

DOI: 10.7667/PSPC180237

## 考虑安全域的配电网重构二阶锥双层规划模型

江 钧<sup>1</sup>, 成乐祥<sup>2</sup>, 孙国强<sup>1</sup>, 赫卫国<sup>3</sup>, 王春宁<sup>2</sup>, 许洪华<sup>2</sup>, 卫志农<sup>1</sup>, 臧海祥<sup>1</sup>

(1. 河海大学能源与电气学院, 江苏 南京 211100; 2. 国网江苏省电力有限公司南京供电分公司, 江苏 南京 210008; 3. 中国电力科学研究院有限公司, 江苏 南京 210003)

**摘要:** 随着配电网建设的逐步推进, 配电网用户对供电可靠性要求越来越高, 因此配电网在保证自身经济运行的同时, 也必须提高对安全性能的保障。在经济性配电网重构二阶锥模型的基础上, 加入对配电网安全性的优化, 建立了考虑安全性和经济性的配电网双层规划模型。该模型上层目标为平均安全距离最大化, 下层目标为有功网损最小化。针对该模型采用分层求解的方法将双层模型解耦, 求解得到网损和安全距离最优的重构策略。算例选取扩展的 IEEE RBTS Bus4 系统, 验证了该模型能有效降低配电网网损, 并提高配电网安全性。

**关键词:** 配电网重构; 二阶锥规划; 双层优化; 有功损耗; 安全距离

### Distribution network reconfiguration based on second order cone bi-level programming considering security distance

JIANG Jun<sup>1</sup>, CHENG Lexiang<sup>2</sup>, SUN Guoqiang<sup>1</sup>, HE Weiguo<sup>3</sup>, WANG Chunling<sup>2</sup>, XU Honghua<sup>2</sup>, WEI Zhinong<sup>1</sup>, ZANG Haixiang<sup>1</sup>

(1. College of Energy and Electrical Engineering, Hohai University, Nanjing 211100, China; 2. Nanjing Power Supply Branch, State Grid Jiangsu Electric Power Co., Ltd, Nanjing 210008, China; 3. China Electric Power Research Institute CO. LTD, Nanjing 210003, China)

**Abstract:** With the gradual progress of distribution network reconfiguration, the demand of distribution network customer for power supply reliability is increasing. Therefore, the security performance of distribution network must be enhanced while ensuring its own economic operation. Based on the second order cone programming model and aiming at optimizing the economic performance of distribution network, a bi-level programming model is established by adding the optimization of distribution network security. The objective of upper level is to maximize the average security distance while the lower level is to minimize the active power loss. In order to solve this model, the bi-level model is decoupled by stratified solution. And then, the optimal reconfiguration strategy for guaranteeing power loss and security distance is gained. Simulation results based on the extending IEEE RBTS Bus4 system demonstrate the effectiveness of this model in reducing the power loss and improving the security of distribution network.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 51507052).

**Key words:** distribution network reconfiguration; second order cone programming; bi-level optimization; active power loss; security distance

## 0 引言

配电网重构是提高配电系统运行经济性的重要手段<sup>[1-2]</sup>。然而, 传统的配电网重构常以运行经济性为首要目标, 忽略了安全性在配电网运行中的重

要作用。随着配电网的不断发展和分布式新能源日益增多<sup>[3-5]</sup>, 配电网重构策略如何兼顾经济性与安全性, 实现配电网绿色高效、安全可靠运行具有重要的研究价值<sup>[6-8]</sup>。

目前配电网重构方法主要分为启发式方法、随机优化方法和解析法三类。文献[9]建立了以电压质量和网损为目标的配电网重构模型, 采用启发式方法和元启发式方法进行求解, 算法计算效率高。文

基金项目: 国家自然科学基金项目资助(51507052); 国网江苏省电力公司重点科技项目资助(5210101700ML)

