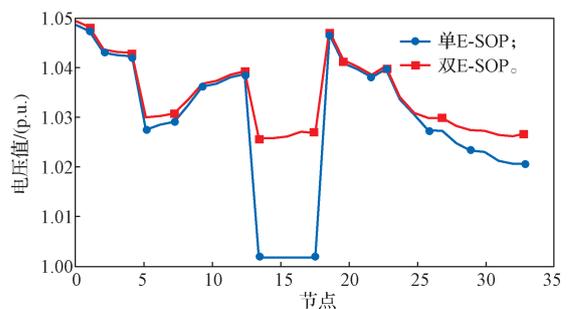


图 4 接入不同数量 E-SOP 后的配电网电压水平

Fig. 4 Distribution network voltage levels when connected to different E-SOP numbers

由图4和表4可以看出,将E-SOP分开进行同等容量的配置要优于仅在单个位置进行配置所得到的恢复供电,负荷恢复率能提高6.93%。与此同时,故障恢复期间的最低电压也能得到提升。由图4可以看出,通过双E-SOP的无功支撑,其配电网节点电压相较于单E-SOP能够更好地提升电压水平,尤其是在节点14-18处,电压提升效果最为明显,这是因为利用18-33处的E-SOP可以解决原本故障导致13线路以后的负荷得不到功率传输的问题。

4.3 E-SOP 联合网络重构含分布式资源的供电恢复

配电网在遭受事件导致的故障后,线路架构会发生较大变化,其潮流分布也随之改变。依靠传统联络开关和分段开关的通断无法满足关键负荷的供电保障,因此本文考虑将分布式电源、网络重构以及E-SOP相联合对配电网进行供电恢复策略。假定线路5-6发生断线故障,通过以下几个方案对比其对配电网的供电恢复效果:

方案1 依靠传统联络开关进行恢复,不进行网络重构;

方案2 用E-SOP代替传统联络开关,不进行网络重构;

方案3 仅通过网络重构进行供电恢复;

方案4 通过网络重构和E-SOP相结合的含分布式电源的供电恢复策略,即本文所提方案。

各方案恢复结果以及目标函数数值如表5所示。

表5 恢复结果

Table 5 Recovery results

方案	负荷恢复率/%	目标函数值/元
方案1	69.44	11 699.0
方案2	76.18	9 473.0
方案3	84.61	7 500.0
方案4	99.78	595.4

由表5可知,4种方案中,方案1仅依靠传统联络开关进行供电恢复,其负荷恢复率为69.44%,其系统综合损失值约达1.17万元,若改用E-SOP进行供电恢复,其负荷恢复率约可提升9.7%,表明E-SOP用于供电恢复的恢复能力要优于传统联络开关。此外,本文方案通过将网络重构和E-SOP相结合进行供电恢复,其负荷恢复率相比于方案2和方案3的单一E-SOP进行恢复,其恢复率得到有效提升,最终使系统负荷恢复率达99.78%,保障绝大部分负荷可靠供电。

本研究方案下的配网重构后供电恢复示意图如图5所示,由图5可知,12节点为一级负荷,为保障其完全恢复供电,系统优化分段开关和联络开关。

将线路11-12、12-13断开,通过E-SOP单独进行供电支撑。此外,系统的重构情况满足配电网开环运行的辐射状拓扑,确保配电网故障恢复时的合理运行。

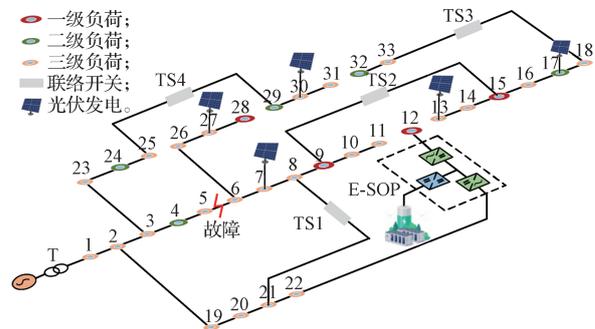
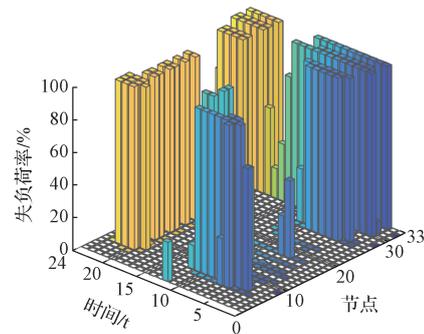


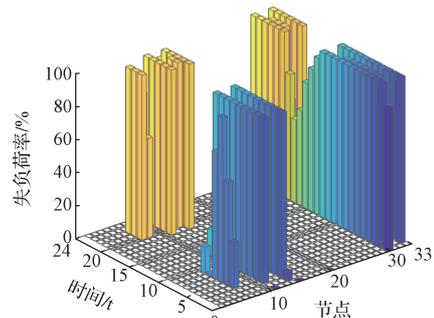
图5 本文方案下的配网重构后供电恢复示意图

Fig. 5 Schematic diagram of power supply restoration after distribution network reconstruction under the proposed scheme

