

DOI:10.11784/tdxbz202401008

考虑电压支撑的含 SOP 柔性配电网故障关联 矩阵可靠性计算方法

宋关羽¹, 蔺曼¹, 于浩¹, 熊俊杰², 匡德兴², 赵伟哲²

(1. 智能电网教育部重点实验室(天津大学), 天津 300072;

2. 国网江西省电力有限公司电力科学研究院, 南昌 330006)

摘要: 配电网柔性化已成为重要发展趋势, 智能软开关作为取代传统联络开关的柔性互联装置, 其高响应速度及电压支撑作用有助于提升供电可靠性, 但现有配电网可靠性计算方法大多忽略了故障后节点电压影响, 无法适用于含智能软开关的柔性互联配电网可靠性计算。对此, 本文基于故障关联矩阵可靠性计算理论, 提出一种考虑电压支撑的柔性互联配电网可靠性计算方法, 实现了柔性互联配电网可靠性指标的快速解析计算。首先, 构建供电路径矩阵以表征故障影响范围和节点故障后供电恢复能力; 然后, 形成故障后支路传输功率向量以及节点电压矩阵, 求取故障关联矩阵进而得到可靠性指标; 最后, 基于中压配电网典型算例进行测试验证。结果表明, 本文所提柔性配电网可靠性计算方法得到的可靠性指标与枚举法相同, 能够保证精度, 同时本方法以矩阵代数运算代替故障枚举过程中的重复性网络搜索过程, 搜索时间减少了 87%, 显著提升计算效率。

关键词: 柔性配电网; 智能软开关; 可靠性计算; 故障关联矩阵; 电压支撑

中图分类号: TM732

文献标志码: A

文章编号: 0493-2137(2025)03-0274-11

Fault Incidence Matrix Reliability Evaluation Method of Flexible Distribution Networks with Soft Open Point Considering Voltage Support

Song Guanyu¹, Lin Man¹, Yu Hao¹, Xiong Junjie², Kuang Dexing², Zhao Weizhe²

(1. Key Laboratory of Smart Grid of Ministry of Education, Tianjin University, Tianjin 300072, China;

2. State Grid Jiangxi Electric Power Research Institute, Nanchang 330006, China)

Abstract: The flexibilization of distribution networks has become an important developmental trend. As a flexible interconnection device replacing traditional contact switches, the soft open point's high response speed and voltage support help improve the reliability of the power supply. However, most of the existing reliability calculation methods for distribution networks ignore the impact of post-fault node voltage. Thus, these methods cannot be applied to the reliability calculation of flexible distribution networks containing soft open point. In this paper, a reliability calculation method is proposed for a flexible distribution network considering voltage support based on the fault incidence matrix. This method realizes the fast analytical calculation of reliability indices for flexible distribution networks. First, a power supply path matrix is constructed to characterize the scope of fault influence and assess the ability of the power supply to recover after failure. Then, the post-fault branch transmission power vector and node voltage matrix are formed, and the fault incidence matrix is obtained to yield reliability indices. Finally, a case study is carried out based on a typical example of a medium-voltage distribution network. The results show that the proposed reliability calculation method yields identical reliability indices as the enumeration method, guaranteeing accuracy.

收稿日期: 2024-01-13; 修回日期: 2024-04-28.

作者简介: 宋关羽 (1990—), 男, 博士, 高级工程师, gysong@tju.edu.cn.

通信作者: 于浩, tjyuh@tju.edu.cn.

基金项目: 国网总部科技资助项目 (5108-202218280A-2-310-XG).

Supported by the Science and Technology Project of State Grid Corporation (No. 5108-202218280A-2-310-XG).

Moreover, the proposed method replaces the repetitive network searching process in the fault enumeration process with matrix algebra operation, and the search time is reduced by 87%, which can significantly improve the calculation efficiency.

Keywords: flexible distribution network; soft open point (SOP); reliability calculation; fault incidence matrix; voltage support

以分布式发电和电动汽车为代表的新型源荷能够降低电力生产、消耗环节的碳排放^[1], 同时其波动性强且运行特性复杂的特点也为配电网带来了新的挑战^[2]. 采用电力电子技术将传统配电网改造为柔性配电网, 对于应对高比例新型源荷接入带来的波动性以及解决配电网发展中的瓶颈问题具有重要意义^[3]. 智能软开关 (soft open point, SOP) 是安装于传统联络开关处的新型电力电子装置, 是实现配电网柔性闭环运行的关键^[4], 除其能够平滑调节馈线潮流分布、进而提高配电网经济性与灵活性的优势外, SOP 的高响应速度以及电压支撑作用能够缩小配电网故障后停电范围、提升配电网可靠性, 因此亟需开展对柔性配电网可靠性计算模型与方法的研究, 快速、有效地量化 SOP 对柔性配电网可靠性的提升能力.

近年来, 国内外学者已经对配电网可靠性计算做了大量的研究, 目前常用方法分为蒙特卡洛模拟法和解析法^[5]. 文献[6]基于随机抽样和时序模拟计算配电网可靠性; 文献[7]提出了基于交叉熵值法和蒙特卡洛模拟法的配电网可靠性计算方法; 文献[8]利用蒙特卡洛法计算高阶系统状态的影响, 提出了基于马尔可夫链的可靠性计算方法; 文献[9-10]提出了基于最小路求取最小割集的配电网可靠性解析计算方法; 文献[11]基于故障模式后果分析法, 考虑设备容量约束和负荷变化以修正指标. 解析法随着网络规模的增大, 计算量会成指数式增长, 一定程度上限制了解析法的使用范围^[12].

为实现可靠性指标快速解析计算, 文献[13]提出了基于故障关联矩阵的配电系统可靠性计算方法, 通过简单的代数、布尔运算实现可靠性指标的显式解析计算, 解决了解析法在评估规模较大系统时计算效率较低的问题.

对于柔性配电网而言, 柔性互联装置的大量应用使其在结构与运行上不同于传统配电网, SOP 在故障发生后可以切换控制模式, 进行负荷电压支撑, 从而进一步扩大供电恢复范围, 这为柔性配电网可靠性计算提出了新的挑战, 传统的可靠性计算方法难以有效适用. 对此, 文献[14]构建了含有多端 SOP 配电网的故障模式影响分析模型, 并基于准序贯蒙特卡洛模拟法提出了可靠性计算方法; 文献[15]分别采用序贯

蒙特卡洛模拟法和故障树分析法对交、直流区域分析, 得到系统可靠性指标. 但总体来讲, 针对含有 SOP 的柔性互联配电网可靠性计算方法多采用蒙特卡洛模拟, 计算效率有待进一步提升. 因此, 为了更充分地考虑智能软开关对配电网可靠性的影响, 迫切需要发展面向柔性互联配电网的可靠性计算创新方法.

本文提出了一种含 SOP 的柔性互联配电网故障关联矩阵可靠性计算方法, 实现了考虑电压支撑的柔性互联配电网可靠性指标解析计算. 首先, 构建供电路径矩阵以表征故障影响范围, 支路故障时状态标志位向量表示故障后能否进行供电恢复; 然后, 基于 Distflow 模型计算故障后支路传输功率矩阵以及节点电压矩阵, 求取故障关联矩阵得到可靠性指标; 最后, 采用中压配电网实际算例对所提方法的有效性进行验证.

