

# 考虑条件风险价值的配电网开关规划最优模型

江均, 芦杨, 杨涛, 周龙翔, 邓道强

(国网四川省电力公司泸州供电公司, 四川 泸州 646000)

**摘要:** 安装开关设备能够有效提升配电网可靠性, 减少系统停电损失成本, 但是故障发生的随机性给开关规划方案的价值带来投资风险, 为此提出了考虑条件风险价值的配电网开关规划模型。该模型可以规划开关的数量和配置点位, 使期望利润最大化并最小化投资风险, 其中: 故障的随机性利用序贯蒙特卡洛模拟法和快速前代消除技术建模; 风险利用条件风险价值表示, 通过风险偏好系数将期望利润和条件风险价值整合到同一目标函数中以考虑电网公司的风险偏好。该模型被建模成混合整数线性模型的形式, 能够利用 CPLEX 等商业求解器在有效的运行时间内求解。最后, 以 RBTS4 配电系统作为算例进行仿真分析。结果表明了在开关规划问题中考虑条件风险价值的必要性, 并分析了不同关键参数对开关规划方案的影响。

**关键词:** 配电网; 条件风险价值; 开关规划; 可靠性; 混合整数线性规划

**中图分类号:** TM 76 **文献标志码:** A **文章编号:** 1003-6954(2025)01-0077-08

**DOI:** 10.16527/j.issn.1003-6954.20250111

## Optimal Switch Planning Model of Distribution Network Considering Conditional Value at Risk

JIANG Jun, LU Yang, YANG Tao, ZHOU Longxiang, DENG Daoqiang

(State Grid Luzhou Electric Power Supply Company, Luzhou 646000, Sichuan, China)

**Abstract:** The installation of switch equipment can effectively improve the reliability of distribution network and reduce the cost of power outages. However, the random of failures will affect the value of switch planning scheme, which will bring financial risks. Therefore, an optimal switch planning model of distribution network considering conditional value at risk is proposed to deal with this risk. The model can plan the number and configuration location of switches, which can maximize the expected profit and minimize the financial risk. Among them, the random of failures is modeled by sequential Monte-Carlo simulation and fast forward reduction technology, and the risk is expressed by the conditional value at risk. The expected profit and the conditional value at risk are integrated into the same objective function through the risk index to consider the risk appetite of grid company. The model is modeled as a mixed integer linear model, which can be solved within effective runtime by using commercial solvers such as CPLEX. Finally, the RBTS4 distribution system is taken as a case for simulation analysis. The result shows the necessity of considering conditional value at risk in optimal switch planning problem, and the influence of different key parameters on switch planning scheme is analyzed.

**Key words:** distribution network; conditional value at risk; switch planning; reliability; mixed integer linear programming

## 0 引言

用户对供电可靠性的要求越来越高<sup>[1-2]</sup>, 在配电网中规划开关设备可以通过减少故障定位时间和故障隔离时间提高系统可靠性, 但同时也会带来投

基金项目: 国网四川省电力公司科技项目(521912230001)

资、安装与维护成本, 降低配电系统的经济性。因此有必要通过成本/收益分析确定开关设备的最优规划方案<sup>[3-4]</sup>。同时, 故障事件发生的随机性可能会给安装开关设备的收益带来很大的不确定性, 这种不确定性给电网公司造成了巨大的投资风险<sup>[5]</sup>, 会极大地影响开关规划方案的价值。因此有必要在开关规划问题中考虑电网公司的投资风险。

目前,国内外已经有很多学者对配电网开关规划问题进行了研究,所采用的方法大体可以分为两大类:启发式算法<sup>[6-12]</sup>和数学规划方法<sup>[13-16]</sup>。启发式算法中:文献[6]对配电网供电可靠性与馈线自动化终端配置的敏感性进行了分析,采用故障模式与后果分析法,提出了基于配电网可靠性发展目标的配电终端规划方法;文献[7]研究了考虑配电自动化的配电网可靠性评估方法,提出了一种配电自动化终端布局科学规划方法并用遗传算法进行求解;文献[8]提出了一种基于粒子群算法的辐射状配电网多目标开关优化布置方法,能够提供一组完整的解决方案;文献[9]以用户停电成本和开关投资成本之和最小为目标,利用免疫算法得到了配电网最佳开关规划方案。尽管上述文献能够利用启发式算法得到合理的开关规划数量和位置,但并不能保证全局最优解,并且在大规模系统中实施会有较大的计算负担,不利于实际应用。因此有学者利用数学规划方法,特别是混合整数线性规划模型寻找最佳解决方案,如:文献[13]提出了计及远程自动开关故障率和负荷增长率的配电系统开关优化配置策略,并将该策略描述为混合整数线性模型,保证解的最优性;文献[14]考虑了故障发生的随机性,以混合整数线性模型的方式提出了配电网自动开关规划方法;文献[15]提出了一种新的含配电自动化终端的可靠性分析方法,实现了可靠性计算与优化求解的分离,并采用商业求解器求解;文献[16]提出了主动配电网中考虑条件风险价值的智能软开关的规划方法,将模型建立为二阶锥模型以快速求解,但其目的是提高配电网的灵活性、经济性与稳定性,并未考虑在故障场景下开关的隔离、转供作用。