献[10]提出了以开关动作频率为目标的配电网重构模型,采用离散粒子群算法进行求解,提升了算法的搜索能力。文献[11]提出了以分布式电源接纳能力为目标的配电网重构模型,采用遗传算法进行优化,但是算法迭代次数多,计算量大。文献[12]建立了配电网重构网损优化模型,并使用并行遗传算法进行求解。通过引入迁移算子,使遗传算法具有并行计算能力,提高了求解效率。基于启发式方法和随机优化方法的配电网重构模型,无法保证结果的全局最优,容易出现陷入局部最优的情况。配电网重构模型本质上是大规模混合整数非线性规划模型,目前在理论上没有成熟的求解算法来处理该类问题。因此,需要将混合整数非线性模型转化为可有效求解的模型,二阶锥理论为处理该问题提供了新的解决思路。文献[13-14]提出了配电网重构的混合整数二阶锥模型,利用松弛方法将混合整数非线性模型转化为混合整数二阶锥模型。相较于启发式方法和随机优化方法,基于二阶锥的配电网重构模型物理意义的描述更明确,模型求解更加高效,可以得到不依赖于系统初始状态的解,并且在一定的相对最优值间隙下,能够保证解的全局最优性。

文献[15]在考虑分布式电源接入和负荷不确定性的情况下,建立了以网损为目标的混合整数二阶段鲁棒优化模型。文献[16]在考虑风电随机性的情况下,建立了以经济性为目标的配电网重构模型。文献[17]综合考虑了有功损耗、节点最小电压值和负荷均衡度三个评估指标,利用多目标扰动生物地理学算法对配电网重构模型进行求解。

然而,上述模型均未考虑配电网的安全性。事实上,忽略安全性将导致多种问题,如在馈线或变压器  $N-1$  故障时,安全裕度不足将导致长时间、大规模停电。基于此,文献[18]在原有主变互联的基础上,考虑了馈线互联,提出了配电网安全域模型以及安全边界的解析算法。文献[19]对安全距离进行了定义,并且对安全距离的存在性进行了证明。文献[20]将安全距离引入到配电网重构模型中,在网损优化的基础上进一步对配电网的安全距离加以约束,得到一定安全裕度下的最优网损,但是该模型主问题为传统配电网重构模型,安全距离仅作为约束条件参与计算,因此安全距离方面仍然存在一定的优化空间。

针对上述配电网重构模型安全性考虑不足的问题,本文首先提出了以网损最小和安全距离最大为目标的配电网重构二阶锥双层规划模型。然后,采用分层求解的方法将双层模型解耦,先优化下层目标,再将附加较小量后的下层目标最优值作为上层

优化的一个约束条件,进而对上层优化模型进行求解。最后,通过 IEEE RBTS Bus 4 算例验证了本文模型的有效性。

## 1 传统配电网重构模型

配电网重构是在保证配电网辐射状的情况下,通过开关的开闭操作,改变网络拓扑结构,从而使配电网中一个或多个评价指标达到最优的一种策略<sup>[21-24]</sup>。传统配电网重构问题模型如下。

### 1.1 目标函数

重构模型以网损为目标,网损可以通过节点注入功率和表示,目标函数为

$$\min \sum_{i=0}^n P_i \quad (1)$$

式中:  $n$  为配电网节点数;  $P_i$  为节点  $i$  的有功注入功率。

### 1.2 约束条件

#### 1) 有功注入约束

$$P_i = \sum_{j \in N(i)} \alpha_{ij} [g_{ij} V_i^2 - V_i V_j (g_{ij} \cos \theta_{ij} + b_{ij} \sin \theta_{ij})] = \quad (2)$$

$$P_{DG_i} - P_{D_i}, \quad i=1, \dots, n$$

式中:  $\alpha_{ij}$  为支路  $ij$  的开关变量;  $\theta_{ij}$  为节点  $i$  和  $j$  的电压相角差;  $g_{ij}$  为支路  $ij$  的电导;  $b_{ij}$  为支路  $ij$  的电纳;  $V_i$  为节点  $i$  的电压幅值;  $P_{DG_i}$  为节点  $i$  接入的分布式电源的有功出力;  $P_{D_i}$  为节点  $i$  所接负荷的有功功率值; 节点  $i$  的有功注入功率可以表示为节点  $i$  的分布式电源有功功率和负荷有功功率的差值。

