

显式集成可靠性表达式的 柔性配电网多类型开关优化配置

范鹏逸¹, 余涛², 王梓耀^{1*}, 萧文聪¹, 潘振宁¹

(1. 华南理工大学电力学院, 广东省 广州市 510641;
2. 广东省电网智能量测与先进计量企业重点实验室, 广东省 广州市 510641)

Optimal deployment of Multi-type Switches in Flexible Distribution Network by Explicitly Integrating With Reliability Expressions

FAN Pengyi¹, YU Tao², WANG Ziyao^{1*}, XIAO Wencong¹, PAN Zhenning¹

(1. School of Electric Power, South China University of Technology, Guangzhou 510641, Guangdong Province, China;
2. Guangdong Provincial Key Laboratory of Intelligent Measurement and Advanced Metering of Power Grid,
Guangzhou 510641, Guangdong Province, China)

ABSTRACT: With the construction of new power systems, users' demand for power supply reliability is increasing day by day, and the optimal deployment of switches, as the main executing device in the self-healing process of distribution networks, plays a key role in improving the reliability of distribution networks. The new soft open point (SOP) has the characteristics of real-time response and voltage support, which can replace the contact switch in traditional distribution networks, so as to realize the flexible interconnection between the feeders, and provide a new approach for improving the reliability of distribution networks. To this end, this paper proposes an optimal deployment model of multi-type switches in flexible distribution networks with explicitly integrated reliability expression, which delivers a fine-grained characterization of the action coupling relationship between flexible switches and traditional switches in different stages of the self-healing process of distribution networks, and establishes an explicit analytical relationship between different switch types and system reliability indicators, so as to obtain the optimal multi-type switch deployment scheme. Finally, the model is tested by a distribution network example to verify its correctness and effectiveness.

KEY WORDS: flexible distribution network; soft open point (SOP); switch planning; distribution network self-healing; explicit reliability

摘要: 随着新型电力系统的建设, 用户对于供电可靠性的需求日益升高, 而各类开关作为配电网自愈过程的主要执行设备, 其优化配置对于提高系统可靠性起到关键作用。新型柔性软开关(soft open point, SOP)具有远程控制与电压支撑的特点, 可替代传统配电网中的联络开关, 实现各馈线之间的柔性互联, 为改善配电网可靠性提供了新的思路。为此, 该文提出一种显式集成可靠性表达式的柔性配电网多类型开关优化配置模型, 对配电网自愈过程不同阶段中柔性开关与其他智能开关的动作耦合关系进行精细化建模, 建立不同开关类型与系统可靠性指标之间的显式解析关系, 从而得到最优的多类型开关配置方案。最后, 在配电网算例中对该模型进行测试, 验证模型的正确性和有效性。

关键词: 柔性配电网; 新型柔性软开关; 开关配置; 配电网自愈; 显式可靠性

0 引言

在“碳达峰 碳中和”目标指引下, 供电可靠性已成为新型电力系统建设的基本前提, 用户对配电网可靠性提出更高的要求^[1-2], 如经济发达的珠海横琴、深圳前海、新加坡等, 系统可靠性要求达到99.9999%以上^[3]。各类开关设备是配电网实现故障后自愈的基础, 是保障系统可靠性的重要器件, 不同类型开关的选址与故障隔离、故障后转供等过程密切相关, 因此, 科学地对配电网中各类开关设备

基金项目: 国家自然科学基金项目(522071054); 中国博士后科学基金(2022M721184); 广州市基础研究计划基础与应用基础研究项目(2022A04J01135)。

Project Supported by National Natural Science Foundation of China (522071054); China Postdoctoral Science Foundation (2022M721184); Guangzhou Basic and Applied Basic Research Foundation (2022A04J01135).

进行协同规划是提高电网运行经济性以及可靠性的重要环节^[4]。

为进一步提升配电网可靠性,各类柔性互联设备在配电网中开始推广应用,其中柔性软开关(soft opener point, SOP)可通过有功转移和无功支撑提升柔性配电网自愈恢复的能力,替代传统联络开关实现不同馈线之间的柔性互联,是促进新型电力系统柔性化的重要设备^[5-7]。然而,由于 SOP 的成本较高,如何在新型配电网中合理地配置 SOP 与其他开关设备,提升配电系统的可靠性和经济性,是实现柔性配电网双 Q 规划(quantity and quality)的关键^[8]。

考虑可靠性的配电网开关设备规划方法可分为 3 类:规划后可靠性评估修正、启发式优化规划、显式解析可靠性嵌入规划,3 类方法的特点对比如图 1 所示^[9]。

前两类规划方法,需多次求解配电网规划模型并开展可靠性后评估,这两类规划方法可采用的可靠性评估方法包括解析法(analytical method, AM)和蒙特卡洛模拟法(monte carlo simulation, MCS)。目前已有研究基于 AM 和 MCS 开展考虑 SOP 的可靠性评估,例如,考虑到分布式电源(distributed generators, DG)运行过程中的随机性与波动性,可使用改进的最小路径搜索方法提高配电网可靠性评估模型的计算效率,从而在各类负载场景中更加高效地实现配电网的功率流调节,提高配电网的可靠性^[10];同时,针对新能源储能的不稳定性与间接性,尤其是电池储能系统的热衰减以及热失控,利用蒙特卡洛模拟法进行可靠性评估也是目前较为常用的方法^[11];除此之外,贝叶斯时序网络模拟法也

经常被应用于可靠性评估当中,该方法可以在进行指标评估的同时,识别系统中可靠性较为薄弱的环节^[12]。上述可靠性评估算法主要应用于网架拓扑、开关位置确定的情况,其开关位置与负荷节点、电源节点的上下游拓扑关系明确,便于开展拓扑搜索和逻辑判断进而完成可靠性计算。然而,对于配电网开关配置优化规划这类复杂混合整数规划问题,上述两类规划方法本质是一种“类穷举”的方法,难以保证考虑可靠性约束/目标后规划方案的最优性。

为克服传统可靠性评估算法需要进行拓扑搜索而无法显式表达的问题,第 3 类方法构建开关设备配置变量与系统可靠性指标之间的显式解析表达式,支持可靠性评估显式嵌入开关配置规划决策模型。2018 年 Gregorio 建立了配电网可靠性评估的显式建模方法^[13],并将其应用于交流配电网规划中,但该方法仅适用于辐射状网架^[14];在此基础上,文献[15-16]将其扩展到闭环交流网架,文献[17]将其扩展应用至交直流网架。然而,鲜有研究精细化构建考虑 SOP 故障后多阶段多类型开关动作逻辑关系的可靠性显式约束表达式,并将其应用于新型配电网开关配置。

本文提出一种显式集成可靠性表达式的柔性配电网多类型开关优化配置模型,该模型的主要创新点为:在现有配电网多类型智能开关规划模型的基础上考虑了 SOP,根据包含 SOP 在内的各类开关动作耦合逻辑,对柔性配电网自愈过程中的拓扑变化进行了精细化建模,构建了系统可靠性指标与开关配置变量之间的显式解析关系,实现 SOP 与各类智能开关的协同规划。相比传统规划-后评估和基于启发式算法的规划方法,本文所提基于柔性互联