上述研究虽然从不同侧面研究了开关规划问题,但是并没有基于混合整数线性模型在开关规划问题中考虑故障随机性的影响以及相关的投资风险。在实际系统中,不同的开关规划设计方案会导致不同的初期投资成本和后续运维成本。开关设备发生故障是不可避免的,而故障发生的时间和严重程度存在不确定性。因此,在实际的开关规划中投资与回报存在不确定性,需要考虑风险偏好以及风险规避等因素,在满足可靠性、灵活性等前提下提高经济性。为此,提出了考虑条件风险价值(conditional value at risk, CVaR)的配电网开关规划模型。CVaR用于投资风险量化,其含义为在某一置信度下,风险

损失大于给定的风险价值(value at risk, VaR)临界值的风险平均损失值,克服了 VaR 不能满足一致性、尾部损失测量的非充分性以及不能正确识别风险和缺乏次可加性等缺点。CVaR 已经应用于电力系统风险决策以及电力市场方面<sup>[17]</sup>,但尚未被考虑在基于混合整数线性模型的配电网开关规划问题中。下面首先介绍了故障场景集的生成方法,并利用快速前代消除技术进行故障场景缩减以提高求解效率;其次,提出了考虑 CVaR 的配电网开关规划模型,以最大化期望利润并最小化投资风险;最后,以 RBTS4 配电系统作为算例进行仿真分析,表明了开关规划问题中考虑 CVaR 的必要性,并分析了不同关键参数对开关规划方案的影响。

## 1 故障场景集生成方法

配电网中有许多不确定性来源,比如故障发生时刻的随机性和故障修复时间的不确定性等,这些不确定性会严重影响开关规划方案的价值。下面采用多场景的方法应对故障不确定性,每个场景代表了不确定参数的可能状态,即故障时刻和不同设备的修复时间。虽然场景数量越多,计算结果会越准确,但计算负担也会越重。因此通常选取在准确性和计算负担间的折中方案。下面利用序贯蒙特卡洛模拟方法生成大量场景,再利用快速前代消除技术进行场景缩减,在保持开关规划方案准确性的基础上极大地减轻了计算负担。

### 1.1 故障场景生成

采用序贯蒙特卡洛模拟法生成故障场景<sup>[18]</sup>,在规划周期内,为了全面模拟所有系统元件的正常运行与故障状态,设计了以下故障场景生成流程:

1) 元件选择与故障时刻采样:从系统中随机选择一个元件作为起点,并利用标准均匀分布生成的随机数,结合该元件故障统计数据的概率密度函数,来随机确定该元件的故障发生时刻。这一步骤确保了故障时刻的采样既随机又符合实际故障概率分布。

2) 修复时间采样:一旦某元件被确定为故障状态,接下来需对其修复时间进行随机采样。同样地,采用标准均匀分布生成的随机数,并结合相应的修复时间概率密度函数,来模拟该元件从故障到恢复正常的所需时间。

3) 周期覆盖检查:重复上述元件选择与故障/

修复时间采样的过程,直至该元件在整个规划周期内的正常/故障状态变化均被充分采样并记录下来。这确保了每个元件的状态变化在规划周期内得到全面反映。

4) 元件遍历:在完成单个元件的状态采样后,继续对系统中的其他元件重复执行步骤 1 至步骤 3,直至所有元件均被遍历一遍,且各自的状态变化均被详细记录。

5) 故障场景构建:基于以上步骤生成的元件状态数据,按照时间顺序排列。首先,识别出第一个故障的元件及其修复时间;随后,在第一个元件修复完成后,继续追踪并确定下一个故障的元件及其修复情况,如此循环,直至覆盖整个规划周期。这一过程中,仅考虑单重故障情况,以反映实际生产中较为常见的故障模式。

6) 场景数量扩充:为了增强故障场景的多样性和代表性,重复执行步骤 1 至步骤 5,直至生成足够数量的不同故障场景,以供后续分析或风险评估使用。

## 1.2 故障场景缩减

在序贯蒙特卡洛模拟方法中,研究的准确性随着生成场景数量的增加而提高,但也极大地提高了模型的复杂度,因此必须使用场景缩减技术,以选择能够有效代表原始集合的场景子集。文献[19]讨论了常见的故障场景缩减方法,并验证了快速前代消除技术在场景缩减方面适用性较好、准确性较高。因此采用快速前代消除技术进行故障场景缩减,步骤如下:

1) 设置  $\Omega_D$  为原始场景集,  $\Omega_S$  为故障缩减场景,初始为空集,按照式(1)计算各场景之间的欧式距离,按照式(2)计算各场景的加权距离,并选择加权距离最小的场景将其添加到  $\Omega_S$  中,并从中  $\Omega_D$  删除。

$$v_{w,s} = \|v_w - v_s\| \quad \forall w, s \in \Omega_D \quad (1)$$

$$d_w = \sum_{s \in \Omega_D} \pi_s v_{w,s} \quad \forall w \in \Omega_D \quad (2)$$