#### 2) 无功注入约束

$$Q_i = \sum_{j \in N(i)} \alpha_{ij} [-b_{ij} V_i^2 + V_i V_j (b_{ij} \cos \theta_{ij} - g_{ij} \sin \theta_{ij})] = \quad (3)$$

$$Q_{DG_i} - Q_{D_i}, \quad i=1, \dots, n$$

式中:  $Q_{DG_i}$  为节点  $i$  接入的分布式电源的无功出力;  $Q_{D_i}$  为节点  $i$  所接负荷的无功功率值; 节点  $i$  的无功注入功率可以表示为节点  $i$  的分布式电源无功功率和负荷无功功率的差值。

#### 3) 拓扑辐射约束

$$\beta_{ij} + \beta_{ji} = \alpha_l \quad (4)$$

$$\sum_{j \in N(i)} \beta_{ij} = 1 \quad (5)$$

$$\beta_{ij} = 0 \quad j \in N(k) \quad (6)$$

$$\beta_{ij} \in \{0, 1\} \quad (7)$$

$$0 \leq \alpha_l \leq 1 \quad (8)$$

$$\sum_{l=1}^m \alpha_l = n \quad (9)$$

式中:  $\beta_{ij}$  为每条支路的二维二进制变量, 如果  $\beta_{ij} = 0$ , 则表示节点  $j$  不是节点  $i$  的父节点, 如果  $\beta_{ij} = 1$ , 则表示节点  $j$  是节点  $i$  的父节点;  $\alpha_l$  为支路连通变量,  $\alpha_l = 0$  表示支路  $l$  的开关断开,  $\alpha_l = 1$  表示支路  $l$  的开关闭合;  $N(i)$  表示所有和节点  $i$  相连的节点集合;  $k$  为变电站节点,  $N(k)$  表示所有和节点  $k$  相连的节点集合;  $m$  为配电网支路数。式(6)表示变电站节点没有父节点, 也就是变电站节点为辐射结构的起点。式(7)表示  $\beta_{ij}$  是一个二进制变量, 式(8)表示  $\alpha_l$  可以看作是一个连续变量。

#### 4) 电压幅值约束

$$V_{i\min} \leq V_i \leq V_{i\max} \quad (10)$$

式中,  $V_{i\min}$  和  $V_{i\max}$  分别为节点  $i$  电压允许的最小值和最大值。

#### 5) 线路最大载流量约束

$$|I_l| \leq I_{l\max} \quad (11)$$

式中:  $I_l$  为支路  $l$  的电流;  $I_{l\max}$  为支路  $l$  的最大允许载流量。

## 2 基于安全距离的配电网重构二阶锥双层规划模型

### 2.1 二阶锥重建模型

上述传统配电网重构模型为混合整数非线性规划模型<sup>[25-26]</sup>, 这一大规模非线性问题极难求解, 而二阶锥规划模型的求解已较为成熟, 因此可以将混合整数非线性规划模型转化为混合整数二阶锥规划模型进行求解。由数学模型可知, 模型中的非线性项为潮流约束, 所以为了将模型转化为二阶锥形式, 首先定义几个新的变量。然后用其代替传统重构模型中的非线性二次项, 从而使得非线性约束转化为线性形式, 并含有一个二阶锥约束项。新变量定义如下:

$$u_i = V_i^2 / \sqrt{2} \quad (12)$$

$$R_{ij} = V_i V_j \cos(\theta_i - \theta_j) \quad (13)$$

$$T_{ij} = V_i V_j \sin(\theta_i - \theta_j) \quad (14)$$

将新定义的变量  $u_i$ 、 $R_{ij}$ 、 $T_{ij}$  代入到有功、无功注入方程中, 得到新的表达式:

$$P_{li} = \sum_{j \in N(i)} P_{ij} = P_{DGi} - P_{Di}, \quad i = 1, \dots, n \quad (15)$$

