

考虑智能软开关的有源配电网恢复力评估与提升

叶宇鑫, 李更丰*, 别朝红, 易皓, 张鼎茂

(西安交通大学电气工程学院, 陕西省 西安市 710049)

Resilience Assessment and Improvement of Active Distribution Networks Considering Soft Open Point

YE Yuxin, LI Gengfeng*, BIE Zhaohong, YI Hao, ZHANG Dingmao

(School of Electrical Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, Shaanxi Province, China)

Abstract: The distribution network is the “last mile” of power supply. Its power supply recovery speed and the ratio of the recovery load affect the resilience of the power system. Therefore, it is particularly important to improve the power supply recovery capability of the distribution network under extreme natural disasters. The soft open point (SOP) is a fully-controlled power electronic device, which has the advantages of continuous power regulation and reactive voltage support, and will be widely used in the normal operation and power supply recovery of the distribution system. Firstly, the load recovery model of the active distribution network is established by considering the power supply recovery of the load through the controllable distributed generations and SOP after the fault. Secondly, the resilience assessment process that embeds the load recovery model into the sequential Monte Carlo simulation process is proposed. Finally, the proposed algorithm was applied to the modified IEEE-33 bus system to verify its correctness and effectiveness. We got the differences between SOP and other recovery measures, and the improvement of the distribution network resilience under the combined action of SOP and controllable distributed power generation is analyzed.

Keywords: soft open point; active distribution network; resilience assessment; load restoration

摘要: 配电网作为供电的最后环节, 其供电恢复速度和恢复负荷的比例影响着整个电力系统的恢复力水平, 因此提升系统遭受极端自然灾害下的配电网供电恢复能力显得尤为重要。智能软开关 (soft open point, SOP) 是一种全控型电力

电子器件, 具有连续调节功率和提供无功电压支撑等优点, 将会在配电系统正常运行和供电恢复中得到广泛应用。以配电网恢复力评估与提升为目标, 首先, 考虑故障后通过可控分布式电源和SOP恢复负荷供电, 建立有源配电网负荷恢复模型; 其次, 提出将负荷恢复模型嵌入到时序蒙特卡洛模拟过程中的恢复力评估流程; 最后, 在修改的IEEE-33节点系统测试了算法的正确性和有效性, 得到了SOP和其他恢复措施相比的不同之处, 并分析了其与可控分布式电源联合作用下对配电网恢复力的提升作用。

关键词: 智能软开关; 有源配电网; 恢复力评估; 负荷恢复

0 引言

近年来, 台风、暴雨、冰灾等极端自然灾害频发, 给电网带来了巨大的经济损失, 构建能抵御极端事件的弹性电力系统刻不容缓。配电网作为供电的最后环节, 多数停电事件源于配电系统, 供电快速恢复是提高配电网恢复力的关键^[1-2]。随着配电网形态的不断演变, 配电网的网络结构和负荷组成部分都将发生巨大的变化, 将会有大量的分布式设备, 例如储能、光伏和电动汽车等接入配电网中, 交直流混合与微电网运行方式将成为未来的主流趋势^[3-5]。

智能软开关 (soft open point, SOP) 作为改变配电网结构和运行方式的重要设备之一, 能提高系统运行的灵活性, 其一般安装在传统配电系统联络开关处, 可以实现馈线间的互联, 在正常运行情况下能起到潮流控制、无功补偿和电压调节作用^[6-7]。目前, 已有相关研究将SOP的作用考虑到配电系统正常运行和可靠性评估中: 文献[8]提出联络开关和SOP并存的配电网运行优化模型; 文献[9]提出了含柔性多状态开关的多端互联配电网可靠性评估方法; 文献[10]研究了

基金项目: 国家电网有限公司总部科技项目 (弹性配电网快速恢复能力提升的关键技术与核心装备, 5400-202199523A-0-5-ZN)。

Science and Technology Foundation of SGCC(Key Technologies and Equipment for Improving the Rapid Restoration Capability of Resilient Distribution Networks, 5400-202199523A-0-5-ZN).

含四端SOP的有源配电网可靠性评估问题。SOP相比传统联络开关,具有连续调节潮流,提供无功和电压支撑等优势,同样也能在配电网灾后恢复过程中起到重要作用。考虑到SOP的成本较高,仅从优化运行角度分析,并不能充分体现其给电网带来的效益,还需要分析其对恢复力提升作用,为SOP合理配置提供参考。因此,研究考虑智能软开关接入的配电系统恢复力评估方法具有重要意义。

目前已有许多学者开展了利用SOP进行供电恢复的模型和方法研究。文献[11]研究了SOP和分布式电源联合进行供电恢复的策略;文献[12]提出含SOP的配电网两步式恢复方法,根据恢复策略进行SOP的控制模式切换;文献[13]提出基于SOP的有源配电网供电恢复二阶锥凸优化模型;文献[14]提出了考虑维修队、移动应急车和SOP形成微网集群的多时段负荷恢复模型;文献[15]利用原始对偶内点算法求解含SOP的非线性规划问题;文献[16]提出了基于SOP的时序孤岛划分模型,模型中还考虑了分布式电源、储能和负荷的特性;文献[17]提出了利用SOP进行供电恢复的双层区间鲁棒优化模型;文献[18]提出了一种含SOP的智能配电网分布式供电恢复方法。但目前已有研究主要侧重研究恢复策略和方法,而对于含SOP的系统弹性和恢复力评估方面研究较少。文献[19]建立了基于多阶段弹性映射的配电网模型,将含SOP的支路进行弹性力学映射,把电气支路视为“弹簧”支路,赋予其弹性系数属性,以体现电力系统抵御外界扰动的反应能力。