式中:  $v_{w,s}$  为步骤 1 中场景  $w$  和场景  $s$  之间的欧式距离;  $v_w$  为场景  $w$  中系统总成本;  $v_s$  为场景  $s$  中系统总成本;  $d_w$  为场景  $w$  的加权距离;  $\pi_s$  为场景  $s$  的概率,在步骤 1 中为场景数目的倒数。

2) 当选择到  $\Omega_S$  中的场景数量未达到预先设定值时,重复执行步骤 1,直至场景数量达到预设值。

3) 将加权距离最小的场景作为舍弃场景,并将舍弃场景的概率分配给选择的场景,按照式(3)重新计算缩减后场景集中各场景的出现概率,得到缩

减后的场景子集及各场景的概率。

$$\pi'_w = \pi_w + \sum_{s \in \Omega_S} \pi_s \quad \Omega_S = \{s \in \Omega_D \mid d_w = g_s\} \quad (3)$$

式中:  $g_s$  为场景集  $\Omega_S$  中与场景  $s$  最小的加权距离;  $\pi_w$  为缩减后场景子集中  $w$  场景的出现概率;  $\pi'_w$  为修正缩减后场景子集中  $w$  场景的出现概率。

## 2 配电网开关规划模型

### 2.1 目标函数

所提出的配电网开关规划模型考虑了由于故障事件的不确定性带来的投资风险,并利用 CVaR 来量化该风险。由于电网公司通常希望以较低的风险获得较高的利润,因此该模型的目标函数是期望利润和 CVaR 的加权总和最大化,如式(4)所示。

$$\max [(1 - \beta) \times P_r + \beta \times C_{V,\alpha}] \quad (4)$$

式中:  $P_r$  为安装开关设备后的期望利润;  $C_{V,\alpha}$  为在置信度为  $\alpha$  下的 CVaR;  $\beta$  为风险偏好系数,用于平衡期望利润和 CVaR。  $\beta$  可根据电网公司的风险偏好进行设置,激进型电网公司可能会将  $\beta$  设置为 0 以获得最高的期望利润,而不考虑风险;保守型电网公司可能会将  $\beta$  设置为 1,以使投资风险最小化。

配电网期望利润的计算方法为

$$P_r = \sum_{w \in \Omega_S} \pi_w (C_{w0-R} - C_{w-R} - C_R) \quad (5)$$

式中:  $C_{w0-R}$  为故障场景  $w$  中不安装开关设备时故障停电造成的经济损失成本;  $C_{w-R}$  为故障场景  $w$  中安装开关设备时的经济损失成本;  $C_R$  为安装开关设备总成本的现值。式(5)的含义是故障场景  $w$  中的期望利润可以通过降低的经济损失成本减去安装开关设备相关成本来计算。

$C_{w0-R}$  和  $C_{w-R}$  的计算方法如式(5)、式(6)所示。

$$C_{w0-R} = \sum_{c \in C_w} \sum_{j \in J} \sum_{k \in K} L_{f,j,k} L_{\text{ossf},j,k} t_{w0,f_c,i_c,j,k} \quad \forall f = f_c \quad (6)$$

$$C_{w-R} = \sum_{c \in C_w} \sum_{j \in J} \sum_{k \in K} L_{f,j,k} L_{\text{ossf},j,k} t_{w,f_c,i_c,j,k} \quad \forall f = f_c \quad (7)$$

式中:  $C_w$  为故障场景  $w$  中的故障集合;  $J$  为负荷点集合;  $K$  为用户类型集合;  $L_{f,j,k}$  为馈线  $f$  中负荷点  $j$  处  $k$  类用户的负荷大小;  $L_{\text{ossf},j,k}$  为馈线  $f$  中负荷点  $j$  处  $k$  类用户的单位停电损失费用;  $t_{w0,f_c,i_c,j,k}$  和  $t_{w,f_c,i_c,j,k}$  分别为安装开关设备前和安装开关设备后负荷点  $j$  处  $k$  类用户因馈线  $f_c$  中  $i_c$  分段故障导致的停电时长,其

具体计算方法将在第 2.2 节详细描述。

$C_R$  的计算方法为:

$$C_R = C_{I_R} + I_{C_R} + M_{C_R} \quad (8)$$

$$C_{I_R} = \sum_{f \in F} \sum_{s \in S} X_{R,f,s} C_{I_{R,f,s}} \quad (9)$$

$$I_{C_R} = \sum_{f \in F} \sum_{s \in S} X_{R,f,s} I_{C_{R,f,s}} \quad (10)$$

$$M_{C_R} = \sum_{t \in T} \sum_{f \in F} \sum_{s \in S} \frac{1}{(1 + D_R)^{t-1}} X_{R,f,s} M_{C_{R,f,s}} \quad (11)$$