$$Q_{li} = \sum_{j \in N(i)} Q_{ij} = Q_{DGi} - Q_{Di}, \quad i = 1, \dots, n \quad (16)$$

$$P_{ij} = \sqrt{2} g_{ij} u_i - g_{ij} R_{ij} - b_{ij} T_{ij} \quad (17)$$

$$Q_{ij} = -\sqrt{2} b_{ij} u_i + b_{ij} R_{ij} - g_{ij} T_{ij} \quad (18)$$

$$2u_i u_j \geq R_{ij}^2 + T_{ij}^2, R_{ij} \geq 0 \quad (19)$$

接着, 为每条支路定义开关变量  $u_i'$ 、 $u_j'$ ,  $i$  和  $j$  为支路  $l$  的首末节点。当支路断开时, 开关变量的设置为 0, 并且相应地式(17)、式(18)的值也为 0, 这样就可以自动去除潮流方程中断开支路的支路功率项, 使得潮流约束中只包含支路开关为闭合状态的支路。

$$0 \leq u_i' \leq \frac{V_{i\max}^2}{\sqrt{2}} \alpha_l \quad (20)$$

$$0 \leq u_j' \leq \frac{V_{j\max}^2}{\sqrt{2}} \alpha_l \quad (21)$$

$$0 \leq u_i - u_i' \leq \frac{V_{i\max}^2}{\sqrt{2}} (1 - \alpha_l) \quad (22)$$

$$0 \leq u_j - u_j' \leq \frac{V_{j\max}^2}{\sqrt{2}} (1 - \alpha_l) \quad (23)$$

由于新变量的定义, 式(17)一式(19)变为以下形式:

$$P_{ij} = \sqrt{2} g_{ij} u_i' - g_{ij} R_{ij} - b_{ij} T_{ij} \quad (24)$$

$$Q_{ij} = -\sqrt{2} b_{ij} u_i' + b_{ij} R_{ij} - g_{ij} T_{ij} \quad (25)$$

$$2u_i' u_j' \geq R_{ij}^2 + T_{ij}^2, R_{ij} \geq 0 \quad (26)$$

当支路  $l$  断开时 ( $\alpha_l = 0$ ), 首先由式(20)、式(21)可以得到  $u_i'$  和  $u_j'$  为 0, 再将  $u_i'$ 、 $u_j'$  代入式(26)可以得到  $R_{ij}$  和  $T_{ij}$  为 0, 然后将  $R_{ij}$ 、 $T_{ij}$  和  $u_i'$  代入式(24)、式(25)又可以推得  $P_{ij}$  和  $Q_{ij}$  为 0, 从而有效地从模型上反映了支路  $l$  的断开。

电压约束修改为

$$\frac{V_{i\min}^2}{\sqrt{2}} \leq u_i \leq \frac{V_{i\max}^2}{\sqrt{2}} \quad (27)$$

### 2.2 安全距离的定义

配电网安全分析是配电网稳定运行的基础, 传统配电网安全分析主要采用  $N-1$  逐点仿真法<sup>[18]</sup>, 该方法计算量非常大。为了克服这一缺点, 文献[20]对配电网安全距离指标进行了定义, 指标包括: 单条馈线安全距离、平均安全距离和最小安全距离。

1) 单条馈线安全距离  $SD_i$ 。当其他馈线的负荷保持不变时, 第  $i$  条馈线在系统  $N-1$  安全的前提下能增加的最大功率。

$$SD_i = \min \{ S_{F,\max}^{bi} - S_F^{bi}, S_{T,\max}^{bi} - \sum_{j \in \phi^{(bi)}} S_F^j - \sum_{k \neq i, k \in \Theta^{(i)}} S_f^k \} - S_f^i \quad (28)$$