本文针对含有可控分布式电源的有源配电系统遭受极端灾害而发生的情况,通过SOP或可控分布式电源进行供电恢复,评估分析系统在极端灾害下的恢复力。首先,考虑故障后通过可控分布式电源和SOP恢复负荷供电,建立有源配电网负荷恢复模型;其次,提出将负荷恢复模型嵌入到时序模拟过程中的恢复力评估流程;最后,通过修改的IEEE-33节点系统算例分析SOP对负荷恢复在电压支撑和功率支援的作用,同时在宏观层面体现其对配电网恢复力的提升作用。

1 有源配电网负荷恢复模型建立

1.1 拓扑约束

本文采用配电网Dist-flow模型^[20],并忽略各支路和SOP的损耗。指定每条支路的功率正方向为小编号

节点流向大编号节点,大编号节点为下游节点, $\delta(j)$ 表示求取 j 节点的下游节点集合, $\pi(j)$ 表示求取 j 节点的上游节点集合,如图1所示。由此可知,拓扑中节点间上下游关系与潮流流向无关,只与定义的支路节点编号有关。

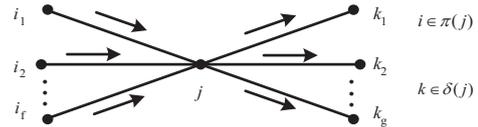


图1 上游节点和下游节点示意图

Fig. 1 Schematic of upstream and downstream nodes

1) 支路状态约束。

对于因极端灾害导致故障停运的线路,在线路被修复前将会保持停运状态,而对于未发生故障且未配置开关的线路则保持闭合状态,表示为如下约束:

$$\begin{cases} c_{ij} = 0, & (i, j) \in B_0 \\ c_{ij} = 1, & (i, j) \in B_1 \end{cases} \quad (1)$$

式中: B_0 为故障停运线路或因其他原因停运的线路集合; B_1 为保持闭合状态的线路集合; c_{ij} 为线路开关状态变量,等于0表示断开,等于1表示闭合。

2) 辐射状约束。

故障恢复过程可以通过可控电源控制运行区域内的频率和电压,本文将变电站电源和可控分布式电源均视为可控电源MS。可控分布式电源在故障负荷恢复和网络重构后可以以孤岛的形式带负荷运行;停电孤岛则指定岛内任一节点作为虚拟电源点^[21],以满足约束。故障负荷恢复和重构需要保持网络为辐射状,本文采用单商品流法^[22-23],需要满足以下约束:

$$\sum_{(i,j) \in B} c_{ij} = |N| - |S_{MS}| - |R| \quad (2)$$

$$\sum_{k \in \delta(j)} F_{jk} - \sum_{i \in \pi(j)} F_{ij} = -1, j \in N \setminus F \quad (3)$$

$$\sum_{k \in \delta(j)} F_{jk} - \sum_{i \in \pi(j)} F_{ij} = W_j, j \in F \quad (4)$$

$$-M \cdot c_{ij} \leq F_{ij} \leq M \cdot c_{ij} \quad (i, j) \in B \quad (5)$$

式中: B 表示系统中的支路集合; N 表示系统中节点集合; S_{MS} 表示可控电源集合,包括变电站节点和可控分布式电源; R 表示停电孤岛的虚拟电源点集合,停电孤岛任意指定一个为源节点,可以通过搜索负荷节点是否有连通至MS的路径来确定停电孤岛^[24]; F 表示每个子图的源节点集合,为 S_{MS} 和 R 的并集,即 $F = S_{MS} \cup R$; W_j 为源节点发出的虚拟功率; M 为一个的大数。

式(2)表示闭合的线路总数等于总节点数减去总子图的数目。在本文中,子图包含由变电站供电的子图、由可控分布式电源供电的子图和停电孤岛子图,如图2所示,其中 MS_1 和 MS_2 是可控电源控制的运行孤岛对应子图的源节点, R_1 和 R_2 为停电孤岛的虚拟源节点。式(3)表示每个负荷节点的虚拟负荷需求是1,还能保证只能有一条支路向末端节点输送功率。式(4)表示源节点流出虚拟功率可以为任意值。式(5)表示当线路闭合时,线路流过的虚拟功率不受限制,而当线路打开时,流过的虚拟功率为零。

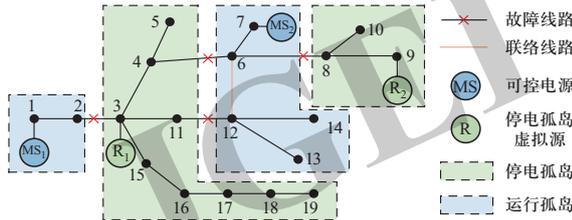


图2 不同类型孤岛运行

Fig. 2 Different types of island operation

1.2 运行约束

有源配电网负荷恢复模型中,运行约束包括系统运行潮流约束、电源出力约束、节点电压约束和负荷恢复约束,具体表示如下。

1) 系统运行潮流约束:

$$\begin{cases} P_{S,j} + P_{SOP,j} - P_{L,j} = \sum_{k \in \delta(j)} H_{jk} - \sum_{i \in \pi(j)} H_{ij}, j \in N \\ Q_{S,j} + Q_{SOP,j} - Q_{L,j} = \sum_{k \in \delta(j)} G_{jk} - \sum_{i \in \pi(j)} G_{ij}, j \in N \end{cases} \quad (6)$$

式中: $P_{S,j}$ 表示接在 j 节点的电源点注入的有功功率,包括变电站、可控分布式电源和光伏的注入有功; $Q_{S,j}$ 表示接在 j 节点的电源点注入的无功功率,包括变电站和可控分布式电源的注入无功; $P_{SOP,j}$ 表示通过SOP流入 j 节点的有功; $Q_{SOP,j}$ 表示通过SOP流入 j 节点的无功; $P_{L,j}$ 表示 j 节点负荷有功需求; $Q_{L,j}$ 表示 j 节点负荷无功需求; H_{ij} 表示流过支路的有功; G_{ij} 表示流过支路的无功。

$$-M(1-c_{ij}) \leq U_i - U_j - \frac{r_{ij}H_{ij} + x_{ij}G_{ij}}{V_R} \leq M(1-c_{ij}) \quad (7)$$