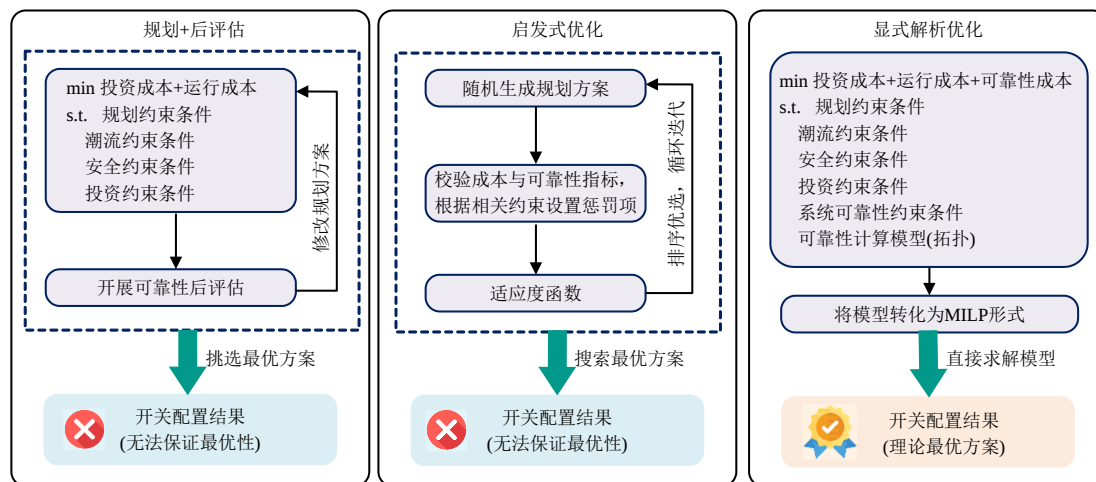


图1 考虑可靠性的配电网开关设备规划方法对比图

Fig. 1 Comparison of reliability based planning methods for distribution network switch

开关显式可靠性计算模型求解效率更高,并且可得到具有最优可靠性的开关配置方案。

1 SOP 原理及在提升系统可靠性上的主要优势

目前针对 SOP 原理的研究已较为成熟,本节将介绍 SOP 的拓扑结构、工作原理、不同场景下的控制模式以及相较于传统络开关的优势。

SOP 的基本结构如图 2 所示,其由两个电压源换流器(voltage source converter, VSC)VSC1 与 VSC2 背靠背并联而成。在工作时,两个电压型换流器根据线路的功率流向分别充当整流器与逆变器。对于有功功率而言,SOP 只起到输送有功的作用;而对于无功功率而言,由于中间电容的存在,两端的无功功率是解耦合的^[18]。

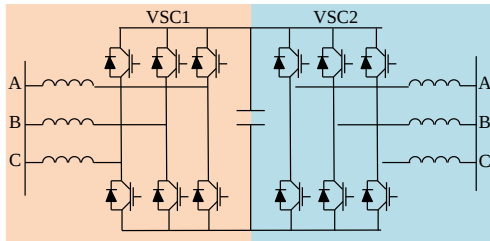


图 2 SOP 基本结构图

Fig. 2 SOP basic structure diagram

在系统处于不同工作状态时,SOP 两端的控制方式不同。当系统处于正常工作状态时,SOP 的两端分别为 PQ 控制与 $V_{dc}Q$ 控制,即一端控制流过整个 SOP 的有功以及该端发出的无功,另一端维持 SOP 内部直流电压恒定并控制该端发出的无功。当系统处于故障状态时,SOP 的故障端为 Vf 控制,非故障端为 $V_{dc}Q$ 控制,其中 Vf 控制表示被控量为电压与相角,以实现离网负荷的并网同步操作,并在转供电后提供电压支撑,非故障端则继续负责维持 SOP 内部直流电压的稳定^[19]。

SOP 可以独立调节两端节点的无功,起到了支撑节点电压的作用。除此之外,由于 SOP 的闭锁由其内部控制策略决定并且拥有远程遥控功能,因此在 CB、RCS、MS 与 SOP 4 种开关中,SOP 的响应速度最快,实现实时故障切除与转供电。对柔性互联配电系统进行潮流控制与快速故障切除是 SOP 不同于其他智能开关的两大优点^[19],这也使得系统安装 SOP 后,可靠性可以得到有效提升。

2 考虑 SOP 的系统故障后自愈过程建模

配电网自愈过程中,各类开关依次动作、相互

配合,实现故障的切除的与停电区域的转供电,因此需要分析 SOP 与 CB 以及 RCS 之间的配合方式。本节将对柔性配电网的自愈过程的各阶段进行精细化建模,分析不同阶段中各类开关发挥的作用。

2.1 自愈过程各类型开关动作逻辑关系

本文考虑的智能开关包括 SOP、断路器(circuit breaker, CB)、三遥开关(remote-controlled switches, RCS)以及手动开关(manual switch, MS)。以下通过一个 9 节点系统模型对故障后自愈过程中各类型开关在不同阶段中发挥的作用进行分析。

9 节点系统如图 3(a)所示,其中一共有 3 个电源节点,6 个负荷节点;7 号节点与 8 号节点以及 9 号节点与 8 号节点之间的线路为联络线,并且 7 号与 8 号节点之间安装有 SOP,认为其初始为联通。假设单一故障发生在节点 2 与节点 5 之间的支路,下文详细阐述故障发生后系统状态变化的 3 个关键阶段。

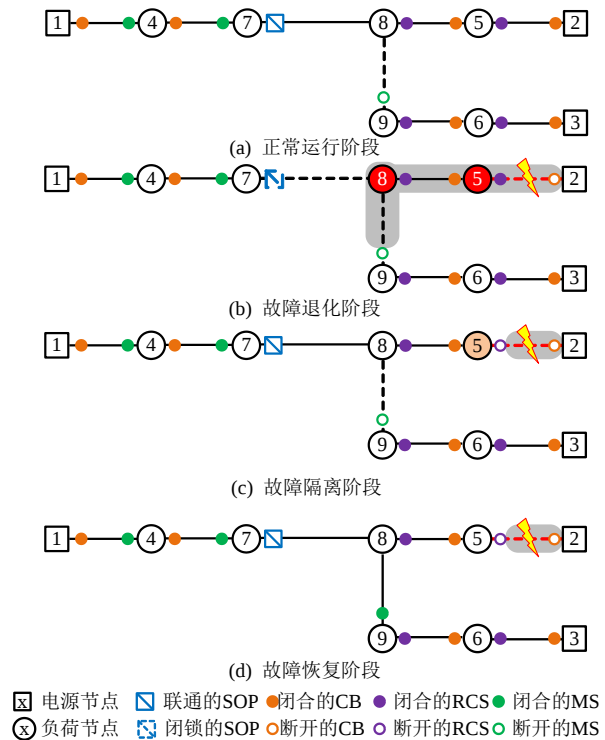


图 3 9 节点拓扑分析图

Fig. 3 9-node topology analysis diagram

图 3(b)展示了故障退化阶段,此时为防止故障造成的影响在系统中扩散,SOP 与 CB 会相继动作。如上文所说,SOP 的状态取决于控制策略,所以在 CB 断开隔离故障之前,SOP 率先闭锁,此时节点 7 与节点 8 之间失去联系,节点 1、4、7 所连成的 3 节点系统从故障区域中隔离^[20],该过程持续时间极短,其中损失的负荷可忽略不计。SOP 闭锁隔离

之后,故障线路上的CB动作,即节点2与节点5之间线路中靠近节点2一端的CB断开,故障与变电站节点2之间失去联系,负荷节点5与负荷节点8被隔离,完全失去负荷。

图3(c)展示了故障隔离阶段,CB的就地自动隔离只能保证在故障发生后尽快将电源节点与故障区域隔离,如果需要恢复停电区域的供电,则还需进一步精细化隔离。相较于MS,CB、RCS与SOP都具有远程遥控功能,因此安装有SOP或RCS的线路端都可以动作,如图3(c)所示。图3(c)中,节点2与节点5之间线路上靠近节点5的RCS断开,故障被从节点5与节点8相连的孤岛中隔离。同时,由于节点5与节点8不再与故障线路相连,因此可控制SOP恢复联通,使其恢复供电。但SOP容量有限,可能出现部分负荷无法完全恢复供电的情况,如图3(c)中的节点5所示。