式中:  $SD_i$  表示第  $i$  条馈线的安全距离;  $b_i$  代表备用

电源(馈线) $S_f^i$ 的编号; $S_{F,\max}^{b_i}$ 为 $b_i$ 馈线的容量; $S_F^{b_i}$ 为 $b_i$ 馈线正常运行负荷; $S_{T,\max}^{b_i}$ 为 $b_i$ 馈线所在的变压器容量; $\phi^{(b_i)}$ 为该变压器下全部馈线的集合; $\Theta^{(i)}$ 为一个馈线集合,这些馈线和 $S_f^i$ 在同一变压器下,并且发生故障后和 $S_f^i$ 转移到同一个变压器。

2) 平均安全距离 ASD,所有馈线安全距离的平均值。

$$ASD = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N SD_i \quad (29)$$

式中:ASD表示配电网所有馈线的平均安全距离; $SD_i$ 为第 $i$ 条馈线的安全距离; $N$ 为配电网馈线数。

3) 最小安全距离 MSD,所有馈线安全距离的最小值。

$$MSD = \min\{SD_1, SD_2, \dots, SD_N\} \quad (30)$$

安全距离将安全域的概念具体化,使得配电网的安全性可以更加清晰、方便地用指标描述。综合考虑上述安全距离指标,单条馈线安全距离仅代表具体某一条线路的安全裕度,最小安全距离仅代表电网中安全水平最差的线路,而平均安全距离可以反映出电网所有线路的平均安全水平,因此平均安全距离能够更好地体现配电网整体的安全性,本文将平均安全距离作为优化目标之一。

### 2.3 双层规划模型及求解方法

配电网网损是配电网经济运行的重要指标,大多数配电网重构都将有功网损最小<sup>[27]</sup>作为其重构的目标。为了在考虑配电网经济性的同时,兼顾配电网的安全性,本文选取有功网损和平均安全距离作为优化目标。传统的多目标处理方法采用加权形式将多目标转化为单目标进行求解,但是权系数的选取通常凭借经验,不能准确地描述多目标之间的关系。因此本文构建上层以最大化平均安全距离为目标,下层以最小化有功网损为目标的双层规划模型<sup>[28]</sup>,更加准确地描述两个目标之间的关系。一般双层优化中,下层通过向上层反映其最优值来指导上层模型的决策,从而在可能的范围内求得整体的最优解。本文在考虑有功网损为主要优化目标的情况下,将有功网损优化置于模型的下层,同时将安全距离优化置于模型的上层,用于统筹下层的最优值做出整体最优的决策。该双层规划模型的一般形式可以表述为

$$\max \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N SD_i \quad (31)$$

$$\text{subject to } A_1 x = a_1; A_2 x \leq a_2 \quad (32)$$

$$\min \sum_{i=0}^n P_i \quad (33)$$

$$\text{subject to } A_3 x = a_3; A_4 x \leq a_4 \quad (34)$$

双层模型上下层模型之间存在耦合关系<sup>[29]</sup>,一般的求解方法是通过下层模型的 KKT 条件,将下层模型进行处理,使双层模型转化为单层进行求解,但是容易使得问题难以求解。因此,本文采用文献[30]中分层求解的方法将双层规划模型解耦,首先优化下层目标,得到下层优化的最优值 $P_{\text{Loss}}^*$ ,然后在最优值的基础上附加一个较小的量 $\varepsilon$ ,并且作为上层优化的一个约束条件:

$$P_{\text{Loss}} \leq P_{\text{Loss}}^* + \varepsilon \quad (35)$$

从而,上层模型在原有约束的基础上,增加来自下层的网损约束,使得上层的网损值在一定范围内变动。上层优化模型可以表示为以下形式:

$$\max \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N SD_i \quad (36)$$

$$\text{subject to } A_1 x = a_1; A_2 x \leq a_2 \quad (37)$$

$$P_{\text{Loss}} \leq P_{\text{Loss}}^* + \varepsilon \quad (38)$$

由于附加了一个较小的量 $\varepsilon$ ,使得网损在近似等于下层网损最优值 $P_{\text{Loss}}^*$ 的情况下,网络拓扑会存在多解的情况,即同一网损最优值的情况下,可能存在多种网络拓扑结构与之对应。最后,对上层优化模型进行求解,得到安全距离最优的重构策略,并且可以保持网损较最优值变化不大。