式中: U_i 表示负荷节点电压; r_{ij} 表示支路的电阻; x_{ij} 表示支路的电抗; V_R 表示系统的额定电压。

$$\begin{cases} -S_{ij}^{\max} c_{ij} \leq H_{ij} \leq S_{ij}^{\max} c_{ij} \\ -S_{ij}^{\max} c_{ij} \leq G_{ij} \leq S_{ij}^{\max} c_{ij} \end{cases} (i, j) \in B \quad (8)$$

式中: S_{ij}^{\max} 表示线路能通过的最大视在功率。

2) 电源出力约束:

$$\begin{cases} 0 \leq P_{S,j} \leq P_{S,j}^{\max} \\ P_{S,j}^2 + Q_{S,j}^2 \leq (S_{S,j}^{\max})^2 \\ |Q_{S,j}| \leq P_{S,j} \tan(\cos^{-1} \theta_j) \end{cases} j \in S_{MS} \quad (9)$$

$$\begin{cases} 0 \leq P_{S,j} \leq P_{S,j}^{\max} \\ Q_{S,j} = 0 \end{cases} j \in S_{PV} \quad (10)$$

式中: $P_{S,j}^{\max}$ 表示电源输出的最大有功; $S_{S,j}^{\max}$ 表示电源输出的最大视在功率; θ_j 表示 j 节点接入的主控电源允许的最小运行功率因数; S_{PV} 表示系统中接入的光伏集合。本文假定光伏只提供有功,不提供无功。

3) 节点电压约束:

$$\begin{cases} 0.95V_R \leq U_j \leq 1.05V_R, j \in N \setminus F \\ U_j = V_R, j \in S_{MS} \\ U_j = 0, j \in R \end{cases} \quad (11)$$

式(11)表示正常负荷点电压标幺值在0.95~1.05之间,可控电源点的电压等于系统额定电压,停电孤岛内虚拟源的电压为零,因此停电孤岛内负荷点电压均为零。

4) 负荷恢复约束:

$$\begin{cases} P_{L,j} = \lambda_j P_{L,j}^0, j \in N \\ Q_{L,j} = \lambda_j Q_{L,j}^0, j \in N \\ 0 \leq \lambda_j \leq 1, j \in N \setminus R \\ \lambda_j = 0, j \in R \end{cases} \quad (12)$$

式中: λ_j 表示负荷点 j 的负荷恢复比例,假定有功和无功功率等比例恢复,且恢复比例在0~1之间,对于停电孤岛内负荷,则恢复比例均为0。

1.3 SOP模型

SOP可以在全控型电力电子器件的控制下运行于不同的模式,可以用于连续调节网络间的潮流和系统的电压水平。SOP可以在配电系统中用于连接多个微网,在发生故障的情况下,SOP通常工作在 $V_{dc}Q-Vf$ 模式,其中正常侧工作在 $V_{dc}Q$ 模式,进行功率调节,故障侧工作在 Vf 模式,将电压调整至指定幅值^[13]。在本文中,只考虑SOP有一侧故障,如果SOP两侧均处于故障状态,则SOP不能运行。此外,忽略SOP的运行损耗,在上述假设条件下,SOP运行需要满足以下约束。

1) 传输功率:

$$P_{SOP,i} + P_{SOP,j} = 0, (i, j) \in B_{SOP} \quad (13)$$

2) 容量限制:

$$P_{SOP,j}^2 + Q_{SOP,j}^2 \leq (S_{SOP,j}^{\max})^2 \quad (14)$$

3) 故障侧电压:

$$U_i \geq V_R \quad (15)$$

式(13)–(15)中: B_{SOP} 表示SOP支路集合; $S_{SOP,j}^{\max}$ 表示SOP的最大容量; U_i 为SOP故障侧电压,故障侧以电压和频率为控制目标,使其大于额定电压。SOP在直流侧不接入电源的情况下,不能发出有功,为无源元件,式(13)表示SOP有功功率平衡。

1.4 目标函数及求解

有源配电网负荷恢复模型以恢复加权负荷最大为目标函数,表达如下:

$$\max \sum_{j \in N} \omega_j P_{L,j} \quad (16)$$

式中: ω_j 为j节点负荷的权重。所建模型忽略了所有支路和SOP损耗,可调用商业求解器Gurobi进行求解。

2 极端灾害恢复力评估

关于恢复力,不同研究机构给出的定义有所区别。文献[25]给出了各个机构对于恢复力的定义,并指出恢复力是系统对极端事件的预防、抵御以及快速恢复的能力。文献[26]指出韧性电网具备6个关键特征,恢复力是其特征之一,恢复力是指电网正常功能遭到破坏后,及时启动应急恢复和修复机制,保障重要负荷持续供电,并快速恢复电网功能至正常状态的能力。本文中所提恢复力评估是衡量系统在极端灾害后利用SOP和分布式电源资源恢复重要负荷的能力。

2.1 故障场景获取

极端自然灾害的建模和影响分析是恢复力评估的基础,台风、暴雨等自然灾害往往具有一定的规律,可以用多种特征综合刻画。文献[27]建立了台风灾害下的配电网恢复力评估模型,进行了灾害建模、元件脆弱性建模和恢复力评估等工作。首先利用台风模拟发生器模拟产生台风灾害,再利用基于增强回归树的方法描述配电线路的脆弱性,最后采用基于时序蒙特卡洛的方法模拟负荷转供和灾后恢复过程,从三方面指标来衡量系统应对灾害的稳健性和快速性。