1 配电网的供电路径矩阵

支路故障后负荷节点失电, 根源上是由于电源到负荷节点的供电路径中断. 配电系统需要满足辐射状拓扑约束, 同一时刻由主电源到负荷节点至多存在一条供电路径, 在不含联络以及 SOP 的配电系统中, 此供电路径的中断必然导致对应负荷节点的负荷无法供应. 文献[16]采用供电路径矩阵 (power supply path matrix, PSPM), 以矩阵的形式表示所有负荷节点的供电路径. 下面以图 1 所示的配电系统简要说明以电源点为源节点的 PSPM 构建过程.

首先, 构建配电网有向图模型, 确定有向图方向, 利用深度优先遍历对所有配电网节点和支路进行编号, 构建得到支路节点关联矩阵为

$$R = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 1 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -1 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 \end{bmatrix}$$

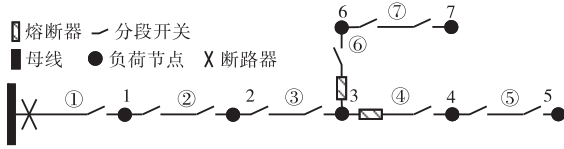


图 1 7 节点配电网示意

Fig.1 Schematic of seven-node distribution network

辐射状配电网中所有负荷节点的唯一电源点即为首端母线。删除节点支路关联矩阵 R 中首端母线所在行, 所得方阵 R_1 进行求逆取正得到该网络中首端母线到各负荷节点的 PSPM 为

$$S_1 = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

矩阵 S_1 中包含了所有负荷节点的供电路径信息, 同时也包含了支路故障受影响负荷节点范围信息。矩阵 S_1 的行号和列号分别对应支路编号以及负荷节点编号。对矩阵 S_1 按列观察, 每一列代表对应列号节点供电路径, 以 S_1 的第 7 列为例, 非零元素所在行为第①、②、③、⑥、⑦行, 恰好为图 1 中负荷节点 7 的供电路径。对矩阵 S_1 按行观察, 每一行代表对应行号支路故障影响节点范围, 矩阵中的元素 $S_1(i, j)=1$ 表示支路 i 故障会导致负荷节点 j 供电中断, 以 S_1 的第 2 行为例, 非零元素所在列为第 2 列到第 7 列, 表示支路 2 故障会导致负荷节点 2 到 7 供电中断, 与图 1 中情况符合。

依照上述以电源节点为源节点的 PSPM 计算方法, 计算以任意节点为源节点的 PSPM S_i , 以图 1 中节点 5 为源节点为例, 求逆取正得到

$$S_5 = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

观察其第 7 列可以得到以节点 5 为源节点时节点 7 的供电路径, 即支路④、⑤、⑥、⑦, 如图 2 所示。

依据 PSPM, 在得到支路故障受影响节点范围的同时, 可以获取支路与节点的上、下游关系, 为故障关联矩阵的构建奠定基础。

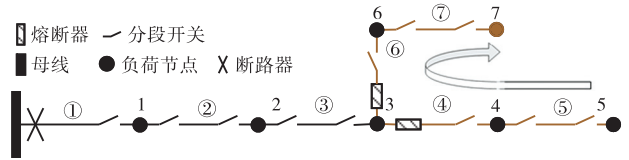


图 2 以节点 5 为源节点的节点 7 供电路径

Fig.2 Power supply path of node 7 with node 5 as the source node

2 考虑电压支撑的辐射状配电网故障关联矩阵构建

2.1 计及故障的辐射状配电网节点电压矩阵推导

2.1.1 计及故障的支路传输功率向量构建

不考虑线路损耗的情况下, 所有以此支路作为供电路径的节点负荷之和, 即为此支路的传输功率。前面所构建的 PSPM 包含了各支路故障受影响负荷节点范围信息, 这些供电中断的节点均以该故障支路作为供电路径。因此, 可以通过 PSPM 计算正常运行状态下的支路传输有功功率向量 P^{BR} 及支路传输无功功率向量 Q^{BR} , 其计算式分别为

$$P^{BR} = S_1 \cdot P^{LD} \quad (1)$$

$$Q^{BR} = S_1 \cdot Q^{LD} \quad (2)$$

式中: P^{LD} 为节点有功负荷向量; Q^{LD} 为节点无功负荷向量。

故障发生后, 继电保护装置对故障进行定位、切除及隔离, 部分负荷节点失电。计及故障后各支路传输功率即为正常运行时的支路传输功率减去此支路下游受影响节点的负荷。首先将 PSPM S_1 按行拆分为向量 $S_{1,1}, S_{1,2}, \dots, S_{1,N_{BR}}$, 构建支路 k 故障时, 各支路下游负荷节点受影响范围矩阵 H_k , 其计算式为

$$H_k = \mathbf{1}_{N_{BR} \times 1} \cdot S_{1,k} \circ S_1 \quad (3)$$

式中: $S_{1,k}$ 为 PSPM S_1 的第 k 行; “ \circ ” 为 Hadamard 积, 表示向量或矩阵间对应位置元素相乘^[17]。这里通过 $\mathbf{1}_{N_{BR} \times 1} \cdot S_{1,k}$ 将行向量扩充为 N_{BR} 行, 表示支路 k 故障受影响的负荷节点范围, 与 PSPM S_1 对应位置相乘筛选出这些节点中位于对应行号支路下游的部分。

以图 1 系统为例进行说明, 按以上方法计算可得

$$H_4 = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

观察 H_4 中元素, 在支路 4 发生故障时, 支路 3

的下游负荷节点 4、5 受到影响停止供电, 对应 $H_4(3,4)=1$ 和 $H_4(3,5)=1$; 支路 7 没有下游负荷节点受到影响, 因此 H_4 第 7 行元素均为 0. 由此通过 H_k 表明支路 k 故障时, 各支路的下游负荷节点中哪些节点会受到影响, 进而计算支路 k 故障时, 各支路传输有功功率向量 \mathbf{P}_k^{TR} 和各支路传输无功功率向量 \mathbf{Q}_k^{TR} 分别为

$$\mathbf{P}_k^{\text{TR}} = \mathbf{P}^{\text{BR}} - \mathbf{H}_k \cdot \mathbf{P}^{\text{LD}} \quad (4)$$

$$\mathbf{Q}_k^{\text{TR}} = \mathbf{Q}^{\text{BR}} - \mathbf{H}_k \cdot \mathbf{Q}^{\text{LD}} \quad (5)$$

遍历所有支路故障情况, 构成计及故障的各支路传输有功功率向量 \mathbf{P}^{TR} 和计及故障的各支路传输无功功率向量 \mathbf{Q}^{TR} , 以 \mathbf{P}^{TR} 为例, 其计算公式为

$$\mathbf{P}^{\text{TR}} = \begin{bmatrix} \mathbf{P}_1^{\text{TR}} & \mathbf{P}_2^{\text{TR}} & \cdots & \mathbf{P}_{N_{\text{BR}}}^{\text{TR}} \end{bmatrix}^{\text{T}} \quad (6)$$

2.1.2 计及故障的节点电压矩阵构建

在文献[18]中所提出的基于 Distflow 的最优潮流模型基础上, 文献[19]不考虑功率损耗, 得到简化的最优潮流模型为

$$U_i - U_j = 2(r_{ij}P_{ij} + x_{ij}Q_{ij}) \quad (7)$$

式中: U_i 为节点 i 的电压平方; U_j 为节点 j 的电压平方; r_{ij} 和 x_{ij} 分别为节点 i 、 j 间的电阻值和电抗值; P_{ij} 和 Q_{ij} 分别为节点 i 到节点 j 传输的有功功率和无功功率.