在图3(d)所示的供电恢复阶段,故障的隔离已经完成,工程人员可到达现场对节点8与节点9之间的常开MS进行合闸操作,电源3向节点5与节点8供电,节点5与节点8完全恢复供电,系统完成故障后转供。

在各时间段中,4类开关发挥着不同的作用,而每个时间段的持续时间长短也不一样。SOP隔离阶段的持续时间较短,可以与CB隔离阶段合称为故障退化阶段(fault degradation, FD),持续时间 t_1 约1min;然后,RCS与CB将故障线路隔离并与SOP共同转供电的故障隔离阶段(fault isolation, FI)持续时间 t_2 约为6min;最后,MS闭合转供的供电恢复(service restoration, SR)阶段持续时间 t_3 约为10min^[21]。装备SOP的柔性系统与传统配电网故障后各个时间段对应系统负荷值对比如图4所示,SOP的电压支撑作用可以使系统在SR阶段恢复更多的负荷,同时SOP的远程遥控功能使其可以更快

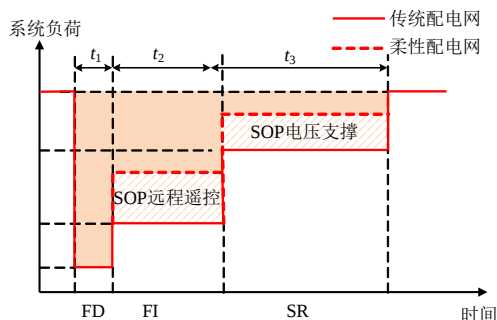


图4 传统配电网与柔性配电网故障后系统负荷对比图

Fig. 4 Comparison of system load after faults between systems with and without SOPs

地完成转供操作,因此SOP主要在FI阶段以及SR阶段降低系统的损失负荷。

2.2 模型假设

为便于计算和分析,在构建显式解析可靠性开关规划模型时,需要满足以下假设条件。

假设1: SOP仅允许装设在联络线路上^[5]。

假设2: 故障发生后,SOP的闭锁早于CB对故障的隔离,但由于SOP闭锁速度较快,因此假设二者在同一阶段发生^[20]。

假设3: 本文主要围绕高可靠性配电系统进行研究,因此假设FI阶段由RCS进行远程隔离,MS只在SR阶段中动作。

3 考虑显式解析可靠性的柔性配电网开关配置模型构建

本节介绍考虑显式解析可靠性的柔性配电网开关配置模型构建。该模型主要二进制变量包括开关配置变量 $x_{ij,x}^{SW}$ 、开关各阶段的状态变量 $s_{ij,x,c}^{ST}$ 以及负荷状态变量 $I_{i,c}^{ST}$,其中上标ST泛指自愈过程的FD、FI、SR阶段,SW泛指4类开关SOP、CB、RCS、MS,下标 ij 表示支路索引, c 表示故障场景索引, x 表示线路 ij 中的某一端。

各个变量与约束之间的关系如图5所示,其中开关配置变量 $x_{ij,x}^{SW}$ 通过开关动作约束影响各个阶段的开关状态变量 $s_{ij,x,c}^{ST}$;开关状态变量 $s_{ij,x,c}^{ST}$ 通过改变系统拓扑进而影响系统的潮流分布,控制各个负荷的供电情况 $I_{i,c}^{ST}$;负荷供电情况 $I_{i,c}^{ST}$ 决定了系统的可靠性指标,最后通过模型内嵌的显式可靠性解析约束,使模型根据系统的可靠性要求对开关配置进行优化,实现开关配置与可靠性评估的同步进行。以下将对各个变量之间关系以及约束条件进行具体建模。

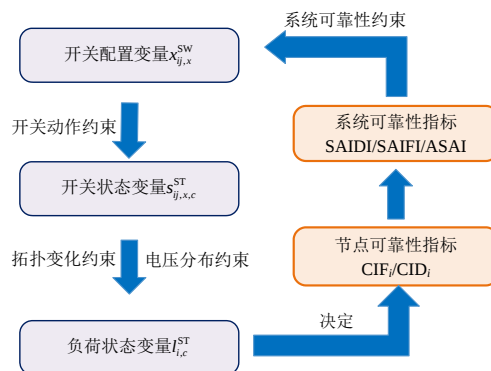


图5 模型框架图

Fig. 5 Model framework diagram

3.1 显式可靠性表达式约束

本节将介绍负荷状态变量与可靠性指标之间的表达式，并将此作为约束嵌入开关配置优化模型。本文模型使用的可靠性指标包括系统的平均中断持续时间指数(system average interruption duration index, SAIDI)、系统平均中断频率指数(system average interruption frequency index, SAIFI)、系统平均可用性指数(average system availability index, ASAI)以及电量不足期望值(expected Energy not supplied, EENS)，要得到上述值需先计算节点可靠性指标，节点可靠性指标分别为节点 i 处的客户中断持续时间(customer interruption duration at node i , CID _{i})以及节点 i 处的客户中断频率(customer interruption frequency at node i , CIF _{i})，其表达式如式(1)、(2)所示。

$$C_{IDi} = \sum_{c \in \gamma} \lambda_c \tau^{FD} (1 - l_{i,c}^{FD}) + \sum_{c \in \gamma} \lambda_c \tau^{FI} (1 - l_{i,c}^{FI}) + \sum_{c \in \gamma} \lambda_c \tau^{SR} (1 - l_{i,c}^{SR}), \forall i \in \psi^{LD} \quad (1)$$

$$C_{IFI} = \sum_{c \in \gamma} \lambda_c (1 - l_{i,c}^{FD}) + \sum_{c \in \gamma} \lambda_c (1 - l_{i,c}^{FI}) + \sum_{c \in \gamma} \lambda_c (1 - l_{i,c}^{SR}), \forall i \in \psi^{LD} \quad (2)$$

式中： ψ^{LD} 为线路集合； λ_c 为故障场景 c 发生的概率； γ 为故障场景的集合； τ^{FD} 、 τ^{FI} 、 τ^{SR} 为 FD、FI、SR 阶段的持续时间。

系统可靠性指标表达式如式(3)–(6)所示。

$$S_{AIDI} = \sum_{i \in \psi^{LD}} N_{Ci} C_{IDi} / \sum_{i \in \psi^{LD}} N_{Ci} \quad (3)$$

$$S_{AIFI} = \sum_{i \in \psi^{LD}} N_{Ci} C_{IFI} / \sum_{i \in \psi^{LD}} N_{Ci} \quad (4)$$

$$E_{ENS} = \sum_{i \in \psi^{LD}} C_{IDi} P_i^{LOAD} \quad (5)$$

$$A_{SAI} = 1 - \frac{S_{AIDI}}{8760} \quad (6)$$

$$\begin{cases} S_{AIDI} \leq K_{SAIDI} \\ S_{AIFI} \leq K_{SAIFI} \end{cases} \quad (7)$$

式中： N_{Ci} 为节点 i 的用户数； P_i^{LOAD} 为节点 i 的负荷有功； K_{SAIDI} 以及 K_{SAIFI} 表示 S_{AIDI} 以及 S_{AIFI} 的上限值。式(7)将 S_{AIDI} 与 S_{AIFI} 限制在一定范围内，保证系统整体的可靠性满足要求，由于 ASAI 与 SAIDI 线性相关，因此不对 ASAI 做额外约束。开关配置方案可通过影响自愈过程中的负荷状态进而改变可靠性指标，模型需对开关选址进行合理配置以满足系统对可靠性的要求。