式中:  $C_{I_R}$  为开关设备总投资成本;  $F$  为配电馈线集合;  $S$  为开关安装候选位置集合;  $C_{I_{R,f,s}}$  为开关设备单位投资成本;  $X_{R,f,s}$  为二元变量, 表示是否在馈线  $f$  的候选位置  $s$  上安装开关设备;  $I_{C_R}$  为开关设备总安装成本;  $I_{C_{R,f,s}}$  为开关设备单位安装成本;  $M_{C_R}$  为开关设备总维护成本;  $D_R$  为贴现率, 反映了投资者对资金时间价值的认知和对风险的补偿要求, 在评估长期投资或项目时, 需要将未来的预期收益(或成本)折现到当前时点, 以计算其现值;  $M_{C_{R,f,s}}$  为开关设备单位维护成本。

CVaR 作为 VaR 的一种补充, 其含义为超过 VaR 部分的条件期望, 即

$$C_{V,\alpha} = \frac{1}{1 - \alpha} \int_{f(x,y) > \xi} f(x,y) \rho(y) dy = \xi + \frac{1}{1 - \alpha} \int [f(x,y) - \alpha]^+ \rho(y) dy \quad (12)$$

式中:  $x$  和  $y$  分别为决策变量和随机变量;  $f(x,y)$  为风险损失函数;  $\rho(y)$  为  $y$  的概率密度函数;  $\xi$  为置信度水平  $\alpha$  下的 VaR 值;  $[f(x,y) - \alpha]^+$  表示  $\max[f(x,y) - \alpha, 0]$ 。

在式(12)的基础上, 引入虚拟辅助变量  $\eta_w$ , 风险度量成本可以表示为

$$C_{V,\alpha} = \xi + \frac{1}{1 - \alpha} \sum_{w \in \Omega} \pi_w \eta_w \quad (13)$$

## 2.2 约束条件

### 2.2.1 负荷点停电时间计算

负荷点停电时间取决于多种因素, 比如网络拓扑、开关动作时间和故障修复时间等。以图 1 中的典型配电网结构为例说明安装开关设备对负荷点停电持续时间的影响。

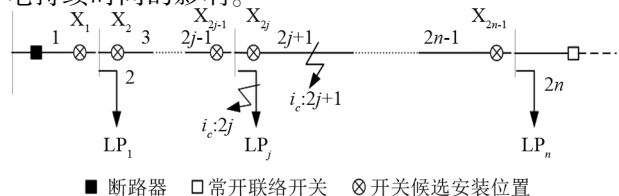


图 1 典型配电网结构

假设  $i_c$  部分出现故障。故障后, 馈线首端的断路器断开, 该馈线所有负荷点停电, 可以根据负荷点与故障间是否存在开关设备将负荷恢复供电分为 3 种方式: 1) 如果负荷点与故障区域间存在自动开关, 则负荷点停电时间不少于自动开关动作时间, 如式(14)所示; 2) 如果负荷点与故障区域间存在手动开关, 则负荷点停电时间不少于手动开关动作时间, 如式(15)、式(16)所示; 3) 如果负荷点与故障区域间不存在开关设备, 则负荷点停电时间不少于故障修复所需时间, 如式(17)一式(19)所示。通过以下公式表达了上述 3 种供电恢复方式。

$$t_{w,f_c,i_c,j,k} \geq T_{RCS}, \quad \forall w \in \Omega, c \in C_w, f=f_c, j \in J, k \in K \quad (14)$$

$$t_{w,f_c,i_c,j,k} \geq T_{MCS} \left(1 - \sum_{s=2j}^{i_c-1} X_{RCS,f,s}\right), \quad \forall w \in \Omega, c \in C_w, f=f_c, 2j < i_c, k \in K \quad (15)$$

$$t_{w,f_c,i_c,j,k} \geq T_{MCS} \left(1 - v_f \sum_{s=i_c}^{2j-1} X_{RCS,f,s}\right), \quad \forall w \in \Omega, c \in C_w, f=f_c, 2j > i_c, k \in K \quad (16)$$

$$t_{w,f_c,i_c,j,k} \geq T_{RE,f_c,i_c} \left(1 - \sum_{s=2j}^{i_c-1} X_{RCS,f,s} - \sum_{s=2j}^{i_c-1} X_{MS,f,s}\right), \quad \forall w \in \Omega, c \in C_w, f=f_c, 2j < i_c, k \in K \quad (17)$$

$$t_{w,f_c,i_c,j,k} \geq T_{RE,f_c,i_c} \left(1 - v_f \sum_{s=2j}^{i_c-1} X_{RCS,f,s} - v_f \sum_{s=2j}^{i_c-1} X_{MS,f,s}\right), \quad \forall w \in \Omega, c \in C_w, f=f_c, 2j > i_c, k \in K \quad (18)$$

$$t_{w,f_c,i_c,j,k} \geq T_{RE,f_c,i_c}, \quad \forall w \in \Omega, c \in C_w, f=f_c, 2j = i_c, k \in K \quad (19)$$