配电网元件类型多样,且受灾害影响机理复杂,本文简化极端灾害影响建模过程,以某地区配电网某次台风灾害来临后的线路故障跳闸数据作为评估概率数据基础^[28],跳闸线路占线路总数的比例作为

线路故障概率,如图3所示。以1 h为最小时间区间,认为系统在这一时间段内线路的故障概率相同。考虑到台风来临后侵害的面积相对较大,可以认为配电系统所有线路同时遭受到相同的灾害影响。

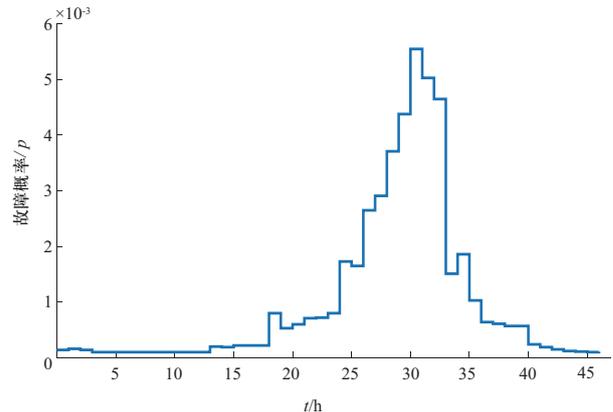


图3 线路故障概率

Fig. 3 Line failure probability

在获取逐小时的线路故障概率后,可以逐时段进行蒙特卡洛抽样,得到每个时段发生故障的线路,对应一个故障场景。此外,认为线路故障后经历一段时间才能修复,因此在模拟下一故障场景时,需要去除已经修复完好的线路,仍未完成修复工作的线路则参与下一故障场景生成。

2.2 恢复力评估指标

本文定义的恢复力指标衡量多种资源对负荷的恢复作用,结合图4,本文定义的指标如下^[27]。

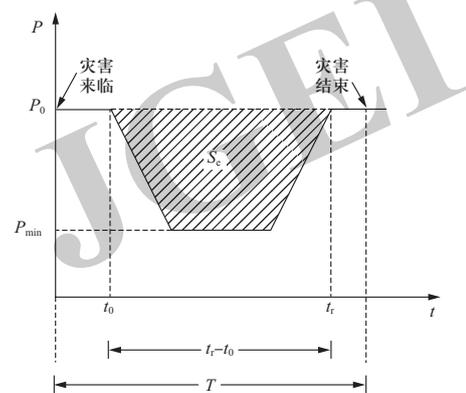


图4 恢复力指标示意图

Fig. 4 Schematic of resilience metrics

1) 系统最大失负荷比率 S_r :

$$S_r = \frac{P_0 - P_{\min}}{P_0} \quad (17)$$

式中: P_0 为灾害来临前配电网总有功负荷; P_{\min} 为灾

害影响期间配电网能供应的最小有功负荷。系统最大失负荷比率指标 S_t 能反映灾害下配电网的保供电能力。

2) 系统失负荷时间占比 S_t :

$$S_t = \frac{t_r - t_0}{T} \quad (18)$$

式中: t_r 表示灾害导致停电的负荷全部得到恢复的时刻; t_0 表示配电网灾害来临导致负荷停电的初始时刻; T 表示灾害经历总时长。系统失负荷时间占比指标 S_t 为配电网灾害下不能满足所有负荷需求的供电时长和灾害经历总时长的比值。

3) 系统损失电量比率 S_e :

$$S_e = \frac{\sum_{t=1}^n \Delta P_t \Delta t}{P_0 \times T} \quad (19)$$

式中: ΔP_t 为对应第 t 个时段内系统失负荷量; Δt 为划分的最小时段; n 为评估总时段数。系统损失电量比率指标 S_e 反映了配电网遭受灾害时总的电能损失, 能间接反映停电损失。

2.3 恢复力评估流程

恢复力评估指标往往采用模拟法计算得到^[29]。本文采用台风灾害影响数据获取线路逐时段的故障概

率, 采取时序蒙特卡洛模拟的方法, 先按照各时段线路故障概率产生对应的故障场景, 再利用本文建立的有源配电网负荷恢复模型, 使用SOP和分布式电源进行灾后负荷恢复, 通过对同一灾害的多次模拟可以得到恢复力指标, 具体的恢复力评估流程如图5所示。

1) 获取灾害全过程的信息。先选取评估使用的灾害, 获取灾害全过程 T 小时信息, 统计不同时段线路故障跳闸的数量, 作为该灾害下线路的故障概率。不同时段线路的故障概率与该时段灾害强度、故障扩散和故障修复等情况均有关。在本文中, 根据各时段线路故障数目占总线路数目的比例作为线路的故障概率。

2) 模拟生成故障场景。通过灾害信息得到的各时段线路故障概率, 模拟产生当前时刻的故障场景, 对于每一条非故障线路采样随机数, 小于该时段故障概率则认为该线路发生故障。

3) 利用SOP等资源恢复失电负荷。将生成的故障场景中的线路添加至停运线路集, 同时输入SOP和分布式电源配置等配电网数据, 进行负荷恢复模型的求解得到线路的操作状态和负荷恢复情况, 最后模拟该时段的线路修复操作。