3.2 自愈过程各阶段开关动作约束

本节将建立开关配置变量与各阶段开关状态变量之间的关系。故障发生前，系统处于正常工作阶段(normal operation, NO)，故障后自愈过程可分为 3 个阶段，各个阶段可动作的开关类型有所不同。

NO 阶段到 FD 阶段开关状态变量与开关配置变量之间的约束如下：

$$\begin{aligned} -M(x_{ij,x}^{SOP} + x_{ij,x}^{CB}) &\leq s_{ij,x,c}^{FD} - s_{ij,x,c}^{NO} \leq 0, \\ \forall ij \in \psi^L, x &= \{i, j\} \end{aligned} \quad (8)$$

式中 M 为一较大的定值。式(8)表示在 FD 阶段，由于 SOP 的快速动作特性以及 CB 的就地保护特性，只有安装了 CB 或 SOP 的开关状态可以改变，并且变化方式为联通改为断开，将故障与电源隔离。

FD 阶段到 FI 阶段开关状态变量与开关配置变量之间的约束如下：

$$\begin{aligned} -M(x_{ij,x}^{RCS} + x_{ij,x}^{CB}) &\leq s_{ij,x,c}^{FI} - s_{ij,x,c}^{FD} \leq \\ M(x_{ij,x}^{SOP} + x_{ij,x}^{RCS}), \forall ij \in \psi^L, x &= \{i, j\} \end{aligned} \quad (9)$$

式(9)表示在 FI 阶段，RCS 与 CB 都可故障线路从系统中隔离，并且可以通过远程操作联络线上的 RCS 与 SOP 进行转供。

FI 阶段到 SR 阶段开关状态变量与开关配置变量之间的约束如下：

$$\begin{aligned} -M(x_{ij,x}^{MS}) &\leq s_{ij,x,c}^{SR} - s_{ij,x,c}^{FI} \leq M(x_{ij,x}^{MS}), \\ \forall ij \in \psi^L, x &= \{i, j\} \end{aligned} \quad (10)$$

式(10)表示在 SR 阶段中，主要通过工程人员手动操作 MS 完成转供电过程。

3.3 考虑 SOP 的自愈过程拓扑变化约束

本节将建立开关状态变量负荷状态变量之间的关系。相关约束如下：

$$l_{i,c}^{ST} = 0, \forall i \in f_{ij,c}, ST = \{FD, FI, SR\} \quad (11)$$

$$l_{i,c}^{ST} = 1, \forall i \in g_j, ST = \{FD, FI, SR\} \quad (12)$$

式中： $f_{ij,c}$ 为故障场景 c 下的故障线路集合； g_j 为变电站节点的集合； $l_{ij,c}^{ST}$ 为表征在故障场景 c 下，线路 ij 在状态 ST 中是否有功率流过的二进制变量，等于 0 时无功率流过，等于 1 时有功率流过。式(11)表示故障线路视为断开；式(12)表示设置为电源的节点不会失去供电。

$$\begin{aligned} -M(2 - s_{ij,i,c}^{ST} - s_{ij,j,c}^{ST}) + l_{i,c}^{ST} &\leq l_{ij,c}^{ST} \leq \\ M(2 - s_{ij,i,c}^{ST} - s_{ij,j,c}^{ST}) + l_{i,c}^{ST}, \forall ij \in \psi^L, x &= \{i, j\} \end{aligned} \quad (13)$$

对于任意线路，需满足式(13)，当支路两端开

关都闭合即 $s_{ij,i,c}^{ST}$ 、 $s_{ij,j,c}^{ST}$ 都为 1 时, 支路两端节点状态与线路状态相同, 当支路两端开关有一端断开即 $s_{ij,i,c}^{ST}$ 、 $s_{ij,j,c}^{ST}$ 不全为 1 时, 支路两端节点状态与线路状态不一定相同。

$$-M(1-s_{ij,x,c}^{ST})+l_{x,c}^{ST} \leq l_{ij,c}^{ST} \leq M(1-s_{ij,x,c}^{ST})+l_{x,c}^{ST}, \quad \forall ij \in f_{ij,c}, x=\{i, j\} \quad (14)$$

对于故障线路, 需满足式(14), 当线路故障时, 若 $s_{ij,i,c}^{ST}$ 等于 1, 则 i 端节点失去供电, 若 $s_{ij,j,c}^{ST}$ 等于 1, 则 j 端节点失去供电。

$$l_{ij,c}^{ST} \leq s_{ij,x,c}^{ST}, \quad \forall ij \in \psi^L, x=\{i, j\} \quad (15)$$

$$l_{i,c}^{ST} \leq \sum_{ij \in \alpha_i} l_{ij,c}^{ST} + \sum_{ij \in \beta_i} l_{ij,c}^{ST}, \quad \forall i \in \psi^{LD}, \forall ij \in \psi^L \quad (16)$$

式中 α_i 、 β_i 分别为节点 i 与其父节点之间支路的集合、节点 i 与其子节点之间支路的集合。式(15)表示线路两端的开关只要有一端断开, 则线路无功功率流过^[22]; 式(16)表示若一个节点周围的所有线路都没有功率流过, 则其失去供电。

3.4 考虑 SOP 的电压降落约束

SOP 具有两端无功解耦合以及不同场景下控制方式不同的特点, 对系统部分节点的电压稳定产生一定影响, 本节将对 SOP 的柔性配电网中的电压降落模型进行建模。

SOP 的容量约束如下:

$$P_{ij,i,c}^{SOP,ST} = P_{ij,j,c}^{SOP,ST}, \quad \forall ij \in \psi^L \quad (17)$$

$$(P_{ij,i,c}^{SOP,ST})^2 + (Q_{ij,i,c}^{SOP,ST})^2 \leq (S_{ij}^{SOP})^2 l_{ij,c}^{ST}, \quad \forall ij \in \psi^L \quad (18)$$

$$(P_{ij,j,c}^{SOP,ST})^2 + (Q_{ij,j,c}^{SOP,ST})^2 \leq (S_{ij}^{SOP})^2 l_{ij,c}^{ST}, \quad \forall ij \in \psi^L \quad (19)$$

$$-M(x_{ij,i}^{SOP} + x_{ij,j}^{SOP}) \leq P_{ij,j,c}^{SOP,ST} \leq M(x_{ij,i}^{SOP} + x_{ij,j}^{SOP}), \quad \forall ij \in \psi^L \quad (20)$$

$$-M(x_{ij,i}^{SOP} + x_{ij,j}^{SOP}) \leq Q_{ij,j,c}^{SOP,ST} \leq M(x_{ij,i}^{SOP} + x_{ij,j}^{SOP}), \quad \forall ij \in \psi^L \quad (21)$$

式中: $P_{ij,i,c}^{SOP,ST}$ 与 $P_{ij,j,c}^{SOP,ST}$ 为故障状态 c 中, 线路 ij 上的 SOP 在 ST 阶段 i 端与 j 端发出的有功功率; $Q_{ij,i,c}^{SOP,ST}$ 与 $Q_{ij,j,c}^{SOP,ST}$ 为故障状态 c 中, 线路 ij 上的 SOP 在 ST 阶段 i 端与 j 端发出的无功功率; S_{ij}^{SOP} 为 SOP 允许通过的最大容量。式(17)–(19)表示 SOP 两端的有功相同, 无功解耦合, 且流过 SOP 的功率有容量限制。式(20)、(21)表示对于没有安装 SOP 的线路, 流过这类线路的由 SOP 提供的有功和无功只能为 0。