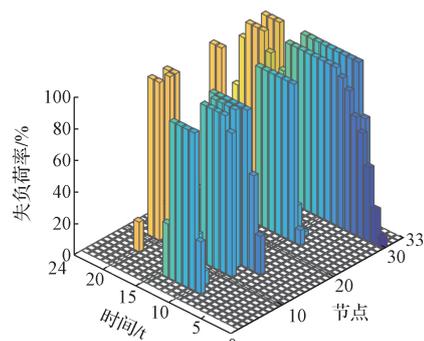
4种方案下24h各节点失负荷率结果见图6。



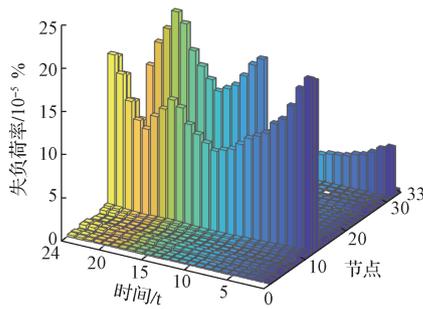
a) 方案1



b) 方案2



c) 方案3



d) 方案4 (本研究方案)

图6 不同方案下各节点失负荷率三维图

Fig. 6 Three-dimensional diagram of the node failure rate under different schemes

观察图6可以得出,方案1的失负荷率最差,方案4利用E-SOP联合网络重构进行供电恢复策略可以使得配电网的失负荷率保持近乎为0,从而有效应对极端事件给配电网负荷侧带来的停电事故。

5 结论

配电网在极端事件情境下,传统联络开关在供电恢复方面存在的局限性,具体表现为恢复效率低下及单一网络重构策略难以有效提供充足的有功支持。针对这一挑战,本文创新性地提出了一种融合储能型智能软开关技术与网络重构策略的主动配电网供电恢复方案。该方案旨在通过智能软开关的灵活调控与储能系统的能量缓冲作用,协同优化网络结构,实现节点负荷的快速、高效恢复供电。

通过构建详尽的算例分析,并与传统方法进行对比,得出了以下结论:

1) 增加E-SOP容量可有效提高功率传输能力,降低配电网失负荷率,此外将E-SOP分开进行配置比仅在一个位置进行配置,其负荷供电恢复率可提高6.93%,同时配电网的节点电压水平能够得到相应提升。

2) 本文所考虑供电恢复策略,能将E-SOP和网络重构相结合。相较于单一E-SOP和传统联络开关方案以及单一进行网络重构方案,其负荷的供电恢复率最优,最大可提高至99.78%,网络重构的加入,同时利用E-SOP提供有功支撑,有效保障了一级负荷在故障全时段下的供电需求。

参考文献:

[1] 张亚超,丁志龙,谢仕炜,等.面向能源互联网的配电网韧性提升研究综述及展望[J].电网技术,2023,47(5):2054-2069.

ZHANG Yachao, DING Zhilong, XIE Shiwei, et al. Review and Prospect of Power Distribution Network Resilience Enhancement for Energy Internet[J]. Power System Technology, 2023, 47(5): 2054-2069.

[2] 王晗,侯恺,余晓丹,等.计及地震灾害不确定性的电气互联系统韧性评估与提升方法[J].中国电机工程学报,2022,42(3):853-864.

WANG Han, HOU Kai, YU Xiaodan, et al. The Assessment and Improvement Method of Electricity-Gas System Resilience Considering Earthquake Disaster Uncertainty[J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(3): 853-864.

[3] 唐雅洁,李俊豪,林达,等.考虑分布式光伏高效消纳与负荷损失最小的区域配电网应急资源协同配置策略[J].电力自动化设备,2024,44(7):78-85.

TANG Yajie, LI Junhao, LIN Da, et al. Coordinated Allocation Strategy of Emergency Resource for Regional Distribution Network Considering Distributed Photovoltaic Efficient Absorption and Minimum Load Loss[J]. Electric Power Automation Equipment, 2024, 44(7): 78-85.

[4] 阮前途,梅生伟,黄兴德,等.低碳城市电网韧性提升挑战与展望[J].中国电机工程学报,2022,42(8):2819-2830.

RUAN Qiantu, MEI Shengwei, HUANG Xingde, et al. Challenges and Research Prospects of Resilience Enhancement of Low-Carbon Power Grid[J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(8): 2819-2830.

[5] 李乃双,郝丽丽,郝思鹏,等.含分布式电源的配电网电压越限薄弱环节识别方法[J].电力自动化设备,2019,39(4):36-43.

LI Naishuang, HAO Lili, HAO Sipeng, et al. Identification Method of Voltage Over-Limit Weak Link in Distribution Network with Distributed Generation[J]. Electric Power Automation Equipment, 2019, 39(4): 36-43.

[6] 王婷,陈晨,谢海鹏.配电网对分布式电源和电动汽车的承载力评估及提升方法综述[J].电力建设,2022,43(9):12-24.