构建支路电阻向量 $\mathbf{r} = [r_1 \ r_2 \ \cdots \ r_{N_{\text{BR}}}]$ 和支路电抗向量 $\mathbf{x} = [x_1 \ x_2 \ \cdots \ x_{N_{\text{BR}}}]$. 基于式(7)的简化最优潮流模型, 利用 PSPM \mathbf{S}_1 中所能提供的负荷节点的供电路径信息, 构建计及支路故障的各节点电压矩阵 \mathbf{U} 为

$$\mathbf{U} = \begin{bmatrix} \mathbf{1}_{N_{\text{BR}} \times N_{\text{B}}} \cdot U_0 - 2(\mathbf{1}_{N_{\text{BR}} \times 1} \cdot \mathbf{r} \circ \mathbf{P}^{\text{TR}} + \mathbf{1}_{N_{\text{BR}} \times 1} \cdot \mathbf{x} \circ \mathbf{Q}^{\text{TR}}) \cdot \mathbf{S}_1 \end{bmatrix} \circ (\mathbf{1}_{N_{\text{BR}} \times N_{\text{B}}} - \mathbf{S}_1) \quad (8)$$

式中 U_0 为首端电源节点电压平方. \mathbf{U} 中元素表示对应行号支路故障时, 对应列号节点电压的平方值, 即为支路故障时, 电压节点电压平方除去对应负荷节点供电路径上所有支路的电压降落.

2.2 电压约束下辐射状配电网故障关联矩阵计算

2.2.1 故障关联矩阵含义及类型设置

故障关联矩阵能够刻画元件故障造成的负荷停供范围以及停供持续时间^[20], 依据元件故障造成系统中负荷的停供持续时间不同, 划分不同类型的故障关联矩阵, 进而利用不同类型的故障关联矩阵中元素描述受到此类影响的负荷的范围^[21].

故障关联矩阵的行号对应元件编号, 列号对应负荷编号, 各元素表示对应行元件故障时相应列负荷受

到的影响. 根据系统内故障发生后负荷恢复供应所需时间不同, 可以将系统内故障对负荷的影响归纳为 3 类, 进而构建以下 3 种故障关联矩阵.

1) 负荷维持矩阵 \mathbf{F}_A

负荷维持矩阵 \mathbf{F}_A 反映系统内故障发生后, 能够在原调度方案下恢复供能的负荷部分. 这部分负荷的供能路径不变, 待故障隔离后即可由主电源恢复供电, 受故障影响程度最小, 其负荷中断持续时间是进行故障隔离所需的时间.

2) 负荷转移矩阵 \mathbf{F}_B

负荷转移矩阵 \mathbf{F}_B 反映故障发生后, 根据故障信息重新生成调度方案, 改变原有供能路径后继续供能的负荷部分. 对应配电网中故障后转供到备用电源供电的部分负荷, 对应的负荷中断持续时间是故障隔离及生成下发新的调度方案所需的时间.

3) 负荷削减矩阵 \mathbf{F}_C

负荷削减矩阵 \mathbf{F}_C 反映故障发生后, 只能待修复完成后才能恢复供应的负荷部分. 这部分削减的负荷无法转供到备用电源或者其他同类型母线, 停供时间最长, 受到的影响最为严重. 这部分负荷对应的负荷中断持续时间是故障修复所需的时间.

2.2.2 辐射状配电网故障关联矩阵计算

负荷节点正常运行时各支路电压需要处于安全运行区间内, 考虑支路故障时, 同样要求各负荷节点电压维持在此区间内, 以保证配电系统安全稳定运行. 构建电压安全矩阵为

$$V(i, j) = \begin{cases} 1 & \underline{U} \leq U(i, j) \leq \bar{U} \\ 0 & \text{其他} \end{cases} \quad (9)$$

式中 \bar{U} 和 \underline{U} 分别为节点电压安全运行区间的上、下限.

对于故障后联络开关进行负荷恢复的节点电压矩阵计算在第 3 节中介绍, 本节不考虑存在故障后转供到备用电源供电的负荷, 即不存在负荷转移矩阵 \mathbf{F}_B . 进而在电压安全矩阵 \mathbf{V} 的基础上构建负荷维持矩阵 \mathbf{F}_A 和负荷削减矩阵 \mathbf{F}_C , 计算方法分别为

$$\mathbf{F}_A = \left[(\mathbf{1}_{N_{\text{B}} \times N_{\text{BR}}} - \mathbf{S}_1) \cap \mathbf{V} \right] \cdot \mathbf{P}^{\text{LD}} \quad (10)$$

$$\mathbf{F}_C = (\mathbf{1}_{N_{\text{B}} \times N_{\text{BR}}} - \mathbf{F}_A) \cdot \mathbf{P}^{\text{LD}} \quad (11)$$

式中 “ \cap ” 表示矩阵元素的按位 “与” 运算.

3 考虑电压支撑的含 SOP 柔性配电网可靠性指标计算

当配电网中含有 SOP 时, 故障发生后配电网在一定条件下能够进行供电恢复, 因此考虑电压的柔性

配电网故障关联矩阵构建方法与辐射状配电网不同,同时考虑到故障后 SOP 的电压支撑作用,需要重新对柔性配电网故障关联矩阵进行推导.

本文假设支路故障后,配电网中的 SOP 或联络线可进行供电恢复,其中 SOP 考虑为双端 SOP,故障后可将输出端电压抬升至 1.1 倍额定电压.对于负荷节点而言,故障后考虑其全部负荷能够正常供应或此负荷节点负荷削减为零.假设系统中断路器均安装在变压器所在支路,当系统中支路故障时断路器均会动作造成网络停电.

3.1 支路故障时状态标志位向量

配电网中故障发生后,经过故障的定位、切除和隔离,部分负荷由主电源继续供电,称这部分负荷节点位于非失电区域;另一部分负荷节点停止供电,则称其处于失电区域^[22].联络开关以及作为取代联络开关的 SOP,在供电恢复的过程中都不能使整个配电系统中的任意失电区域恢复供电.下面将构建支路故障时状态标志位向量以对 SOP 能否用于恢复供电进行表征.

根据 SOP 的作用机理和控制模式可知,当 SOP 用于供电恢复问题时,其自身无法产生有功功率,需要一端连接非失电区域负荷节点,以获取有功功率;另一端连接失电区域负荷节点,为其提供电压支撑.因此对于 SOP 而言,也是当且仅当有一端处于失电区域内时可以进行供电恢复^[23].

以图 3 为例对 SOP 能否进行供电恢复加以说明.在 SOP 两端连接负荷节点 2 和 5 时,当支路 4 发生故障时,即图中所示情况,SOP 一端连接负荷节点 2 处于非失电区域,一端连接负荷节点 5 处于失电区域,可以用来供电恢复;当支路 2 或支路 7 发生故障时,SOP 两端同处于失电区域或非失电区域,无法进行供电恢复.