SOP 的电压控制约束如下:

$$-M(l_{i,c}^{FD} + 1 - x_{ij,i}^{SOP} - x_{ij,j}^{SOP}) + U_0 \leq U_{i,c}^{FI} \leq M(l_{i,c}^{FD} + 1 - x_{ij,i}^{SOP} - x_{ij,j}^{SOP}) + U_0, \quad \forall ij \in \psi^L \quad (22)$$

式中: U_0 为 SOP 进行电压控制时故障端电压定值的平方; $U_{i,c}^{ST}$ 为故障状态 c 中, 节点 i 在 ST 阶段电压值的平方。式(22)为 SOP 的电压控制约束, 当线路 ij 装有 SOP 时, 若节点 i 在 FD 阶段处于故障状态, 则 $l_{i,c}^{FD}$ 为 0, 此时当 FI 阶段 SOP 恢复供电时, 节点 i 电压被限制在 U_0 , 反之, 节点电压由系统潮流决定。

考虑 SOP 作用的电压降落约束如下:

$$-M(1-l_{ij,c}^{ST} + x_{ij,i}^{SOP} + x_{ij,j}^{SOP}) \leq U_{i,c}^{ST} - U_{j,c}^{ST} - 2(r_{ij} P_{ij,j,c}^{ST} + x_{ij} Q_{ij,j,c}^{ST}) \leq M(1-l_{ij,c}^{ST} + x_{ij,i}^{SOP} + x_{ij,j}^{SOP}), \quad \forall ij \in \psi^L \quad (23)$$

式中: r_{ij} 与 x_{ij} 为线路 ij 的电阻与电抗; $P_{ij,c}^{ST}$ 与 $Q_{ij,c}^{ST}$ 为故障状态 c 中, 线路 ij 在 ST 阶段流过的有功与无功功率。式(23)为 SOP 的电压降落松弛约束, 由于 SOP 两端无功解耦合, 所以两端节点电压之差并不等于支路电压降, 需对电压降落约束进行松弛, 若线路 ij 装有一个 SOP 或者线路 ij 处于断开状态, 则节点 i 与节点 j 之间的电压降落值被松弛。

节点电压幅值约束如下:

$$U_{\min} \leq U_{i,c}^{ST} \leq U_{\max}, \quad \forall i \in \psi^{LD} \quad (24)$$

式中: $U_{\min}$ 为电压幅值最小值的平方; $U_{\max}$ 为电压幅值最大值的平方。式(24)为电压幅值约束, 表示节点电压不能超过一定范围。

3.5 考虑 SOP 的柔性配电网辐射状约束

当联络线装有 SOP 时, 配电网可由原本的开环运行转变为闭环运行^[23], 需对辐射状约束进行修改, 如下所示:

$$\sum_{i \in \psi^{LD}} l_{i,c}^{ST} = \sum_{ij \in \psi^L} l_{ij,c}^{ST} (1 - x_{ij,i}^{SOP} - x_{ij,j}^{SOP}) \quad (25)$$

式(25)说明系统未停电节点数量始终等于系统未安装 SOP 的联通线路数量, 保证未安装 SOP 的线路开关运行, 允许安装 SOP 的线路柔性闭环运行。

3.6 考虑显式解析可靠性的柔性配电网开关配置整体抽象模型

为了在配电网开关配置过程中嵌入可靠性评估, 模型的目标函数设置如式(26)–(30)所示。

$$\min k_e E_{ENS} + C^{SOP} + C^{CB} + C^{RCS} \quad (26)$$

$$C^{SOP} = \sum_{ij \in \psi^L} \delta^{SOP} (x_{ij,i}^{SOP} + x_{ij,j}^{SOP}) \quad (27)$$

$$C^{CB} = \sum_{ij \in \psi^L} \delta^{CB} (x_{ij,i}^{CB} + x_{ij,j}^{CB}) \quad (28)$$

$$C^{RCS} = \sum_{ij \in \psi^L} \delta^{RCS} (x_{ij,i}^{RCS} + x_{ij,j}^{RCS}) \quad (29)$$

$$C^{MS} = \sum_{ij \in \psi^L} \delta^{MS} (x_{ij,i}^{MS} + x_{ij,j}^{MS}) \quad (30)$$

式中： δ^{SOP} 、 δ^{CB} 、 δ^{RCS} 分别为 SOP、CB、RCS 的年平均成本； k_e 为将功率损失转换为经济损失的常数。

上述所提模型的一般形式可抽象为：

$$\min \mathbf{b}^T \mathbf{x} + \mathbf{d}^T \mathbf{y} \quad (31)$$

$$\text{s.t. } \mathbf{Ax} + \mathbf{Dy} \leq \mathbf{e} \quad (32)$$

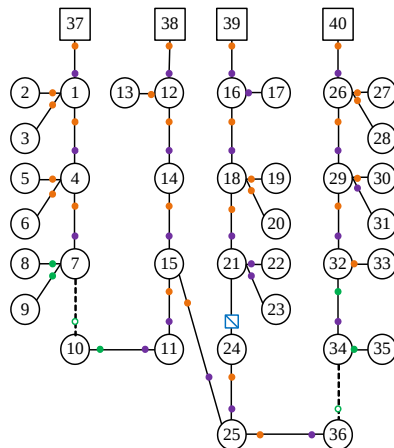
$$\mathbf{Fx} + \mathbf{Gy} = \mathbf{f} \quad (33)$$

式中： $\mathbf{b}$ 、 $\mathbf{d}$ 、 $\mathbf{e}$ 、 $\mathbf{f}$ 、 $\mathbf{A}$ 、 $\mathbf{D}$ 、 $\mathbf{F}$ 、 $\mathbf{G}$ 均为系数矩阵； $\mathbf{x}$ 为整数变量， $\mathbf{x} = [x_{ij,i}^{SOP}, x_{ij,j}^{SOP}, x_{ij,i}^{CB}, x_{ij,j}^{CB}, x_{ij,i}^{RCS}, x_{ij,j}^{RCS}, x_{ij,i}^{MS}, x_{ij,j}^{MS}, l_{ij}^{NO}, l_i^{NO}, s_{ij,i}^{NO}, s_{ij,j}^{NO}, s_{ij,i}^{ST}, s_{ij,j}^{ST}, l_{ij,c}^{ST}, l_{i,c}^{ST}]$ ； $\mathbf{y}$ 为连续变量， $\mathbf{y} = [P_{ij,i,c}^{SOP,ST}, P_{ij,j,c}^{SOP,ST}, Q_{ij,i,c}^{SOP,ST}, Q_{ij,j,c}^{SOP,ST}, P_{ij,c}^{ST}, Q_{ij,c}^{ST}, P_{s,i,c}^{ST}, Q_{s,i,c}^{ST}, P_{DC,i,c}^{ST}, Q_{DG,i,c}^{ST}, P_{g,i,c}^{ST}, Q_{g,i,c}^{ST}, P_i^{LOAD}]$ 。本模型中，式 (7)–(10)、(13)–(16)、(18)–(24) 属于不等式约束，式(11)、(12)、(17)、(25) 属于等式约束。上述模型是一个混合整数锥规划模型 (mixed-integer second-order cone programming, MISOCP)，可通过求解器进行求解^[24]。