## 3 算例分析

本文采用文献[20]中的扩展 IEEE RBTS Bus4 算例,算例系统结构图如图 1 所示。该配电系统包含 6 台主变,109 个节点、20 条馈线和 114 条支路。基准功率取 10 MVA,基准电压为 12.66 kV,系统总有功负荷和无功负荷分别为 37 208 kW 和 18 014 kvar。初始条件下,支路 10、23、37、46、58、65、76、89、104、110 断开,网损为 184.46 kW。使用 GAMS24.4.6 编写程序,采用 CPLEX 求解器对模型进行求解。

### 3.1 优化结果分析

双层优化的重构结果如表 1 所示,首先经过下层的网损优化后,网损由初始状态下的 184.46 kW 降低到 119.02 kW,说明二阶锥重构模型能够有效地降低配电网的网损,使配电网经济性有很大提升。通过本文方法求解得到的结果可以看出,网损由下层优化后的 119.02 kW 增加到 129.16 kW,平均安全距离在原有基础上从 1 785.22 kVA 提升到 2 162.94 kVA,可见平均安全距离有了很大程度的提高,实现了安全性与经济性的协调。

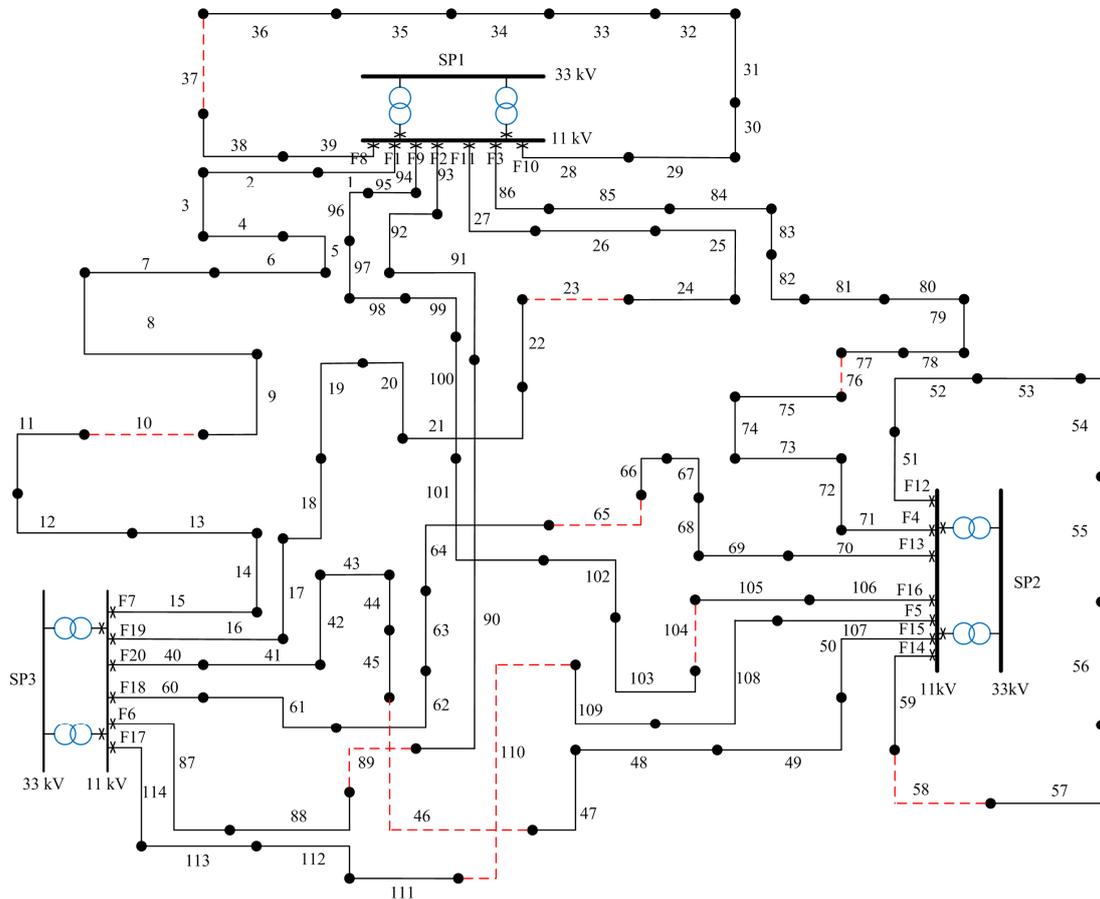


图 1 扩展 IEEE RBTS Bus4 系统

Fig. 1 Extending IEEE RBTS Bus4 system

表 1 双层优化的重构结果

Table 1 Reconfiguration results of bilevel optimization

目标	断开支路	网损/kW	平均安全距离/kVA
初始状态	10,23,37,46,58,65, 76,89,104,110	184.46	1 743.00
有功网损	7,22,34,45,55,65, 78,90,100,110	119.02	1 785.22