依据 PSPM S_1 可划分支路故障时的失电区域和非失电区域,以 i 、 j 表示 SOP 两端连接的节点编号,构建支路故障时状态标志位向量 Y_i 、 Y_j 的计算式分别为

$$Y_i = (P_i \wedge P_j) \circ P_i \quad (12)$$

$$Y_j = (P_i \wedge P_j) \circ P_j \quad (13)$$

式中: P_i 和 P_j 分别为 PSPM S_1 的第 i 列和第 j 列向量;“ \wedge ”表示按位“异或”运算. Y_i 中行号对应支路编号,其中元素为“1”表示对应行号的支路故障时,SOP 能够实现对负荷节点 i 的供电恢复,元素为“0”表示不能.以图 3 所示配电网的 Y_2 、 Y_3 计算过程进行说明.

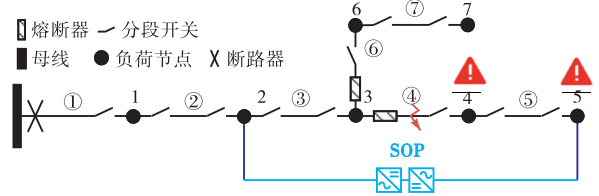


图 3 含 SOP 的 7 节点配电网示意
Fig.3 Schematic of a seven-node distribution network containing SOP

观察 PSPM S_1 的第 2 列元素与第 5 列元素,即 SOP 连接负荷节点对应列,其中第 3、4、5 行元素不同,其含义为支路 3、4、5 故障时,负荷节点 2 和负荷节点 5 不同处于失电区域或非失电区域,说明 SOP 有且仅有一端在故障后形成的失电区域内,即 SOP 对当前故障形成的失电区域进行供电恢复是有效的,因此 $P_2 \wedge P_5$ 所得矩阵的第 3、4、5 行元素为 1. PSPM S_1 的第 2 列 3、4、5 行元素为 0,第 5 列 3、4、5 行元素为 1,表示负荷节点 2 处于非失电区域,负荷节点 5 处于失电区域,根据 SOP 对当前故障形成的失电区域进行供电恢复是否有效,与表征负荷节点是否处于失电区域的矩阵对应元素相乘,即可得到 $Y_2 = [0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0]^T$ 中元素全为 0,表示此种拓扑下无法经由此 SOP 对负荷节点 2 进行供电恢复, $Y_5 = [0 \ 0 \ 1 \ 1 \ 1 \ 0 \ 0]^T$ 中第 3、4、5 行元素为 1,表示此种拓扑下支路 3、4、5 故障时可以经由此 SOP 对负荷节点 5 进行供电恢复.

3.2 计及故障的节点电压矩阵推导

基于支路节点关联矩阵,构建分别以 SOP 两端节点 i 、 j 为源节点的 PSPM S_i 、 S_j .对于以节点 i 为源节点的 PSPM S_i ,其每一列代表由节点 i 到对应列号负荷节点的供电路径,每一行代表以节点 i 为源节点时,对应行号支路故障时,无法由节点 i 供电的节点范围.

不考虑 SOP 的容量约束时,在故障发生后,仅在负荷节点处于失电区域且到 SOP 两端节点间存在供电路径时,才满足由 SOP 进行供电恢复的条件.同时,需要满足第 3.1 节中所述 SOP 一端节点处于非失电区域,一端处于失电区域.构建无容量约束下 SOP 两端节点供电恢复范围矩阵 I'_i 和 I'_j 分别为

$$I_i = S_i - S_i \cap S_j \quad (14)$$

$$I_j = S_j - S_i \cap S_j \quad (15)$$

$$I'_i = \{Y_i \cdot \mathbf{1}_{1 \times N_B}\} \circ I_i \quad (16)$$

$$I'_j = \{Y_j \cdot \mathbf{1}_{1 \times N_B}\} \circ I_j \quad (17)$$

在考虑容量约束时,考虑到 SOP 具有的容量限

制,以及供电恢复后的负荷节点电压不能越过电压安全运行区间的上、下限,部分负荷节点无法进行供电恢复,实际的供电恢复范围并非与 I'_i 和 I'_j 重合,而是需要通过对其修正得到,将电压不能满足条件及由于容量限制不能被恢复的负荷对应的元素修正为零.定义修正后的矩阵为 SOP 的实际供电恢复范围矩阵 I_i^{mod} 和 I_j^{mod} ,其中元素为决策变量参与第 3.3 节中的供电范围优化模型.

与辐射状配电网构建的节点电压矩阵有所不同,计算计及故障的含 SOP 的柔性配电网节点电压矩阵时,需要分为两个部分进行.将柔性配电网在 SOP 处解耦开,分别构建经由 SOP 供电和不由 SOP 供电的节点电压矩阵.

将 I_i^{mod} 按行拆分为 $I_{i,1}^{\text{mod}}, I_{i,2}^{\text{mod}}, \dots, I_{i,N_{\text{BR}}}^{\text{mod}}$,构建支路 k 故障时,以节点 i 为源节点的 SOP 下游负荷节点受影响范围矩阵 $H_{i,k}$ 为

$$H_{i,k} = I_{i,k}^{\text{mod}} \circ S_i \quad (18)$$

以此为基础,构建支路 k 故障时,经由 SOP 供电的支路传输功率向量 $P_{i,k}^{\text{TR},2}$ 和 $Q_{i,k}^{\text{TR},2}$ 分别为

$$P_{i,k}^{\text{TR},2} = H_{i,k} \cdot P^{\text{LD}} \quad (19)$$

$$Q_{i,k}^{\text{TR},2} = H_{i,k} \cdot Q^{\text{LD}} \quad (20)$$

遍历所有支路故障情况,构成计及故障的经由 SOP 供电的支路传输功率向量 $P_i^{\text{TR},2}$ 和 $Q_i^{\text{TR},2}$ 分别为

$$P_i^{\text{TR},2} = \begin{bmatrix} P_{i,1}^{\text{TR},2} & P_{i,2}^{\text{TR},2} & \dots & P_{i,N_{\text{BR}}}^{\text{TR},2} \end{bmatrix}^T \quad (21)$$

$$Q_i^{\text{TR},2} = \begin{bmatrix} Q_{i,1}^{\text{TR},2} & Q_{i,2}^{\text{TR},2} & \dots & Q_{i,N_{\text{BR}}}^{\text{TR},2} \end{bmatrix}^T \quad (22)$$

支路 k 故障时,SOP 上传输功率 $P_{i,k}^{\text{TL}}$ 和 $Q_{i,k}^{\text{TL}}$ 为由 SOP 恢复供电的节点负荷之和,其计算公式分别为

$$P_{i,k}^{\text{TL}} = I_{i,k}^{\text{mod}} \cdot P^{\text{LD}} \quad (23)$$

$$Q_{i,k}^{\text{TL}} = I_{i,k}^{\text{mod}} \cdot Q^{\text{LD}} \quad (24)$$

将 SOP 上传输功率视作 SOP 连接节点 j 的负荷,构建支路 k 故障时,不由 SOP 供电支路传输功率向量 $P_{i,k}^{\text{TR},1}$ 和 $Q_{i,k}^{\text{TR},1}$,则有

$$T_j(x,1) = \begin{cases} 1 & x = j \\ 0 & \text{其他} \end{cases} \quad (25)$$

$$P_{i,k}^{\text{TR},1} = (\mathbf{1}_{1 \times N_{\text{B}}} - S_{1,k}) \circ S_1 \cdot (P^{\text{LD}} + T_j \cdot P_{i,k}^{\text{TL}}) \quad (26)$$

$$Q_{i,k}^{\text{TR},1} = (\mathbf{1}_{1 \times N_{\text{B}}} - S_{1,k}) \circ S_1 \cdot (Q^{\text{LD}} + T_j \cdot Q_{i,k}^{\text{TL}}) \quad (27)$$