4 算例分析

为了充分考虑多变电站的情况，在 40 节点网络上对可靠性优化模型进行测试，通过测试结果验证 SOP 对各项可靠性指标的提升作用以及模型的正确性。

本文采用文献[25]中的配电网算例，系统电压为 20 kV，配电网算例文件的具体信息请参考附录。



(a) 40节点配电网开关配置结果

SOP 年平均成本与其容量近似为线性的关系，其表达式如式(34)所示。

$$\delta^{SOP} = k_s S^{SOP} \frac{r_0(1+r_0)^\tau}{(1+r_0)^\tau - 1} \quad (34)$$

式中： τ 为 SOP 的使用寿命，本文设定为 20 年； r_0 为每年维修操作 SOP 的成本，设定为 SOP 容量的 2%； k_s 为将 SOP 容量换算成经济成本的比例系数，设定为 308.8 元/(kV·A)^[26]，SOP 容量设定为 1 MVA。系统故障后丢负荷造成的经济损失系数设定为 14 元/(kW·h)^[27]。

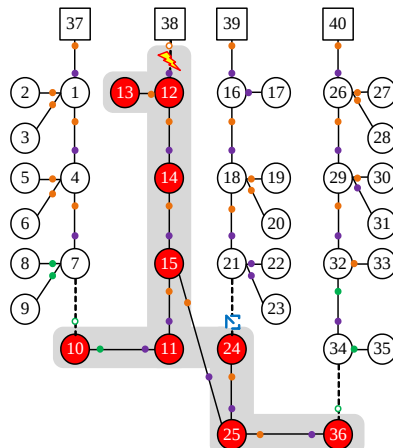
4.1 配网算例开关配置结果以及自愈过程分析

基于本文所提方法得到的 40 节点配电网开关配置结果如图 6(a)所示，其中联络线分别为线路(7,10)、(21,24)以及(34,36)，SOP 安装在线路(21,24)上。

以线路(38,12)故障为例，分析安装 SOP 后的配电网自愈过程。故障发生后，系统进入 FD 阶段，拓扑图如图 6(b)所示，故障线路中靠近电源一端的断路器断开，并且联络线上的 SOP 闭锁，将故障线路与电源隔离。此时，节点 10—15、节点 24、节点 25 以及节点 36 所构成的孤岛与故障线路相连，失去供电。

FI 阶段的系统拓扑如图 6(c)所示，此时故障线路上的 RCS 断开，将故障线路完全隔离，因此联络线上的 SOP 恢复工作对孤岛转供，但受限于 SOP 的容量，无法直接恢复所有负荷，线路(11,15)上的 RCS 动作切除了节点 10 和节点 11，并恢复其余节点的负荷。

SR 阶段的系统拓扑如图 6(d)所示，此时 MS 参与转供，因此联络线(7,10)上的 MS 闭合，节点 10 和节点 11 由电源节点 37 转供恢复供电，系统故障后自愈过程结束。



(b) FD阶段拓扑

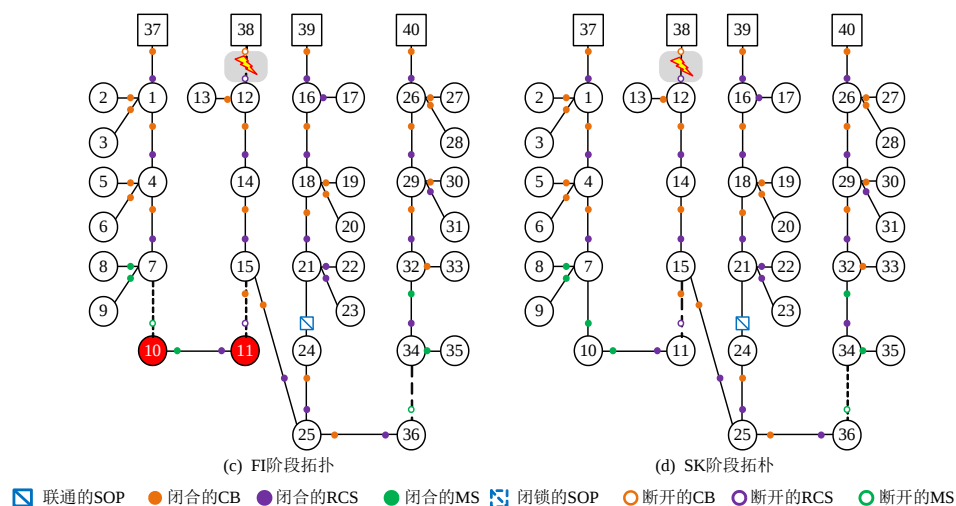


图6 40节点网络故障后自愈过程分析

Fig. 6 Analysis of self-healing process after 40 node network failure

4.2 有无安装 SOP 的系统可靠性指标对比分析

本节将对有无安装 SOP 系统的自愈过程进行比较,以此验证 SOP 相较于传统开关所具有的电压支撑功能,揭示 SOP 在提升可靠性方面的作用。

调节系统的无功功率以实现电压支撑是 SOP 提高系统可靠性的重要原因,图7是35个故障场景中两类系统平均电压水平的比较。可以看出,安装 SOP 的系统在各个故障场景中均拥有更高的电压水平,下文将以故障场景3,即线路(39,16)故障为例分析提升电压水平对于系统自愈过程的影响。

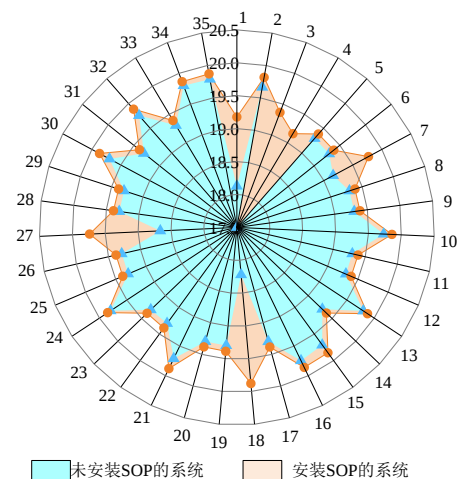


图7 有无安装 SOP 系统各故障场景平均电压水平对比

Fig. 7 Comparison of average voltage levels in various fault scenarios with and without SOP installation

当线路(39,16)故障时,有无安装 SOP 系统 SR 阶段的拓扑对比如图8所示,其中图8(a)为安装 SOP 系统的 SR 阶段拓扑,图8(b)为未安装 SOP 系统的 SR 阶段拓扑。图8(a)中,除了节点17之外的其余负荷都恢复供电,主要原因是 SOP 的容量有

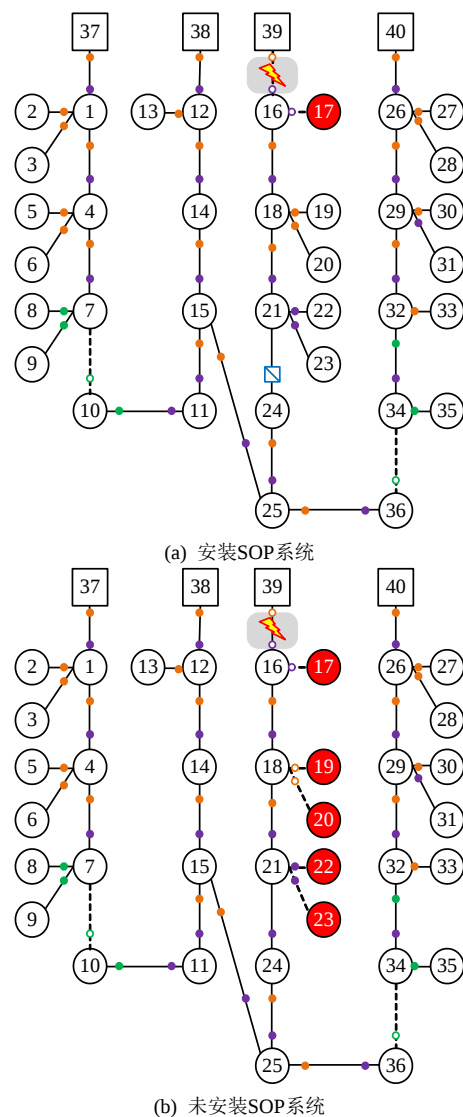


图8 有无安装 SOP 配电网的故障后 SR 阶段对比图

Fig. 8 Comparison diagram of SR stage after faults in distribution networks with and without SOP installation