WANG Ting, CHEN Chen, XIE Haipeng. Review on Evaluation and Promotion Methods of Carrying Capacity for Distributed Generation and Electric Vehicles in Distribution Network[J]. Electric Power Construction, 2022, 43(9): 12-24.

[7] 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.
- [8] 陈文兴, 张沈习. 考虑孤岛划分与网络重构相配合的主动配电网故障恢复策略[J]. 水电能源科学, 2022, 40(1): 200-205.
CHEN Wenxing, ZHANG Shenxi. Active Distribution Network Fault Recovery Strategy Considering Coordination Between Island Partition and Network Reconfiguration[J]. Water Resources and Power, 2022, 40(1): 200-205.
- [9] 李小文, 安义, 刘娟, 等. 基于启发式规则与改进和声算法的配网快速故障恢复网络重构[J]. 电力科学与技术学报, 2021, 36(4): 91-99.
LI Xiaowen, AN Yi, LIU Juan, et al. Fast Service Restoration of Distribution Network Based on Combination of Heuristic Rules and Improved Harmony Search Algorithm[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2021, 36(4): 91-99.
- [10] 简力, 袁旭峰, 熊炜, 等. 计及SOP柔性互联配电网经济性重构优化研究[J]. 电力科学与工程, 2020, 36(12): 1-7.
JIAN Li, YUAN Xufeng, XIONG Wei, et al. Research on Optimization of Economic Reconstruction of Flexible Interconnected Distribution Network Considering SOP[J]. Electric Power Science and Engineering, 2020, 36(12): 1-7.
- [11] 赵晶晶, 李梓博, 刘帅, 等. 考虑智能软开关电压支撑的城市配电网弹性提升方法[J]. 电力建设, 2023, 44(7): 77-86.
ZHAO Jingjing, LI Zibo, LIU Shuai, et al. Resilience Lifting Method of Urban Distribution Network Considering Soft Open Point Voltage Support[J]. Electric Power Construction, 2023, 44(7): 77-86.
- [12] 苏向敬, 刘一航, 张知宇, 等. 计及源荷不确定影响的不平衡配电网两阶段优化[J]. 电力系统保护与控制, 2022, 50(23): 94-103.
SU Xiangjing, LIU Yihang, ZHANG Zhiyu, et al. Two-Stage Optimization of Unbalanced Distribution Networks Considering Impacts of DG and Load Uncertainties[J]. Power System Protection and Control, 2022, 50(23): 94-103.
- [13] 宋关羽, 于川航, 冀浩然, 等. 考量量测数据质量的集成储能智能软开关数据驱动电压控制[J]. 电力系统自动化, 2023, 47(6): 90-100.
SONG Guanyu, YU Chuanhang, JI Haoran, et al. Data-Driven Voltage Control of Energy Storage Integrated Soft Open Point Considering Quality of Measurement Data[J]. Automation of Electric Power Systems, 2023, 47(6): 90-100.
- [14] 王俊丰, 孔令生, 范心明, 等. 面向有源配电网运行经济性的智能储能软开关规划[J]. 电力建设, 2020, 41(10): 63-70.
WANG Junfeng, KONG Lingsheng, FAN Xinming, et al. Optimal Planning for Soft Open Point Integrated with ESS to Improve the Economy of Active Distribution Network[J]. Electric Power Construction, 2020, 41(10): 63-70.
- [15] 李勇, 凌锋, 乔学博, 等. 基于网侧资源协调的自储能柔性互联配电系统日前-日内优化[J]. 电工技术学报, 2024, 39(3): 1-17.
LI Yong, LING Feng, QIAO Xuebo, et al. Day-Ahead and Intra-Day Optimization of Flexible Interconnected Distribution System with Self-Energy Storage Based on the Grid-Side Resource Coordination[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2024, 39(3): 1-17.
- [16] HU R N, WANG W, WU X Z, et al. Interval Optimization Based Coordinated Control for Distribution Networks with Energy Storage Integrated Soft Open Points[J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2022, 136: 107725.
- [17] BAGHBAN-NOVIN S, HAMIDI A, GOLSHANNAVAZ S, et al. E-SOP's Contribution in a Techno-Economic and Clean Operation of Distribution Networks: A Multi-Objective Optimization Approach Based on Linear Models[J]. International Transactions on Electrical Energy Systems, 2020, 30(2): e12235.
- [18] DING T, LIN Y L, LI G F, et al. A New Model for Resilient Distribution Systems by Microgrids Formation[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2017, 32(5): 4145-4147.
- [19] 刘健辰, 刘山林. 基于二阶锥松弛和Big-M法的配电网分布式电源优化配置[J]. 电网技术, 2018, 42(8): 2604-2611.
LIU Jianchen, LIU Shanlin. Optimal Distributed Generation Allocation in Distribution Network Based on Second Order Conic Relaxation and Big-M Method[J]. Power System Technology, 2018, 42(8): 2604-2611.
- [20] LI N, CHEN L J, LOW S H. Exact Convex Relaxation of OPF for Radial Networks Using Branch Flow Model[C]//IEEE Third International Conference on Smart Grid Communications. Tainan, China: IEEE. 2012: 7-12.

(责任编辑: 姜利民)