遍历所有支路故障情况,构成计及故障的不由 SOP 供电的各支路传输功率向量 $P_i^{\text{TR},1}$ 和 $Q_i^{\text{TR},1}$,则有

$$P_i^{\text{TR},1} = \begin{bmatrix} P_{i,1}^{\text{TR},1} & P_{i,2}^{\text{TR},1} & \dots & P_{i,N_{\text{BR}}}^{\text{TR},1} \end{bmatrix}^T \quad (28)$$

$$Q_i^{\text{TR},1} = \begin{bmatrix} Q_{i,1}^{\text{TR},1} & Q_{i,2}^{\text{TR},1} & \dots & Q_{i,N_{\text{BR}}}^{\text{TR},1} \end{bmatrix}^T \quad (29)$$

在此基础上,构建不由 SOP 供电的节点电压

矩阵 $U_{i,1}$ 为

$$U_{i,1} = \left[\mathbf{1}_{N_{\text{BR}} \times N_{\text{B}}} \cdot U_0 - 2(\mathbf{1}_{N_{\text{BR}} \times 1} \cdot r \circ P_i^{\text{TR},1} + \mathbf{1}_{N_{\text{BR}} \times 1} \cdot x \circ Q_i^{\text{TR},1}) \cdot S_1 \right] \circ (\mathbf{1}_{N_{\text{BR}} \times N_{\text{B}}} - S_1) \quad (30)$$

式(30)中的前半部分包含所有节点都具有电压值,但仅有不由 SOP 供电部分的节点电压是有意义的,这部分节点都位于非失电区域内,因此将前半部分所得矩阵对应位置乘以后半部分所得矩阵,即可得到不由 SOP 供电部分的节点电压,而经由 SOP 供电部分的节点电压值为 0.

对于故障后联络开关闭合,考虑联络上电压降落,联络输出端电压可利用不由联络供电节点电压、联络上传输功率以及联络参数计算可得,具体公式为

$$U_{i,0} = U_{i,1}(j) - 2(r^{\text{TL}} \cdot P_i^{\text{TL}} + x^{\text{TL}} \cdot Q_i^{\text{TL}}) \quad (31)$$

式中: r^{TL} 和 x^{TL} 分别为联络的电阻和电抗; P_i^{TL} 和 Q_i^{TL} 分别为以节点 i 为源节点的联络上传输有功功率和无功功率.

与传统联络开关相比,在配电网发生永久性故障时,SOP 立即闭锁实现故障隔离;而后继保护装置动作对故障进行定位、切除、隔离,失电区域形成;最后 SOP 更改控制模式,进行负荷节点的电压和无功支撑,实现失电区域内节点负荷转供.在电力系统非正常状况下,10 kV 及以下供电的受电端的电压最大允许偏差为 $\pm 0.1U_N$.考虑 SOP 对电压的抬升作用,设置故障发生后,SOP 可将输出端电压抬升至 $1.1U_N$,表示为

$$U_{i,0} = 1.1U_N \quad (32)$$

利用得到的 SOP 连接节点电压向量,构建经由 SOP 供电的节点电压矩阵 $U_{i,2}$ 为

$$U_{i,2} = \left[U_{i,0} \cdot \mathbf{1}_{1 \times N_{\text{B}}} - 2(r \circ P_i^{\text{TR},2} + x \circ Q_i^{\text{TR},2}) \cdot S_i \right] \circ S_1 \quad (33)$$

式(33)中的“ $\circ S_1$ ”与式(30)中相似,这里是将没有意义的不由 SOP 供电部分的节点电压矩阵中对应元素置为 0.

同理,可以计算得到 SOP 另一端连接节点 j 为源节点的不由 SOP 以及经由 SOP 供电的节点电压矩阵 $U_{j,1}$ 和 $U_{j,2}$,进而构建计及故障时的节点电压矩阵 U' 为

$$U' = Y_i \circ (U_{i,1} + U_{i,2}) + Y_j \circ (U_{j,1} + U_{j,2}) + (\mathbf{1}_{N_{\text{BR}} \times 1} - Y_i - Y_j) \circ U \quad (34)$$

构建节点电压矩阵时,将支路故障情况分为 3 类:支路故障时,SOP 可以由节点 j 到节点 i 传输功

率,对应式(34)等式右侧第 1 部分;支路故障时, SOP 可以由节点 i 到节点 j 传输功率,对应式(34)等式右侧第 2 部分;支路故障时, SOP 无法传输功率,对应式(34)等式右侧第 3 部分. 根据这 3 类故障情况,利用支路故障时状态标志位向量 Y_i 和 Y_j 即可得到计及故障时的节点电压矩阵 U' .

3.3 考虑电压支撑的故障关联矩阵生成

供电恢复范围优化模型是以故障后经由 SOP 恢复的有功负荷最大为目标函数,以实际供电恢复范围矩阵 I_i^{mod} 和 I_j^{mod} 中元素作为决策变量,所建立的优化模型为

$$\begin{cases} \max \sum_{k=1}^{N_{BR}} (I_{i,k}^{\text{mod}} P^{\text{LD}} + I_{j,k}^{\text{mod}} P^{\text{LD}}) \\ I_{i,k}^{\text{mod}} P^{\text{LD}} \leq P_{TL}^{\text{max}}, I_{j,k}^{\text{mod}} P^{\text{LD}} \leq P_{TL}^{\text{max}} \\ I_{i,k}^{\text{mod}} Q^{\text{LD}} \leq Q_{TL}^{\text{max}}, I_{j,k}^{\text{mod}} Q^{\text{LD}} \leq Q_{TL}^{\text{max}} \\ I_{i,k}^{\text{mod}}(a) \leq I'_{i,k}(a), I_{j,k}^{\text{mod}}(a) \leq I'_{j,k}(a) \\ I_{i,k}^{\text{mod}}(b) \leq I_{i,k}^{\text{mod}}(a) (\text{branch}_{ab} \in S_i) \\ I_{j,k}^{\text{mod}}(b) \leq I_{j,k}^{\text{mod}}(a) (\text{branch}_{ab} \in S_j) \\ \text{式(1)~(6),式(12)~(34)} \\ \underline{U} \leq U'(a,b) \leq \bar{U} \end{cases} \quad (35)$$

式中 branch_{ab} 为以 a 为起点 b 为终点的支路.

上述供电恢复范围优化模型为 0-1 整数线性优化模型,可方便求解. 模型前两个约束表示 SOP 的负荷恢复量不可超过其容量限制;第 3 个约束表示修正后的实际供电恢复范围矩阵中的元素小于没有容量和电压约束下的供电恢复范围矩阵;第 4、5 个约束的意义是优化所得的供电恢复范围需要满足辐射状约束;第 6 个约束表示计及故障的节点电压矩阵构建过程;最后一个约束表示节点电压矩阵中故障后各节点电压满足电压安全运行区间.

基于优化求解得到的实际供电恢复范围矩阵 I_i^{mod} 和 I_j^{mod} ,构建 3 类故障关联矩阵,即负荷维持矩阵 F_A 、负荷转移矩阵 F_B 和负荷削减矩阵 F_C ,计算方法如下.

$$F_A = (\mathbf{1}_{N_B \times N_{BR}} - S_1) \cdot P^{\text{LD}} \quad (36)$$

$$F_B = (I_i^{\text{mod}} + I_j^{\text{mod}}) \cdot P^{\text{LD}} \quad (37)$$

$$F_C = (\mathbf{1}_{N_B \times N_{BR}} - F_A - F_B) \cdot P^{\text{LD}} \quad (38)$$

在 3 类故障关联矩阵基础上,即可对完成考虑电压支撑的柔性配电网可靠性计算.