限,不足以支撑节点 16 至节点 23 全部负荷,因此切除了节点 17;图 8(b)中,系统额外切除了节点 19、20、22 及节点 23,主要原因是电压越限,由于 RCS 不具备电压调节功能,当电源节点 38 对孤岛进行转供时,电压降落较大,节点 16、18、21 的电压水平都较低,因此为了使供电区域的节点电压都维持在正常范围内,系统切除了部分负荷节点,而 SOP 能提供一定的电压支撑,因此切除的负荷节点较少。该故障场景下各节点电压水平对比如图 9 所示。

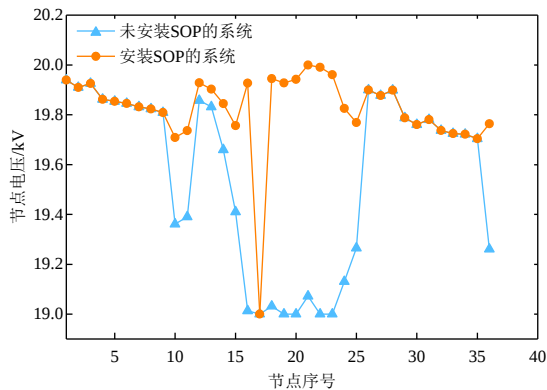


图 9 线路(38, 12)故障后的节点电压对比图

Fig. 9 Comparison diagram of node voltage after line (38, 12) fault

安装 SOP 与未装 SOP 系统的各项可靠性指标如表 1 所示,由于 SOP 电压支撑的功能,相较于未安装 SOP 的系统,装有 SOP 系统的各项可靠性指标均更优。

表 1 有无 SOP 配电网的可靠性指标对比

Table 1 Comparison of reliability indicators for distribution networks with and without SOP

方案	$S_{AIDI}/(\text{h}/\text{年})$	$S_{AIFI}/(\text{1}/\text{年})$	$E_{ENS}/((\text{MW}\cdot\text{h})/\text{年})$	$A_{SAI}/\%$
无 SOP	0.269	1.187	0.916	99.999 6
有 SOP	0.168	0.932	0.551	99.998

4.3 模型可靠性指标计算结果与常用可靠性评估结果对比分析

为验证本文所提显式解析可靠性优化(explicit analytic reliability optimization, EAR)模型所得可靠性指标的正确性,使用 MCS 对配置结果的可靠性指标进行计算,两种评价方法的计算结果如表 2 所

表 2 不同可靠性指标计算方法的结果对比

Table 2 Comparison of results of different reliability index calculation methods

算法	$S_{AIDI}/(\text{h}/\text{年})$	$S_{AIFI}/(\text{1}/\text{年})$	$E_{ENS}/((\text{MW}\cdot\text{h})/\text{年})$	$A_{SAI}/\%$
MCS	0.176	0.957	0.573	99.998
EAR	0.168	0.932	0.551	99.998

示, MCS 的抽样次数设置为 200 次。

由表 2 可知, EAR 与 MCS 的计算结果偏差较小,由此证明了本文所提模型可靠性指标计算的准确性。

4.4 显式解析可靠性规划方法与启发式规划方法对比分析

本节将对所提显式解析规划方法与规划后评估方法以及启发式规划方法进行对比分析,验证模型的正确性以及相较于传统规划方法所具有的优势。

遗传算法(genetic algorithm, GA)、粒子群算法(particle swarm optimization, PSO)以及模拟退火算法(simulated annealing, SA)是常用的启发式规划算法,其中 GA 通过遗传操作对种群进行优化, PSO 通过粒子的位置与速度来改变解的位置, SA 通过在搜索空间中接受更优解或者一定概率下接受劣解的方式,逐步降低搜索的幅度,找到全局最优解或者较好的近似解。使用 GA 以及 PSO 进行优化后开关配置结果与本文所提模型规划结果的各项可靠性指标、开关配置成本部以及求解时间对比如表 3 所示,3 种启发式优化算法的迭代次数均为 1 000 次。

表 3 不同优化方法的可靠性指标对比

Table 3 Comparison of reliability indicators for different optimization methods

模型	$S_{AIDI}/(\text{h}/\text{年})$	$S_{AIFI}/(\text{1}/\text{年})$	$E_{ENS}/((\text{MW}\cdot\text{h})/\text{年})$	成本/元	计算时间/s
GA	0.189	1.167	0.639	311 712	4124
PSO	0.201	1.261	0.698	309 504	3812
SA	0.177	1.03	0.612	310 608	1917
EAR	0.168	0.932	0.551	300 460	51.4

可以看出,由于启发式算法具有随机性,当规划决策空间较大时,运用启发式优化算法难以穷举遍历得到最优解,因此所得结果对应的各项可靠性指标都小于本模型开关配置结果,并且开关配置成本更大;同时,启发式算法若要得到较优的可行解,其计算时间也相对较长。

5 结论与展望

本文通过对新型配电网中包含 SOP 在内的多种智能开关工作机理以及相互配合关系的研究,结合配电网可靠性评估指标,得到以下结论:

1) 构建了计及 SOP 的多类型智能开关配置显式解析规划模型,对配电网自愈过程中各类智能开

关之间的动作逻辑关系进行建模,并通过与 MCS 对比验证了本文所提显式解析可靠性计算方法的正确性。

2)相较于目前常用的启发式算法如 GA、PSO、SA 等,本文所提方法在多种开关配置场景下具有最优可靠性指标以及更快的求解速度。

3)通过不同开关配置方案的对比,揭示了 SOP 对配电网可靠性的提升作用。

针对模型在大规模算例上运行时间较长的问题,后续拟采用并行运算、分区规划等方法进一步优化。此外,柔性配电网中丰富的可调资源在故障发生后可提供功率支撑,后续研究将进一步围绕这一主题完善柔性配电网显式解析建模的内容。