本文方法	9,20,35,45,56,64, 78,90,98,111	129.16	2 162.94

为了进一步验证本文方法在提升配电网安全性方面的有效性,对配电网优化前后各条馈线的安全距离进行了比较。由图 2 可以看出,配电网初始状态下,各条馈线的安全距离均较低,而且馈线 10 的馈线安全距离为负值,也就意味着这条馈线不满足馈线  $N-1$  的安全要求,存在较大安全隐患。经过本文模型优化后,各条馈线的安全距离较重构前总体得到了提升,馈线 10 的安全距离由原来的  $-1 988.4 \text{ kVA}$  提升到  $1 086.1 \text{ kVA}$ ,配电网所有馈线的安全距离均为正值,并且具有较大的安全裕度。说明本文所提方法在保证系统运行经济性的同时,

不仅可有效提升配电网整体的安全距离,并能有效防止个别馈线出现不满足安全准则的情况。

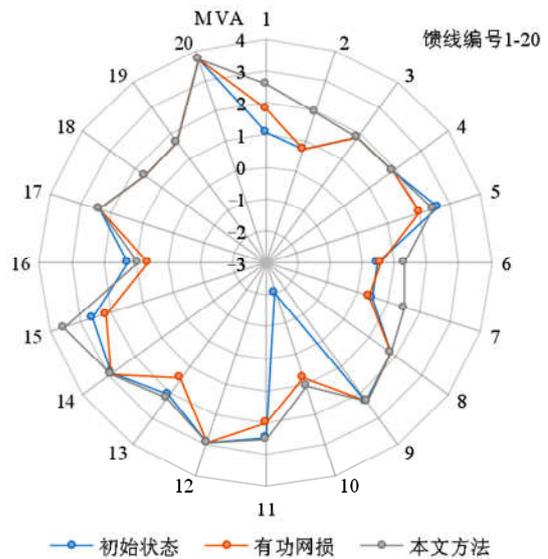


图 2 馈线安全距离

Fig. 2 Feeder security distance

基于图 2 中有功网损和本文方法的比较, 可以明显看出有功网损的一部分馈线安全距离要小于本文方法, 并且本文方法得到的安全距离整体优于传统有功网损模型。因为传统有功网损模型仅对网损单目标进行优化, 忽略了系统的安全性, 使得某些馈线的安全距离会出现较小甚至负值的情况。在相邻馈线出现故障时, 所能提供的负荷转移容量将严重不足, 无法有效缩小停电范围。以馈线 2 为例: 有功网损和本文方法的优化结果分别为 0.748 MVA 和 1.939 MVA, 也就意味着当馈线 2 的相邻馈线发生故障时, 本文方法可以多减少 1.191 MVA 容量的停电负荷, 因此尽可能地提升配电网整体的安全距离对配电网的安全稳定运行具有重要意义。