式中:  $T_{RCS}$  为自动开关的动作时间, 默认自动开关可进行远程控制;  $T_{MCS}$  为手动开关的动作时间;  $X_{MS,f,s}$  为二元变量, 表示在馈线  $f$  的候选位置  $s$  上是否安装了手动开关;  $T_{RE,f_c,i_c}$  为故障所需的修复时间;  $v_f$  为二元变量, 表示馈线  $f$  与其他馈线间是否存在联络。式(15)、式(17)对应故障上游隔离区, 故障上游隔离区是指从故障点开始, 沿电力网络向上游(即电源侧)追溯, 直到能够安全隔离故障点所需的全部设备或线路所组成的区域。隔离速度越快, 停电影响的范围就越小, 恢复供电的时间也就越短。式(16)、式(18)对应故障下游转供区, 故障下游转供区是指故障被隔离后, 受影响的下流(即负荷侧)需要通过其他供电路径恢复供电的区域, 故障下游转供区的转供能力和效率决定了停电时间的长短。式(19)对应故障区域。

### 2.2.2 开关安装约束

在同一开关候选位置中,不能同时安装自动开关与手动开关。

$$X_{RCS,f,s} + X_{MCS,f,s} \leq 1, \quad \forall f \in F, s \in S \quad (20)$$

### 2.2.3 开关预算约束

安装开关设备需要巨大的投资成本,因此其投资预算应考虑进开关规划模型中。

$$\sum_{f \in F} \sum_{s \in S} (X_{RCS,f,s} + X_{MCS,f,s}) \leq N, \quad \forall f \in F, s \in S \quad (21)$$

式中,  $N$  为电网公司能够承担的开关设备最大规模数量。

将配电网开关规划模型建模成为混合整数线性模型的形式,其优势在于能够在 CPLEX 等商用求解器中调用分支-切割算法进行求解,一方面减少了编程复杂度,仅需按照 CPLEX 等商业求解器固定格式编程即可;另一方面求解速度相比智能算法更快,能够在有效运行时间内完成求解<sup>[20]</sup>。

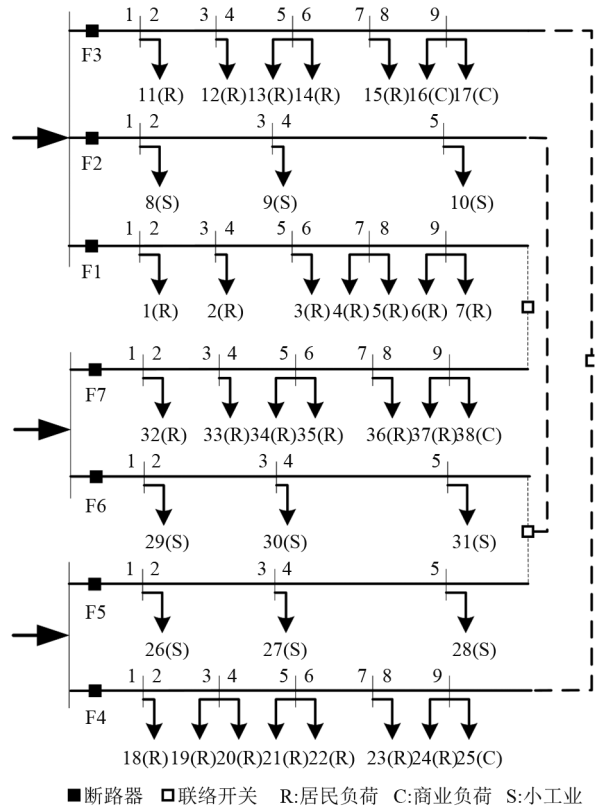


图 2 RBTS4 配电网结构

表 2 可靠性相关参数

元件	平均故障率/ (次/台(km)·a)	平均维修 时间/h	平均更换 时间/h
母线	0.001	2	8
断路器	0.002	4	10
线路	0.032	5	11
变压器	0.004	3	5

## 3 算例分析

### 3.1 算例概况

采用 RBTS4 配电网作为算例验证模型的有效性,该系统已被广泛应用于可靠性评估和开关规划问题中,其网络拓扑如图 2 所示,负荷数据如表 1 所示,元件的故障率、维修时间等参数如表 2 所示<sup>[21]</sup>。设定每个自动开关设备的投资和安装成本为 3.3 万元,年维护成本为安装成本的 2%。在 15 年的规划周期内,负荷年增长率和折现率分别为 3% 和 8%。设定 CVaR 的置信度为 0.95,利用蒙特卡洛模拟法生成 10 000 个故障场景,再通过快速前代消除技术将场景缩减为 5000 个,采用 GAMS 平台的 CPLEX 求解器进行求解。

表 1 RBTS4 配电系统负荷数据

负荷点	负荷 类型	负荷/ MW	用户 数量	单位停电 损失费用/ (元·MWh <sup>-1</sup> )
1-4, 11-13, 18-21, 32-35	居民	0.545	220	520
5, 14, 15, 22, 23, 36, 37	居民	0.500	200	520
8, 10, 26-30	小工业	1.000	1	1620
9, 31	小工业	1.500	1	1620
6, 7, 16, 17, 24, 25, 38	商业	0.415	10	1150

### 3.2 算例结果分析

设置 3 种场景进行算例结果分析,并在表 3—表 5 给出了开关规划结果。

场景 1:从激进型电网公司的角度进行开关规划研究,将风险偏好系数设置为 0,在不考虑投资风险的情况下最大化期望利润。从表 3 可以看出,系统中安装了 21 个自动开关,在馈线 1、3、4、7 中分别安装了 2 个开关为大量的商业和住宅用户供电,在馈线 2、5、6 中安装了多个自动开关为小用户供电。