3.4 基于故障关联矩阵的配电网可靠性指标计算

基于 3 类故障关联矩阵,进行对含有 SOP 的柔性配电网负荷节点可靠性指标的计算,本文选择具有

代表性的 3 种可靠性指标^[24]如下.

1) 负荷节点的年均停电次数 λ^{LP}

负荷节点年均停供次数表示在一年内负荷节点的平均停供次数,单位为次/a.

$$\lambda^{\text{LP}} = \lambda_b \cdot ((F_A \odot P^{\text{LD}}) \cup (F_B \odot P^{\text{LD}}) \cup (F_C \odot P^{\text{LD}})) \quad (39)$$

式中: λ_b 为支路故障率向量;“ \odot ”表示向量或矩阵间对应位置元素相除.

2) 负荷节点的年均停电时间 μ^{LP}

负荷节点年均停供时间表示在一年内负荷节点的停电时间,单位为 h/a 或 min/a.

$$\begin{aligned} \mu^{\text{LP}} &= t_{se} \lambda_b \cdot F_A \odot P^{\text{LD}} + t_{op} \lambda_b \cdot F_B \odot P^{\text{LD}} \\ &\quad + \lambda_b \odot t_r \cdot F_C \odot P^{\text{LD}} \end{aligned} \quad (40)$$

式中: t_{se} 为支路故障隔离所需时间; t_{op} 为故障后联络开关动作所需时间; t_r 为支路故障修复时间向量.

3) 负荷节点的期望缺供电量 ens^{LP}

期望缺供电量衡量了故障导致一年内节点无法供应的负荷部分,单位为 kW · h/a 或 MW · h/a.

$$\text{ens}^{\text{LP}} = \lambda^{\text{LP}} \circ (P^{\text{LD}})^T \quad (41)$$

综上,本文考虑电压支撑的含 SOP 柔性配电网故障关联矩阵可靠性计算流程如图 4 所示.

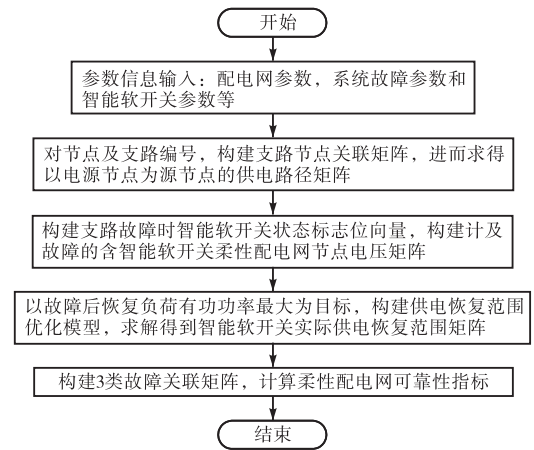


图 4 考虑电压支撑的柔性配电网可靠性计算流程
Fig.4 Flow chart of the reliability evaluation of a flexible distribution network considering voltage support

4 算例测试与分析

4.1 算例设置

为保证模型求解有效性,在 Windows 10 操作环境下 MATLAB 2016a 的 YALMIP 工具平台编程,调用 CPLEX 12.4 求解器进行优化求解,计算机处理器为 Intel(R) Core(TM) i7-10700 CPU@3.70 GHz,内存

16 GB.

采用图 5 所示的某地区中压配电网实际算例^[25], 对本文所提方法的有效性进行验证. 算例中包括 116 个负荷节点, 3 个 35 kV/10 kV 变电站, 容量均为 2 ×

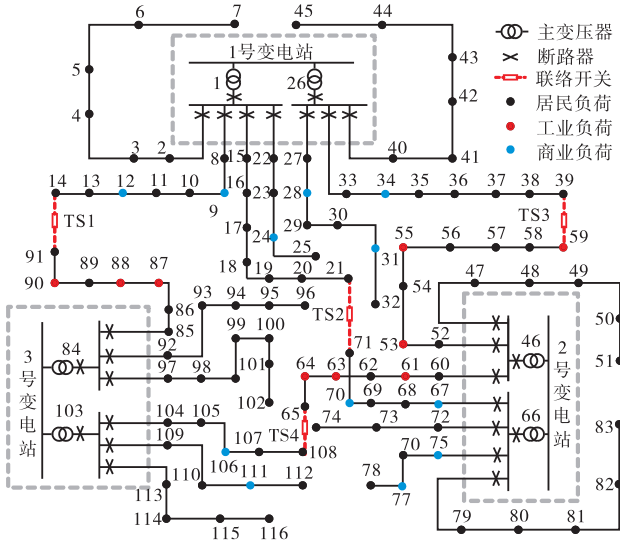


图 5 中压配电网算例结构

Fig.5 Structure of medium voltage distribution network

40 MV · A, 系统电压等级为 10.5 kV, 基准功率为 1 MV · A. 本算例包含居民负荷、工业负荷和商业负荷共 3 种负荷, 不同种类负荷参数如表 1 所示. 线路单位电阻值为 0.22 Ω/km, 单位电抗值为 0.366 Ω/km. 系统中主要元件的故障参数如表 2 所示, 线路信息如表 3 所示, 设置各支路分别发生永久性故障联络开关动作时间设定为 1 h, SOP 恢复供电时间设定为 5 h.

表 1 居民、工业、商业用户初始负荷

Tab.1 Initial loads for residential, industrial, and commercial users

负荷类型	初始负荷/(MW/户)
居民	0.180 2
商业	0.469 7
工业	0.847 2

表 2 主要元件故障参数信息

Tab.2 Major component failure parameter information

元件类型	平均故障率/ (次/(台(km)·年))	平均修复时间/h
馈线	0.032	5
主变压器	0.003	30
断路器	0.005	5

表 3 配电网线路参数信息

Tab.3 Distribution network line parameter information

首节点	末节点	长度/km	首节点	末节点	长度/km	首节点	末节点	长度/km	首节点	末节点	长度/km
1	2	0.6	20	21	0.7	40	41	0.7	84	97	0.7
2	3	0.7	1	22	0.6	41	42	0.7	97	98	0.6
3	4	0.8	22	23	0.6	42	43	0.6	98	99	0.6
4	5	0.7	23	24	0.6	43	44	0.8	99	100	0.7
5	6	0.7	24	25	0.7	44	45	0.7	100	101	0.7
6	7	0.6	26	27	0.8	46	47	0.7	101	102	0.6
1	8	0.8	27	28	0.7	82	83	0.7	103	104	0.8
8	9	0.7	28	29	0.7	84	85	0.6	104	105	0.7
9	10	0.7	29	30	0.6	85	86	0.6	105	106	0.7
10	11	0.6	30	31	0.8	86	87	0.8	106	107	0.6
11	12	0.6	31	32	0.7	87	88	0.7	107	108	0.7
12	13	0.6	26	33	0.7	88	89	0.7	103	109	0.6
13	14	0.7	33	34	0.8	89	90	0.6	109	110	0.7
1	15	0.6	34	35	0.8	90	91	0.6	110	111	0.7
15	16	0.6	35	36	0.6	84	92	0.7	111	112	0.6
16	17	0.8	36	37	0.6	92	93	0.7	103	113	0.8
17	18	0.8	37	38	0.7	93	94	0.6	113	114	0.7
18	19	0.6	38	39	0.6	94	95	0.6	114	115	0.7
19	20	0.6	26	40	0.6	95	96	0.6	115	116	0.6

4.2 算法准确性及效率验证

应用图 5 所示系统验证本文所提的电压约束下柔性配电网故障关联矩阵可靠性计算方法的准确性, 选取容量为 3 MV · A 的 SOP 代替联络开关接入配电网. 应用本文方法计算的可靠性指标与枚举法计算所得可靠性指标进行对比, 结果如表 4 所示.