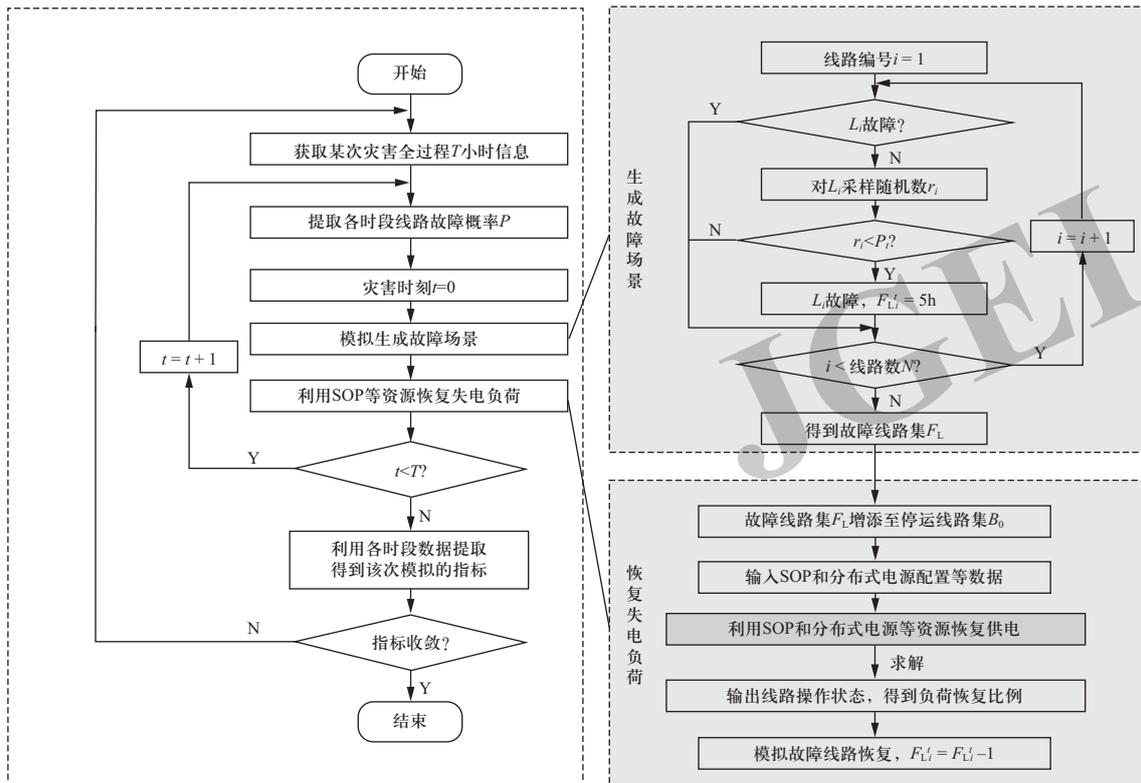


图5 恢复力评估流程

Fig. 5 The flowchart of resilience assessment

4) 提取恢复力指标。当某次灾害模拟结束后,得到各时段故障场景和负荷恢复情况,从中提取出恢复力指标,经过多次模拟后指标收敛,即可得到当前配电网结构和灾害下的预期指标。

3 算例分析

3.1 算例介绍

本文采用修改后的IEEE-33节点系统,在系统中接入了可控分布式电源和光伏设备,光伏配置在不同馈线上,具体的电源配置情况如表1所示,在18和33节点间接入SOP,修改后的系统如图6所示。

表1 电源配置信息

Table 1 Power generators configuration information

配置位置	名称	类型	容量/MVA
1	MS ₁	变电站	5.5
28	MS ₂	可控分布式电源	2
15	PV ₁	光伏	0.2
22	PV ₂	光伏	0.2
25	PV ₃	光伏	0.2
30	PV ₄	光伏	0.2

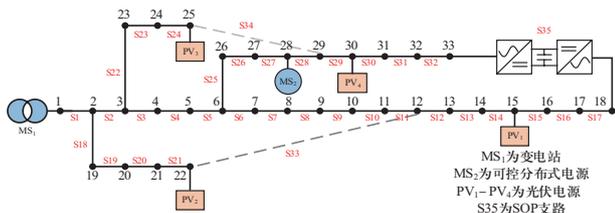


图6 修改后的IEEE-33节点系统

Fig. 6 Modified IEEE-33 bus system

3.2 SOP对负荷恢复作用分析

3.2.1 SOP安装容量影响分析

为分析SOP容量配置对负荷恢复能力的影响,选取不同容量的配置方案,在不安装分布式电源MS₂的情况下,改变支路35处SOP容量大小,容量分别取1 MVA、2 MVA、3 MVA和4 MVA。

假设线路8发生故障,得到上述容量配置条件下各节点的电压分布,如图7所示。

求解得到,4种情形下负荷恢复比例均为100%,通过图7可以发现,配置的SOP容量越大,系统节点的电压水平越高,尤其对于26~33节点,提高更为明

显。这是因为这些节点原先位于馈线末端,电压较低,而较大容量的SOP则可以提供更多的无功,提高电压水平。当配电馈线更长时,小容量的SOP可能不足以恢复故障馈线的失电负荷,大容量SOP优势则更为明显。

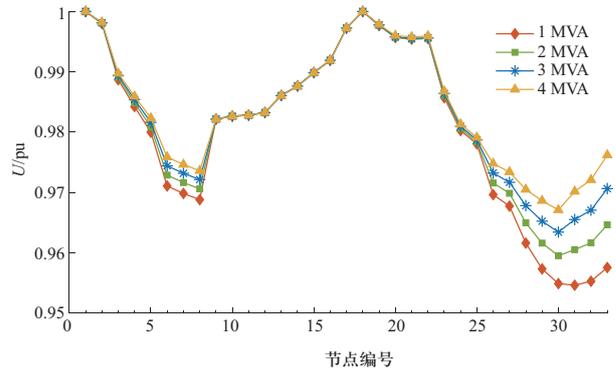


图7 不同SOP容量情形下各节点电压幅值

Fig. 7 Voltage amplitude of each bus under different SOP capacity

3.2.2 SOP和联络开关负荷恢复对比

传统配电系统会在馈线间装设联络线路,故障后通过网络重构可以恢复部分停电负荷。SOP具备提供无功和电压支撑能力,相比联络开关,SOP具有连续调节潮流、提供无功和电压支撑等优势,将会在配电网灾后恢复过程中起到重要作用。