参考文献

- [1] 范荣全,杨云,许珂,等. “双碳”目标下新型电力系统典型特征与发展挑战综述[J]. 四川电力技术, 2023, 46(6): 10-14, 58.
FAN Rongquan, YANG Yun, XU Ke, et al. A review of typical characteristics and development challenges of new power system considering "dual carbon" goal[J]. Sichuan Electric Power Technology, 2023, 46(6): 10-14, 58(in Chinese).
- [2] 陈维江,靳晓凌,吴鸣,等. 双碳目标下我国配电网形态快速演进的思考[J]. 中国电机工程学报, 2024, 44(17): 6811-6817.
CHEN Weijiang, JIN Xiaoling, WU Ming, et al. Thinking on the rapid evolution of distribution network form under the carbon peaking and carbon neutrality goals[J]. Proceedings of the CSEE, 2024, 44(17): 6811-6817(in Chinese).
- [3] 中国南方电网. 南方电网“十四五”电网发展规划出炉[R]. 广州: 南方电网公司, 2021.
China Southern Power Grid. Southern power grid corporation southern power grid's 14th Five Year Plan for power grid development[R]. Guangzhou: China Southern Power Grid Company Limited, 2021(in Chinese).
- [4] 王鲸涛,谢开贵,曹侃,等. 配电网开关优化配置研究现状与展望[J]. 电网技术, 2008, 32(16): 47-52.
WANG Jingtao, XIE Kaigui, CAO Kan, et al. Present situation and prospect of optimal configuration of switching devices in distribution network [J]. Power System Technology, 2008, 32(16): 47-52(in Chinese).
- [5] 王成山,宋关羽,李鹏,等. 考虑分布式电源运行特性的有源配电网智能软开关 SOP 规划方法[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(7): 1889-1897.
WANG Chengshan, SONG Guanyu, LI Peng, et al. Optimal configuration of soft open point for active distribution network considering the characteristics of distributed generation[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(7): 1889-1897(in Chinese).
- [6] 郝加兴,郝全睿,丁磊. 基于序贯 Monte Carlo 模拟法的 MMC 系统可靠性分析和维修优化[J]. 中国电机工程学报, 2024, 44(24): 9796-9810.
HAO Jiaying, HAO Quanrui, DING Lei. Reliability analysis and maintenance optimization of MMC system based on sequential Monte Carlo simulation method[J]. Proceedings of the CSEE, 2024, 44(24): 9796-9810(in Chinese).
- [7] 王成山,王瑞,冀浩然,等. 多电压等级配电系统智能软开关协同配置[J]. 中国电机工程学报, 2024, 44(17): 6831-6843.
WANG Chengshan, WANG Rui, JI Haoran, et al. Coordinated allocation of SOP in multi-voltage distribution network[J]. Proceedings of the CSEE, 2024, 44(17): 6831-6843(in Chinese).
- [8] 王梓耀,陈俊斌,林丹,等. 基于精英蚁群 Q 算法的中压配电网双 Q 规划模型[J]. 电力自动化设备, 2020, 40(11): 32-39.
WANG Ziyao, CHEN Junbin, LIN Dan, et al. Double Q planning model for medium voltage distribution network based on Elite Ant-Q algorithm[J]. Electric Power Automation Equipment, 2020, 40(11): 32-39(in Chinese).
- [9] 仲礼鹏,王梓耀,余涛,等. 基于可靠性显式表达的交直流混合配电网规划方法[J]. 电力系统自动化, 2022, 46(19): 52-61.
ZHONG Lipeng, WANG Ziyao, YU Tao, et al. Planning method for AC/DC hybrid distribution network based on explicit expression of reliability [J]. Automation of Electric Power Systems, 2022, 46(19): 52-61(in Chinese).
- [10] LI Yiran, LI Gengfeng, SUN Shaohua, et al. Reliability assessment of active distribution network considering path-based post-fault island division[C]//2023 6th International Conference on Energy, Electrical and Power Engineering(CEEPE). Guangzhou: IEEE, 2023: 618-623.
- [11] 李思颖,叶承晋,丁一,等. 考虑性能热衰减和热失控传播的大规模电池储能系统可靠性建模与评估[J]. 中国电机工程学报, 2023, 43(6): 2202-2211.
LI Siying, YE Chengjin, DING Yi, et al. Reliability modeling and evaluation of large scale battery energy storage systems considering thermal degradation and thermal runaway propagation[J]. Proceedings of the CSEE, 2023, 43(6): 2202-2211(in Chinese).
- [12] 杨晨曦,高立艾,唐巍. 基于贝叶斯网络时序模拟的气电耦合系统可靠性评估[J]. 电气传动, 2021, 51(11): 75-80.
YANG Chenxi, GAO Liai, TANG Wei. Reliability evaluation of gas-electric coupling system based on

- Bayesian network time series simulation[J]. Electric Drive, 2021, 51(11): 75-80(in Chinese).
- [13] MUÑOZ-DELGADO G, CONTRERAS J, ARROYO J M. Reliability assessment for distribution optimization models: a non-simulation-based linear programming approach[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2018, 9(4): 3048-3059.
- [14] MUÑOZ-DELGADO G, CONTRERAS J, ARROYO J M. Distribution network expansion planning with an explicit formulation for reliability assessment[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2018, 33(3): 2583-2596.
- [15] LI Zihao, WU Wenchuan, ZHANG Boming, 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.
- [16] LI Zihao, WU Wenchuan, TAI Xue, et al. A reliability-constrained expansion planning model for mesh distribution networks[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2021, 36(2): 948-960.
- [17] WANG Ziyao, ZHONG Lipeng, PAN Zhenning. Optimal double Q AC-DC hybrid distribution system planning with explicit topology-variable-based reliability assessment[J]. Applied Energy, 2022, 322: 119438.
- [18] 李岩, 陈夏, 李巍巍, 等. 基于智能软开关与联络开关并联的柔性配电网互联结构与控制技术研究[J]. 中国电机工程学报, 2022, 42(13): 4749-4759.
- LI Yan, CHEN Xia, LI Weiwei, et al. Research on interconnection structure and control technology of flexible distribution network based on soft open point in parallel with interconnection switch [J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(13): 4749-4759(in Chinese).
- [19] 孙守晶. 含智能软开关和储能系统的智能配电网分布式供电恢复方法[D]. 济南: 山东大学, 2022.
- SUN Shoujing. Distributed power restoration method for smart distribution grid with SOP and ESS [D]. Jinan: Shandong University, 2022(in Chinese).
- [20] 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(in Chinese).
- [21] YANG Xiaodong, ZHOU Zhiyan, ZHANG Youbing, et al. Resilience-oriented co-deployment of remote-controlled switches and soft open points in distribution networks[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2023, 38(2): 1350-1365.
- [22] WANG Ziyao, LIN Dan, YU Tao, et al. Explicit reliability incorporated switches planning of smart distribution system with high flexibility[J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2023, 145: 108629.
- [23] 解智刚. 基于智能软开关的柔性配电网供电恢复研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2020.
- XIE Zhigang. Research on flexible power restoration of distribution network based on soft open point [D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2020(in Chinese).
- [24] MUÑOZ-DELGADO G, CONTRERAS J, ARROYO J M. Reliability assessment for distribution optimization models: a non-simulation-based linear programming approach[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2018, 9(4): 3048-3059.
- [25] LI Peng, JI Haoran, WANG Chengshan, et al. Coordinated control method of voltage and reactive power for active distribution networks based on soft open point[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2017, 8(4): 1430-1442.
- [26] ARIF A, WANG Zhaoyu, CHEN Chen, et al. Repair and resource scheduling in unbalanced distribution systems using neighborhood search[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2020, 11(1): 673-685.
- [27] LI Zihao, WU Wenchuan, TAI Xue, et al. Optimization model-based reliability assessment for distribution networks considering detailed placement of circuit breakers and switches[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2020, 35(5): 3991-4004.



范鹏逸

在线出版日期: 2024-06-12。

收稿日期: 2024-03-08。

作者简介:

范鹏逸(2001), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为配电网可靠性电网设备规划等, 202030230437@mail.scut.edu.cn;

余涛(1973), 男, 教授、博士生导师, 主要研究方向为智能调度、智能配电网、机器学习、非线性控制、最优化理论与应用, taoyu1@scut.edu.cn;

*通信作者: 王梓耀(1996), 男, 博士研究生, 主要研究方向为智能配电网可靠性与弹性、新型配电网数字化规划、决策导向机器学习在配电网规划中的应用, ziyawang100@sina.com;

萧文聪(2000), 男, 博士研究生, 主要研究方向为深度学习在电网应急调度的应用, 202311083113@mail.scut.edu.cn。

(责任编辑 邱丽萍)