枚举法通过枚举所有支路故障情况, 在各故障情况下优化得到最优供电范围, 计算各节点负荷缺供情况, 而后得到各变电站台区的系统年均停电时间和系统期望缺供电量指标. 经对比, 本文所提出的含 SOP 柔性配电网故障关联矩阵可靠性计算方法得到的结果与枚举法结果一致, 验证了本文方法的准确性.

对比本文方法与枚举法中进行网络搜索的时间 以验证本文算法的效率优势, 所得结果如表 5 所示.

表 4 各变电站台区可靠性指标对比

Tab.4 Comparison of reliability indices for each electrical transformer district

变电站台区	枚举法		本文方法	
	系统年均停电时间/(h/a)	系统期望缺供电量/(MW · h/a)	系统年均停电时间/(h/a)	系统期望缺供电量/(MW · h/a)
1 号台区	29.212	6.333	29.212	6.333
2 号台区	22.863	6.672	22.863	6.672
3 号台区	17.614	4.052	17.614	4.052

表 5 网络搜索时间对比

Tab.5 Comparison of network search time

方法	主电源供电范围 搜索时间/ms	SOP 供电范围搜索 时间/ms
枚举法	26.149	34.872
本文方法	2.047	5.550

对比两者进行网络搜索的时间可以发现, 本文算法网络搜索时间较短, 具有较高的效率. 枚举法在分析各支路故障的影响范围时, 需要采用广度优先遍历进行网络搜索, 以得到由主电源供电以及可能通过 SOP 转供恢复节点的范围. 本文方法利用 PSPM 求逆以及相关布尔代数运算求得, 避免了故障枚举过程中的重复性网络搜索工作, 可直接得到所有支路故障时各负荷可能受到的影响. 因此, 本文方法能在保证精度的同时提升速度, 且便于计算机自动生成.

4.3 可靠性计算结果分析

为验证提出的考虑电压支撑的含 SOP 柔性配电网故障关联矩阵可靠性计算方法的有效性, 利用中压实际配电网算例对所提方法进行测试和分析. 采用以下 3 种方案进行对比, 分析 SOP 对配电网供电可靠性的提升作用:

方案 1 不考虑联络开关参与供电恢复;

方案 2 考虑联络开关参与供电恢复;

方案 3 SOP 取代联络开关接入配电网, 对失电区域进行供电恢复.

在各支路永久性故障下分别采用以上方案进行供电恢复, 计算各方案下各负荷节点的期望缺供电量, 如图 6~图 8 所示. 在此基础上得到系统可靠性指标, 如表 6 所示.

可以看出, 联络开关和 SOP 的利用可以减小节点期望缺供电量指标. 同时, 以 1 号变电站台区为例进行分析, 方案 2 和方案 3 下节点 10 到节点 14 的节点期望缺供电量指标均有所降低, 但方案 2 下的节点 8 和节点 9 的期望缺供电量没有降低, 而方案 3 下有所降低. 这是由于联络开关进行供电恢复时考虑线路上存在压降, 为保证节点电压在安全范围内, 无法对节点 8 和节点 9 进行供电恢复; SOP 可以起到电

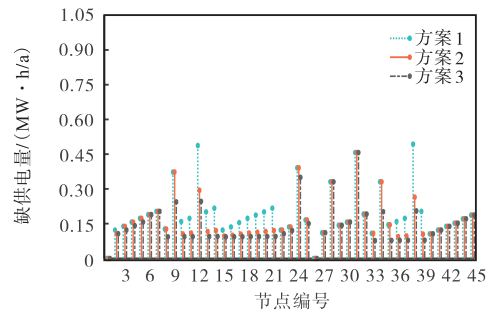


图 6 1号变电站台区内节点期望缺供电量

Fig.6 Expected energy not served for nodes in substation 1

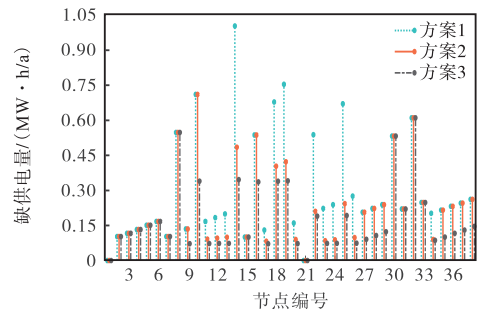


图 7 2号变电站台区内节点期望缺供电量

Fig.7 Expected energy not served for nodes in substation 2

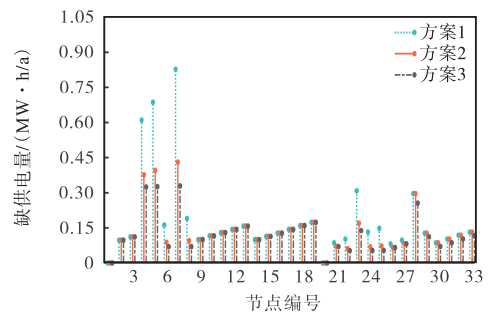


图 8 3号变电站台区内节点期望缺供电量

Fig.8 Expected energy not served for nodes in substation 3

表 6 不同方案下系统可靠性指标对比

Tab.6 Comparison of system reliability indices across different schemes

方案	系统年均停电 时间/(h/a)	系统期望缺供电量/ (MW · h/a)
1	100.299	26.037
2	81.418	20.341
3	69.688	17.057

压支撑作用, 供电恢复范围增大。

对比 3 种方案下的系统可靠性指标可以看出, 联络开关与 SOP 接入配电网均能有效降低系统的年均停电时间和期望缺供电量。方案 2 中系统年均停电时间减少了 19% (18.88 h), 方案 3 减少了 31% (30.61 h), 方案 2 中系统年均期望缺供电量降低了 22% (5.70 MW · h), 方案 3 降低了 34% (8.98 MW · h), SOP 的利用对于提升系统可靠性效果明显。相较于利用联络开关进行供电恢复, SOP 能实时响应控制指令, 恢复供电时间较短, 同时能够向系统提供无功功率以改善系统电压分布, 从而扩大供电恢复范围。

改变接入系统的 SOP 容量, 分析不同 SOP 容量下的系统可靠性指标变化情况, 如表 7 所示。

表 7 不同 SOP 容量下系统可靠性指标对比

Tab.7 Comparison of system reliability indices across different SOP capacities

SOP 容量/ (MV · A)	系统年均停电 时间/(h/a)	系统期望缺供电量/ (MW · h/a)
1	87.837	22.548
2	76.346	19.266
3	69.688	17.057
4	67.541	16.132
5	67.455	16.117

从表 7 中结果可知, 随着 SOP 容量增大, 系统年均停电时间和系统期望缺供量减小, 系统可靠性提高。同时随着 SOP 容量的持续增大, 系统年均停电时间和系统期望缺供量下降幅度减小。