为对比SOP和联络开关对于故障后负荷恢复作用的区别,在不安装分布式电源MS₂的情况下,对比支路35分别配置联络开关和SOP时对负荷恢复的影响。假定线路8发生故障,系统负荷的恢复状况如表2所示,各节点电压如图8所示。

表2 分别配置联络开关和SOP时的负荷恢复对比

Table 2 Comparison of load restoration when deploying tie switch and SOP respectively

方案	MS配置	支路35配置	负荷恢复比例/%
1	MS ₁	联络开关	85.16
2	MS ₁	SOP	100

通过SOP能够100%恢复节点9~18负荷,电压均符合要求;但使用联络开关恢复负荷时,由于其没有提供无功的能力,末端负荷的电压较低,接近最低限制,导致部分负荷不能恢复。可见在馈线较长的情况下利用联络开关进行供电恢复很可能会出现负荷电压不满足要求的情况,导致通过联络开关恢复负荷的大

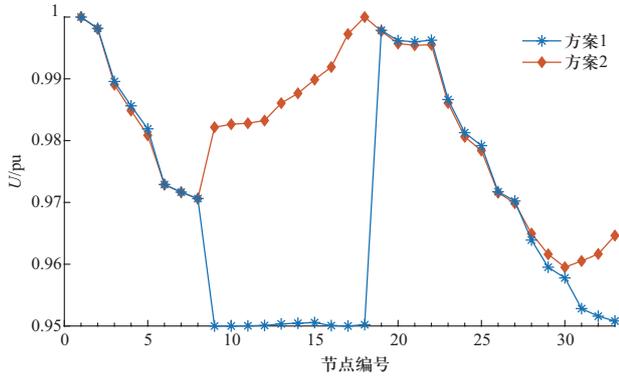


图 8 分别配置联络开关和SOP时的各节点电压对比

Fig. 8 The voltage comparison of each bus when deploying tie switch and SOP respectively

小受限, 而SOP在故障侧提供的无功可以抬升电压至系统额定电压以上, 在SOP容量充足的情况下可以恢复更多的负荷。

3.3 分布式电源和SOP联合恢复负荷

极端灾害条件下, 往往是多条线路同时故障, 影响较大, 仅通过SOP或联络开关通常难以恢复全部负荷。此时, 若配电系统中有可控分布式电源, 则可以通过打开和闭合部分分段开关使得部分负荷以微网的形式孤岛运行。此处对比仅通过SOP恢复和SOP联合可控分布式电源恢复供电方案。

- 方案1: 不配置MS₂, SOP配置2 MVA容量;
- 方案2: 配置MS₂, SOP配置1 MVA容量;
- 方案3: 配置MS₂, SOP配置2 MVA容量;
- 方案4: 配置MS₂, 线路33和线路35处分别配置1 MVA容量SOP。

当线路3和线路6发生故障后, 4种方案下的恢复结果如表3所示。

表 3 不同方案负荷恢复结果

Table 3 Load restoration results of different schemes

方案	MS配置	SOP容量 /MVA	断开线路	负荷恢复比例 /%
1	MS ₁	2	3、6	39.84
2	MS ₁ ,MS ₂	1	3、6	100
3	MS ₁ ,MS ₂	2	3、6	100
4	MS ₁ ,MS ₂	1,1	3、6、16	100

方案1未配置可控分布式电源, 线路3故障断开后, 下游负荷均不能恢复, 负荷恢复比例为39.84%。方案2、3和4配置可控分布电源后, 可以以孤岛方式

运行, 在该故障场景下, 负荷均能100%恢复, 图9为方案4的负荷恢复结果。

4种恢复方案下各节点电压分布如图10所示, 方案1已恢复节点电压和其他方案相同, 未恢复供电节点电压为0, 方案2和方案3下节点7~16的电压相比方案4要低很多。当采用方案4, 在支路33和35都配置容量为1 MVA的SOP后, 相比只在支路35配置2 MVA的SOP时, 在该故障场景下负荷恢复结果相同, 但是部分节点电压明显提高。这是因为功率可以通过另一个SOP支援故障区域, 可以减少通过单个SOP的功率, 减小电压损耗, 取得更好的恢复效果。

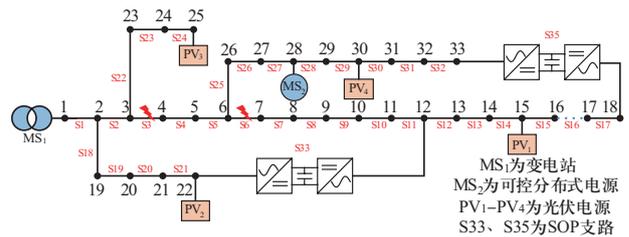


图 9 方案4负荷恢复结果

Fig. 9 Load restoration results of Scheme 4

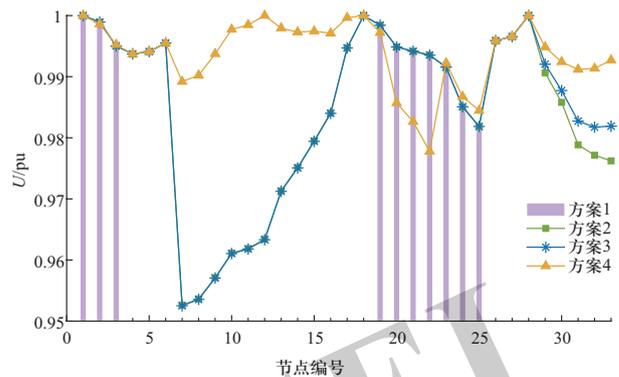


图 10 4种方案下各节点电压分布

Fig. 10 The voltage of each bus of the four schemes

由此可以得到结论, 总容量相同的SOP配置分开安装到不同位置, 相当于将恢复资源分散化, 这样能提高负荷恢复能力。同样, 系统中还有部分光伏能够提供有功, 结合SOP提供的无功, 能进一步改善负荷恢复情况。