表 3 场景 1 开关安装位置

馈线	位置	馈线	位置
1	5, 9	5	1, 2, 4, 5
2	1, 2, 3, 4	6	1, 2, 3, 4, 5
3	5, 9	7	5, 9
4	4, 9		

场景 2:从保守型电网公司的角度进行开关规

划研究,将风险偏好系数设为 1,使 CVaR 最大化。从表 4 可以看出,系统共安装了 10 个自动开关,以最大程度降低投资风险。在馈线 2、5、6 中安装了 2 个自动开关为小用户供电,其余 4 个自动开关在馈线 1、3、4、7 中平均分配,均安装在连接高单位停电损失成本用户的馈线末端。

表 4 场景 2 开关安装位置

馈线	位置	馈线	位置
1	9	5	2,5
2	3,4	6	2,5
3	9	7	9
4	9		

场景 3:从理智型电网公司的角度进行开关规划研究,将风险偏好系数设置为 0.5,在期望利润和投资风险之间进行权衡。从表 5 可以看出,系统中共安装了 11 个自动开关,虽然数量与场景 2 类似,但是规划位置不同,馈线 4 多安装了一个自动开关,馈线 5、6 中开关的位置也发生了改变。

表 5 场景 3 开关安装位置

馈线	位置	馈线	位置
1	9	5	3,5
2	3,4	6	3,5
3	9	7	9
4	4,9		

表 6 列出了 3 种场景下的期望利润和 CVaR。与激进型电网公司相比,保守型电网公司将投资风险降低了近 33.1%,而期望利润减少了 2.3%,可以看出激进型电网公司面临着客观的期望利润和不可避免的投资风险。而理智型电网公司的期望利润比可实现的最高期望利润低 1.8%,CVaR 也比可实现的最高 CVaR 低 1.5%,因此在场景 3 中实现了期望利润和投资风险之间的平衡。

表 6 3 种场景下规划结果

场景	开关数量	期望利润/万元	CVaR/万元
1	21	343	78
2	10	334	104
3	11	336	103

### 3.3 算例关键参数影响分析

#### 3.3.1 风险偏好系数

为研究风险偏好系数的影响,将其从 0 逐渐增大到 1,由图 3 可以看出,增大风险偏好系数会降低期望利润,同时 CVaR 随着风险偏好系数的增加而增加,说明投资风险也降低了。此外,随着风险偏好系数的增加,规划的自动开关也减少了。因此可得

出结论:偏向规避风险的电网公司较少开展开关规划项目。图 3 中还可以看出,期望利润的微小偏差可能会导致投资风险发生较大的变化,具体来说,期望利润由 341 万元到 339 万元仅降低了 1.4%,而投资风险由 103 万元到 86 万元降低了 17.8%。同时,自动开关的最优规划数量也从 17 个减少到了 11 个,从而使电网公司的投资成本降低。

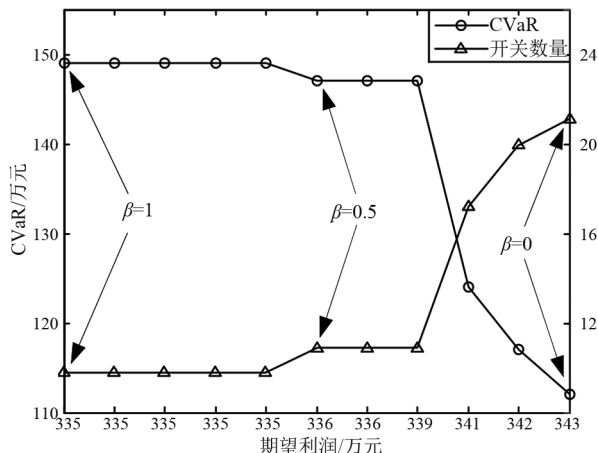


图 3 风险偏好系数对开关规划结果的影响

#### 3.3.2 置信度

置信水平在衡量 CVaR 中起到至关重要的作用,不同风险偏好的电网公司会选择不同的置信度。为分析置信度的影响,对各种置信度下的开关规划问题进行了仿真。由图 4 可知,场景 1 中,自动开关的最优规划数量保持不变,这是因为激进型电网公司在规划时不考虑投资风险的影响,因此更改置信度不会对其决策产生影响。场景 2 和场景 3 中,自动开关的最优规划数量会随着置信度增大而减少。当置信度设置为 1 时,场景 2 和场景 3 中自动开关的数量分别收敛到 8 和 10。同时可以看出,风险偏好系数的增加,自动开关最优规划数量的波动也会加大。因此,置信度的设置对开关规划问题具有较大的影响。

#### 3.3.3 单位停电损失费用

为研究单位停电损失费用对开关规划结果的影响,将单位停电损失费用线性倍增至 10 倍,结果如图 5 所示。可以看出,当单位停电损失费用增加时,开关规划数量也会增加,并且激进型电网公司比保守型电网公司更愿意安装开关。同时,随着单位停电损失费用的增加,3 种类型电网公司间规划开关的数量差别在减小。因此当用户停电敏感度较低时,在开关规划问题中考虑电网公司风险偏好系数