5 结 论

(1) 与枚举法对比, 验证了本文所提可靠性计算方法的准确性。本方法通过矩阵的代数、布尔运算代替故障枚举过程中的重复性网络搜索过程, 可直接得到所有支路故障时各负荷可能受到的影响, 在保证精度的同时, 提升了可靠性计算的效率, 且便于计算机自动生成。

(2) 智能软开关的应用显著提高了配电系统可靠性, 相较于利用联络开关进行供电恢复, 智能软开关能实时响应控制指令, 恢复供电时间较短, 同时能向系统提供无功功率以改善系统电压分布, 从而扩大供电恢复范围。本方法充分考虑电压对可靠性计算的影响, 进一步丰富了智能软开关的应用场景。

参考文献:

[1] 丛鹏伟, 唐 巍, 娄铖伟, 等. 含高渗透率可再生能源

源的主动配电网两阶段柔性软开关与联络开关协调优化控制[J]. 电工技术学报, 2019, 34(6): 1263-1272. Cong Pengwei, Tang Wei, Lou Chengwei, et al. Two-stage coordination optimization control of soft open point and tie switch in active distribution network with high penetration renewable energy generation[J]. Transactions of China Electrical Society, 2019, 34(6): 1263-1272 (in Chinese).

[2] 董旭柱, 华祝虎, 尚 磊, 等. 新型配电系统形态特征与技术展望[J]. 高电压技术, 2021, 47(9): 3021-3035.

Dong Xuzhu, Hua Zhuhu, Shang Lei, et al. Morphological characteristics and technology prospect of new distribution system[J]. High Voltage Engineering, 2021, 47(9): 3021-3035 (in Chinese).

[3] 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).

[4] Li Z H, Wu W C, Tai X, et al. A reliability-constrained expansion planning model for mesh distribution networks[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2021, 36(2): 948-960.

[5] Billinton R, Billinton J. Distribution system reliability indices[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1989, 4(1): 561-568.

[6] Su S, Hu Y, He L B, et al. An assessment procedure of distribution network reliability considering photovoltaic power integration[J]. IEEE Access, 2019(7): 60171-60185.

[7] Gonzalez-Fernandez R, Leite da Silva A. Reliability assessment of time-dependent systems via sequential cross-entropy Monte Carlo simulation[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2011, 26(4): 2381-2389.

[8] Hou K, Jia H J, Yu X D, et al. An impact increments-based state enumeration reliability assessment approach and its application in transmission systems[C]// 2016 IEEE Power and Energy Society General Meeting (PESGM). Boston, USA, 2016: 1-5.

[9] 胡晓斌. 基于解析法的配电系统可靠性计算[D]. 南昌: 南昌大学, 2010.

Hu Xiaobin. Distribution System Reliability Assessment Based on Analytical Method[D]. Nanchang: Nanchang University, 2010 (in Chinese).

[10] 刘文霞, 林子鉴, 马 铁, 等. 计及信息失效影响的

- 主动配电系统可靠性建模与评估[J]. 电力系统自动化, 2019, 43(19): 94-102.
- Liu Wenxia, Lin Zijian, Ma Tie, et al. Reliability modelling and evaluation of active distribution system considering effect of cyber invalidity[J]. Automation of Electric Power Systems, 2019, 43(19): 94-102(in Chinese).
- [11] 王主丁, 韦婷婷, 万凌云, 等. 计及多类开关和容量约束的中压配电网可靠性估算解析模型[J]. 电力系统自动化, 2016, 40(17): 146-155.
- Wang Zhuding, Wei Tingting, Wan Lingyun, et al. Analytical reliability estimation model of medium voltage distribution networks considering different types of switches and capacity constraints[J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(17): 146-155(in Chinese).
- [12] 徐 栋. 面向可靠性的含分布式电源配电系统相关问题研究[D]. 天津: 天津大学, 2016.
- Xu Li. Research on Reliability Issues of Distribution Power System with DG Integration[D]. Tianjin: Tianjin University, 2016(in Chinese).
- [13] Wang C S, Zhang T Y, Luo F Z, et al. Fault incidence matrix based reliability evaluation method for complex distribution system[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2018, 33(6): 6736-6745.
- [14] 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).
- [15] Chen X, Zhao Y D, Xiong W, et al. Partition and block algorithm for active distribution network reliability evaluation with a soft open point[C]// 2023 5th Asia Energy and Electrical Engineering Symposium(AEES). Chengdu, China, 2023: 777-783.
- [16] 张天宇. 基于故障关联矩阵的配电系统可靠性评估方法[D]. 天津: 天津大学, 2019.
- Zhang Tianyu. Distribution System Reliability Evaluation Based on the Fault Incidence Matrix[D]. Tianjin: Tianjin University, 2019(in Chinese).
- [17] Styan G P H. Hadamard products and multivariate statistical analysis[J]. Linear Algebra & Its Applications, 1973, 6(1): 217-240.
- [18] Gan L W, Li N, Topcu U, et al. Exact convex relaxation of optimal power flow in radial networks[J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 2015, 60(1): 72-87.
- [19] Li Z H, Wu W C, Zhang B M, et al. Analytical reliability assessment method for complex distribution networks considering post-fault network reconfiguration[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2020, 35(2): 1457-1467.
- [20] 熊家亮. 基于故障关联矩阵的园区综合能源系统可靠性评价[D]. 天津: 天津大学, 2021.
- Xiong Jiali. Reliability Evaluation of Community Integrated Energy Systems Based on Fault Incidence Matrix[D]. Tianjin: Tianjin University, 2021(in Chinese).
- [21] Zhao J L, Xiong J L, Yu H, et al. Reliability evaluation of community integrated energy systems based on fault incidence matrix[J]. Sustainable Cities and Society, 2022, 80(4): 103769.
- [22] 宋关羽. 面向多运行场景的智能配电软开关运行与规划方法[D]. 天津: 天津大学, 2019.
- Song Guanyu. Operation and Planning Method of Soft Open Point for Multiple Scenarios in Active Distribution Network[D]. Tianjin: Tianjin University, 2019(in Chinese).
- [23] 陈 昊. 面向可靠性与经济性的有源配电网智能软开关规划方法[D]. 天津: 天津大学, 2019.
- Chen Hao. Planning Method of Soft Open Point for Supply Reliability and Economic in Active Distribution Networks[D]. Tianjin: Tianjin University, 2019(in Chinese).
- [24] 王守相, 高嘉佐, 赵倩宇, 等. 计及故障重构与信息约束的有源配电网短期可靠性评估方法[J]. 电力自动化设备, 2023, 43(10): 79-86.
- Wang Shouxiang, Gao Jiazuo, Zhao Qianyu, et al. Short-term reliability assessment method of active distribution network considering fault reconfiguration and cyber constraints[J]. Electric Power Automation Equipment, 2023, 43(10): 79-86(in Chinese).
- [25] 葛少云, 周晨曦, 刘 洪, 等. 考虑环间接入模式及可靠性影响的有源配电网软开关规划[J]. 电力系统自动化, 2021, 45(8): 120-128.
- Ge Shaoyun, Zhou Chenxi, Liu Hong, et al. Soft open point planning for active distribution network considering influence of access mode between feeder loops and reliability[J]. Automation of Electric Power Systems, 2021, 45(8): 120-128(in Chinese).

(责任编辑: 孙立华)