3.4 不同方案下恢复力指标评估

采用和表3中相同的电源和SOP配置方案, 不同故障场景供电恢复采取本文中建立的负荷恢复模型, 恢复力评估采用图5所示流程, 可以通过对同一场灾害进行多次模拟计算, 得到如图11所示评估结果。

可以看出方案2、3和4较方案1指标有明显改善,系统最大失负荷比率 S_r 和系统损失电量比率 S_e 大大减小。这表明,在系统中配置可控分布式电源和SOP后,能提高系统的保供电能力,灾害来临后能确保更多关键负荷的供电并减少系统损失电量。方案2和3对于该系统恢复力提高程度上相差不大,这是因为该系统负荷较小,SOP容量大小对负荷恢复影响不大,但电压提高程度有所不同。方案4相比方案3,恢复力有一定提高,说明将总容量相同的SOP配置在多个位置相对于配置在一个位置对负荷的恢复更有利。还需要注意的是,这4种方案的系统失负荷时间占比 S_t 基本相同,这与台风灾害过境的时间有关,所以在这段时间内都会有不同程度的失负荷。

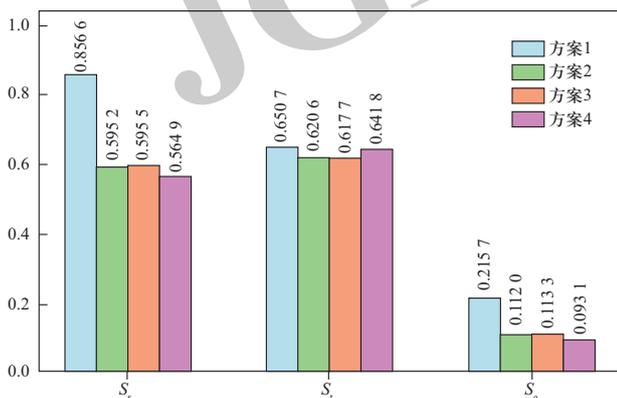


图 11 不同方案下恢复力评估指标

Fig. 11 Resilience assessment metrics under different schemes

4 结论

SOP作为改变配电网结构和运行方式的重要设备之一,可以用于连续调节网络间的潮流和提供无功以改善系统的电压水平。在故障情形下会改变运行模式,极端自然灾害条件下,能实现功率交换以恢复失电负荷,能提高配电系统恢复力。

通过分析,可以得到以下结论:①不同容量SOP在转供负荷较小时,大容量SOP体现在对节点电压的提升效果上;②SOP相比联络开关,优势体现在电压支撑上,对于馈线较长情况下的负荷转供相比联络开关能恢复更多负荷;③采用可控分布式电源和SOP联合,在故障发生后可以以孤岛模式运行,可以恢复更多负荷,提高配电系统恢复力;④将总容量相同的SOP配置在多个位置相对配置在一个位置对配电系统恢复力提升效果更好。

参考文献

- [1] BIE Z H, LIN Y L, LI G F, et al. Battling the extreme: a study on the power system resilience[J]. Proceedings of the IEEE, 2017, 105(7): 1253-1266.
- [2] 刘坤, 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(in Chinese).
- [3] 王成山, 王瑞, 于浩, 等. 配电网形态演变下的协调规划问题与挑战[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(8): 2385-2396.
WANG Chengshan, WANG Rui, YU Hao, et al. Challenges on coordinated planning of smart distribution networks driven by source-network-load evolution[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(8): 2385-2396(in Chinese).
- [4] 马钊, 周孝信, 尚宇炜, 等. 未来配电系统形态及发展趋势[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(6): 1289-1298.
MA Zhao, ZHOU Xiaoxin, SHANG Yuwei, et al. Form and development trend of future distribution system[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(6): 1289-1298(in Chinese).
- [5] 张良, 范广胜, 黄南天, 等. 交直流混合微电网母线接口参数自适应VSG控制策略[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(14): 45-54.
ZHANG Liang, FAN Guangsheng, HUANG Nantian, et al. Adaptive VSG control strategy for interlinking converter in an AC/DC hybrid microgrid[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(14): 45-54(in Chinese).
- [6] CAO W Y, WU J Z, JENKINS N, et al. Benefits analysis of soft open points for electrical distribution network operation[J]. Applied Energy, 2016, 165: 36-47.
- [7] 许涛, 葛雪峰, 窦竟铭, 等. 混合型背靠背智能软开关技术[J]. 电力工程技术, 2021, 40(4): 130-135.
XU Tao, GE Xuefeng, DOU Jingming, et al. Technology of hybrid back-to-back soft open point[J]. Electric Power Engineering Technology, 2021, 40(4): 130-135(in Chinese).
- [8] 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(in Chinese).
- [9] 刘文霞, 刘鑫, 王荣杰, 等. 含柔性多状态开关的多端互联配电网系统可靠性评估与量化分析[J]. 高电压技术, 2020, 46(4): 1114-1124.
LIU Wenxia, LIU Xin, WANG Rongjie, et al. Reliability evaluation and quantitative analysis of multi-terminal