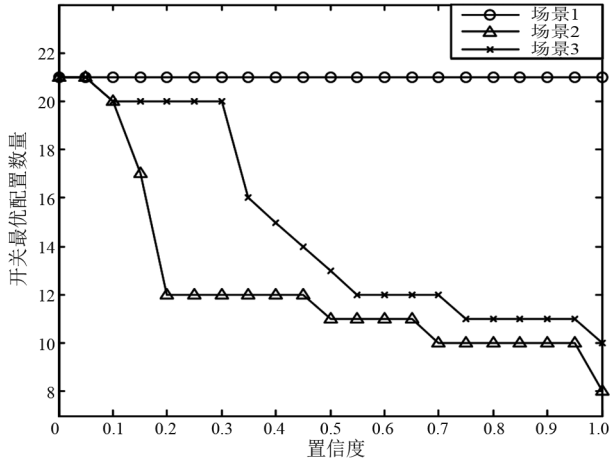


图 4 置信度对开关规划结果的影响

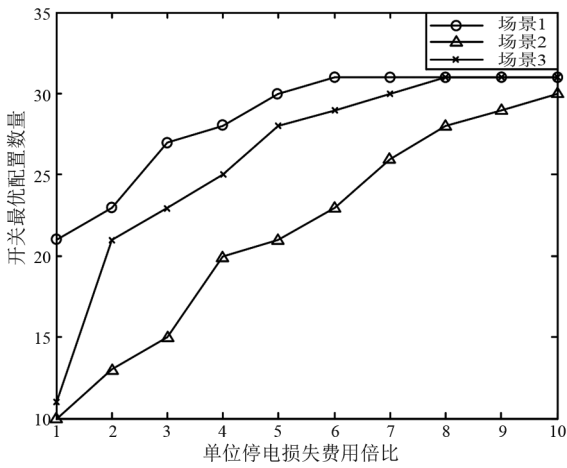


图 5 单位停电损失费用对开关规划结果的影响

更为重要。表 7 列出了不同情况下的期望利润和 CVaR。可以看出,当单位停电损失费用增加时,期望利润和 CVaR 都会增长。随着单位停电损失费用由 1 倍增长到 9 倍,3 种场景的期望利润分别增长至 11.2 倍、11.4 倍和 11.4 倍,CVaR 急剧增长至 17.5 倍、13.2 倍和 13.4 倍,说明随着单位停电损失费用增加,理智型电网公司的选择更加合适。

3.3.4 故障场景数量

为研究缩减故障场景数量对开关规划结果的准确性和运行时间的影响,将故障场景数量分别设置为 10 000、7500、5000 和 2500 对场景 1 进行仿真,结果如表 8 所示。可以看出,与最准确的期望利润相比,缩减故障场景数量会导致期望利润的误差增大。同时,当故障场景数量缩减到 2500 时,最优开关规划数量也发生了改变。但是当故障场景数量减少时,仿真时间也随之缩短,最多降低了 93%。此外,表 9 展示了不同故障场景数量下自动开关规划的位置。可以看出,只有场景数量为 2500 时,开关的数

量和位置发生了变化,馈线 6 的首端不再规划开关。因此,所提出的故障场景缩减方法是非常有效的,同时为取得结果准确性和仿真时间之间的平衡,将故障场景数量设置为 5000 个。

表 7 单位停电损失费用对期望利润和 CVaR 的影响

单位:万元

倍比	场景 1		场景 2		场景 3	
	期望利润	CVaR	期望利润	CVaR	期望利润	CVaR
1	343	78	334	104	336	103
3	1203	387	1131	403	1200	397
5	2080	711	2042	722	2075	718
7	2961	1040	2927	1046	2954	1048
9	3842	1373	3829	1377	3834	1381

表 8 故障场景数量对期望利润和求解时间的影响

场景数量	开关数量	期望利润/万元	利润误差/%	求解时间/s	时间误差/%
10 000	21	347.6	—	398	—
7500	21	347.2	0.11	199	50
5000	21	343.1	1.33	99	75
2500	20	341.4	1.76	29	92

表 9 故障场景数量对开关规划位置的影响

馈线	场景数量			
	2500	5000	7500	10 000
1	5,9	5,9	5,9	5,9
2	1,2,3,4	1,2,3,4	1,2,3,4	1,2,3,4
3	5,9	5,9	5,9	5,9
4	4,9	4,9	4,9	4,9
5	1,2,4,5	1,2,4,5	1,2,4,5	1,2,4,5
6	2,3,4,5	1,2,3,4,5	1,2,3,4,5	1,2,3,4,5
7	5,9	5,9	5,9	5,9

4 结 论

上面在开关规划问题中考虑了不确定参数所带来的投资风险,并将其建模为混合整数线性模型,以通过成熟的商业求解器求解。研究表明:

- 1) 电网公司的风险偏好会显著影响开关的规划数量与位置,所提出的模型能够很好地根据其风险偏好平衡期望利润和投资风险;
- 2) 合理设置风险偏好系数和置信度能够显著降低投资风险而不会对期望利润产生很大影响;
- 3) 所提出的故障场景缩减方法具有较高的准确性,能够兼顾规划结果的精确性和仿真时长。

## 参考文献

- [1] 蒋玮,王铭华,陈锦铭,等.基于 Neo4j 图数据库的配电网供电可靠性计算[J].电力系统自动化,2022,46(15):104-111.
- [2] 郑博文,杨隽,杨承辰,等.基于风险性指标的主动配电网理论可靠性评估[J].供用电,2019,36(85):53-58.
- [3] 张伯明,陈寿孙,严正,等.高等电力网络分析[M].北京:清华大学出版社,2007.
- [4] 李子韵,成乐祥,王自桢,等.考配电自动化终端布局规划方法[J].电网技术,2016,40(4):1271-1276.
- [5] LZADI M, SATDARTAN A. A MIP model for risk constrained switch placement in distribution networks[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2019, 10(4): 4543-4553.
- [6] 张笑弟,高强,潘弘.面向态势全感知的高弹性配电网一二次协同规划问题研究[J].供用电,2022,39(3):3-8.
- [7] 郑玲玲,王铮,杨丽徙.不同网络结构及可靠性要求环境下 FTU 的最优配置[J].电力系统保护与控制,2015,43(24):69-74.
- [8] BEZERRA J R, BARROSO G C, LEO R P S, et al. Multi-objective optimization algorithm for switch placement in radial power distribution networks[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2015, 30(2): 545-552.
- [9] CHEN C S, LIN C H, CHUANG H J, et al. Optimal placement of line switches for distribution automation systems using Immune algorithm[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2006, 21(3): 1209-1217.
- [10] 于腾凯,李晓军.基于 LCC 和改进 BDE 法的配电网开关优化配置[J].电测与仪表,2015,52(13):96-100.
- [11] HEIDARI A, AGELIDIS V G, KIA M. Considerations of sectionalizing switches in distribution networks with distributed generation[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2015, 30(3): 1401-1409.
- [12] 袁月,王守相,蒋菱,等.适应自愈要求的配电网开关优化配置[J].中国电力,2016,49(3):76-82.
- [13] 孙磊,杨贺钧,丁明.配电系统开关优化配置的混合整数线性规划模型[J].电力系统自动化,2018,42(16):87-95.
- [14] LZADI M, SAFDARIAN A. Financial risk evaluation of RCS deployment in distribution systems[J]. IEEE Systems Journal, 2019, 13(1): 692-701.
- [15] ABIRL-JAHROMI A, FOTUHI-FIRUZABAD M, PARVANLA M, et al. Optimized sectionalizing switch placement strategy in distribution systems[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2012, 27(1): 362-370.
- [16] 王杰,王维庆,王海云,等.主动配电网中考虑条件风险价值的智能软开关的规划方法[J].电力系统保护与控制,2022,50(2):1-11.
- [17] 郑益,朱俊澎,袁越,等.基于条件风险价值的风柴储孤岛微网经济风险评估[J].电力自动化设备,2019,39(11):57-63.
- [18] 孙昊.考虑差异可靠性与故障后负荷响应的主动配电网供电能力评估[D].天津:天津大学,2018.
- [19] GROWE-KUSKA N, HEITSCH H, ROMISCH W. Scenario reduction and scenario tree construction for power management problems[C]//2003 IEEE Bologna Power Technology Conference Proceedings, June 23-26, 2003, Bologna, Italy. IEEE, 2003: 1-7.
- [20] 张成昊.考虑微能源网支撑作用的配电网韧性评估方法和提升策略研究[D].天津:天津大学,2019.
- [21] ALLAL R N, BILLINTON R, SJARIEF I, et al. A reliability test system for educational purposes-basic distribution system data and results[J]. IEEE Transactions on Power System, 1991, 6(2): 813-820.

## 作者简介:

江均(1981),男,硕士,高级工程师、高级经济师,研究方向为电网规划建设与项目管理等。

(收稿日期:2024-03-26)

(上接第 40 页)

- [21] RADFORD A, KIM J W, HALLACY C, et al. Learning transferable visual models from natural language supervision[EB/OL]. [2024-03-14]. <https://arxiv.org/pdf/2103.00020>.
- [22] XIA Z F, PAN X R, SONG S J, et al. Vision transformer with deformable attention[C]//2022 IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR), June 18-24, 2022, New Orleans, LA, USA. IEEE, 2022:4784-4793.

## 作者简介:

王译莹(2000),女,硕士研究生,从事输变电缺陷检测、

人工智能技术研究;

向思屿(1992),女,硕士,工程师,从事人工智能技术研究;

梁晖辉(1982),男,博士,高级工程师,从事电力信息安全;

邝俊威(1995),男,硕士,工程师,从事人工智能技术研究;

张菊玲(1990),女,高级工程师,从事网络安全技术研究;

刘松嘉(1996),男,硕士,助理工程师,从事电力人工智能、网络安全与数据管理研究。

(收稿日期:2024-04-28)