- interconnect power distribution system with flexible multi-state switch[J]. *High Voltage Engineering*, 2020, 46(4): 1114-1124(in Chinese).
- [10] 葛少云, 杨赞, 刘洪, 等. 含四端SOP有源配电网可靠性和供电能力评估[J]. *高电压技术*, 2020, 46(4): 1124-1136. GE Shaoyun, YANG Zan, LIU Hong, et al. Reliability and power supply capability evaluation of active distribution networks with four-terminal soft open points[J]. *High Voltage Engineering*, 2020, 46(4): 1124-1136(in Chinese).
- [11] 娄毓伟, 张筱慧, 丛鹏伟, 等. 含柔性软开关的有源配电网故障恢复策略[J]. *电力系统自动化*, 2018, 42(1): 23-31. LOU Chengwei, ZHANG Xiaohui, CONG Pengwei, et al. Service restoration strategy of active distribution network with soft open points[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2018, 42(1): 23-31(in Chinese).
- [12] 王颖, 马佳骏, 王小君, 等. 含智能软开关的配电网重要负荷恢复方法[J]. *电力系统自动化*, 2021, 45(8): 104-111. WANG Ying, MA Jiajun, WANG Xiaojun, et al. Critical load restoration method for distribution network with soft open point[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2021, 45(8): 104-111(in Chinese).
- [13] 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. 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(in Chinese).
- [14] DING T, WANG Z K, JIA W H, et al. Multiperiod distribution system restoration with routing repair crews, mobile electric vehicles, and soft-open-point networked microgrids[J]. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 2020, 11(6): 4795-4808.
- [15] LI P, SONG G Y, JI H R, et al. A supply restoration method of distribution system based on soft open point[C]//2016 IEEE Innovative Smart Grid Technologies-Asia. November 28-December 1, 2016, Melbourne, VIC, Australia. IEEE, 2016: 535-539.
- [16] JI H R, WANG C S, LI P, et al. SOP-based islanding partition method of active distribution networks considering the characteristics of DG, energy storage system and load[J]. *Energy*, 2018, 155: 312-325.
- [17] LIU W X, FU M D, YANG M Y, et al. A bi-level interval robust optimization model for service restoration in flexible distribution networks[J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2021, 36(3): 1843-1855.
- [18] 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/OL]. *电力系统自动化*, 2021 [2022-03-26]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/32.1180.TP.20211126.1339.004.html>(in Chinese). 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*, 2021 [2022-03-26]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/32.1180.TP.20211126.1339.004.html>(in Chinese).
- [19] 秦清, 韩蓓, 李国杰, 等. 含智能软开关的配电网多阶段弹性力学映射与评估[J]. *电工技术学报*, 2021, 36(21): 4444-4458. QIN Qing, HAN Bei, LI Guojie, et al. Multi-stage elastic mechanical modelling and evaluation of distribution networks with soft open point[J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2021, 36(21): 4444-4458(in Chinese).
- [20] 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.
- [21] 卞艺衡, 别朝红, 黄格超, 等. 弹性配电网分布式可再生能源电源最优配置模型[J]. *全球能源互联网*, 2020, 3(3): 213-221. BIAN Yiheng, BIE Zhaohong, HUANG Gechao, et al. Optimal renewable energy distributed generators placement for resilient distribution system[J]. *Journal of Global Energy Interconnection*, 2020, 3(3): 213-221(in Chinese).
- [22] DING T, SUN K, HUANG C, et al. Mixed-integer linear programming-based splitting strategies for power system islanding operation considering network connectivity[J]. *IEEE Systems Journal*, 2018, 12(1): 350-359.
- [23] 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.
- [24] DING T, LIN Y L, BIE Z H, et al. A resilient microgrid formation strategy for load restoration considering master-slave distributed generators and topology reconfiguration[J]. *Applied Energy*, 2017, 199: 205-216.
- [25] 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(in Chinese).
- [26] 阮前途, 谢伟, 许寅, 等. 韧性电网的概念与关键特征[J]. *中国电机工程学报*, 2020, 40(21): 6773-6784. RUAN Qiantu, XIE Wei, XU Yin, et al. Concept and key features of resilient power grids[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2020, 40(21): 6773-6784(in Chinese).
- [27] SUN S Y, LYU Q C, LI G F, et al. Resilience modeling and assessment for power distribution systems under typhoon disasters[C]//2019 IEEE Sustainable Power and Energy Conference (ISPEC). November 21-23, 2019, Beijing, China. IEEE, 2019: 2413-2418.
- [28] 田慧丽, 张鼎茂, 周荣生, 等. 台风灾害下配电系统受损评估研究[J]. *电网与清洁能源*, 2021, 37(12): 16-24. TIAN Huili, ZHANG Dingmao, ZHOU Rongsheng, et al. A study on damage evaluation of power distribution system under

typhoon disaster[J]. Power System and Clean Energy, 2021, 37(12): 16-24(in Chinese).

- [29] PANTELI M, MANCARELLA P, TRAKAS D N, et al. Metrics and quantification of operational and infrastructure resilience in power systems[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2017, 32(6): 4732-4742.

收稿日期: 2022-01-30; 修回日期: 2022-03-29。



叶宇鑫

作者简介:

叶宇鑫(1999), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为弹性电力系统恢复力评估, E-mail: yuxinye@stu.xjtu.edu.cn。

李更丰(1984), 男, 博士, 副教授, 主要研究方向为电力系统可靠性、综合能源系统、弹性电力系统、主动配电网技术。通信作者, E-mail: gengfengli@xjtu.edu.cn。

别朝红(1970), 女, 博士, 教授, 主要研究方向为电力系统规划及可靠性评估、新能源接入系统安全性评估、弹性电力系统, E-mail: zhbic@mail.xjtu.edu.cn。

易皓(1984), 男, 博士, 副教授, 主要研究方向为电能质量治理、并网变流器控制、微电网运行控制, E-mail: yi_hao@xjtu.edu.cn。

张鼎茂(1999), 男, 博士研究生, 主要研究方向为弹性电力系统恢复力评估, E-mail: zhangdingmao@stu.xjtu.edu.cn。

(责任编辑 李锡)