图 3 为节点电压优化结果, 由图可知, 配电网重构前, 算例的节点电压最小值出现在节点 37, 电压标幺值为 0.977 4。经过网损优化后, 配电网的节点电压最小值出现在节点 78, 电压标幺值为 0.988 7。经过平均安全距离优化后, 配电网的节点电压最小值出现在节点 35, 电压标幺值为 0.987 9, 与网损优化后的值接近。说明本文方法能够改善电压质量, 使电压质量保持在较好水平。

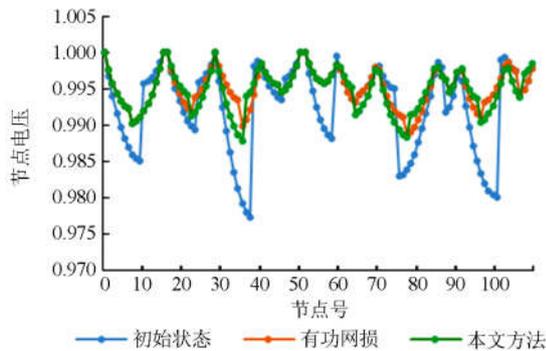


图 3 算例节点电压

Fig. 3 Result of node voltage on test system

### 3.2 安全距离目标对结果的影响

文献[20]中提出的重构方法主要凭经验选取安全距离约束下限值(本文算例中设置为  $SD_{\min} = 0.9 \text{ MVA}$ ), 而本文方法可以通过双层优化模型使网损和安全距离两个目标达到均衡最优。所以, 为了体现本文方法在安全距离提升方面具有优势, 选取文献中安全性要求最高的策略 4 与本文所提方法进行对比。优化结果如表 2 所示, 在网损近似相同的情况下, 本文方法得到的平均安全距离为 2 162.94 kVA, 文献[20]中的方法得到的平均安全距离为 2 040.12 kVA。可以看出本文所提方法能够尽可能地提升配电网的平均安全距离。

表 2 与文献[20]中策略 4 重构结果对比

Table 2 Comparison with the reconfiguration result of strategy 4 in ref. [20]

目标	断开支路	网损/ kW	平均安全 距离/kVA
本文方法	9,20,35,45,56,64,78, 90,98,111	129.16	2 162.94
文献[20]方法	7,22,35,45,55,64,78, 91,100,111	126.38	2 040.12

### 3.3 $\epsilon$ 值选取讨论

$\epsilon$  值的选取对平均安全距离优化结果的影响如图 4 所示, 定义  $\epsilon$  值每增长 1% 平均安全距离提升的大小为平均安全距离增长率, 并用其选取  $\epsilon$  值。可以看出  $\epsilon$  值从 5%~10% 的过程中, 平均安全距离增长幅度最大, 增长率为 54.52。并且 10% 的网损变化在可接受范围内, 所以综合考虑选取  $\epsilon$  值为 10%。

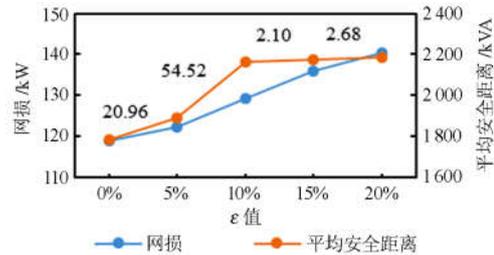


图 4  $\epsilon$  值对平均安全距离的影响

Fig. 4 Effect of  $\epsilon$  value on average security distance

## 4 结论

本文提出了基于安全距离的配电网重构二阶锥双层规划模型, 该模型将配电网安全性加入到配电网重构模型中, 对配电网安全距离和网损两个重要指标进行了优化。算例测试结果表明:

1) 本文提出的双层重构模型能够在优化配电网经济性的基础上, 对配电网安全性进行有效地优化, 显著提升平均安全距离, 改善配电网运行状态。

2) 相比于文献[20]中的方法, 在网损接近的情况下, 本文方法可以获得更大的平均安全距离, 使配电网的安全性得到保障。

### 参考文献

[1] 毕鹏翔, 刘健, 刘春新, 等. 配电网重构的改进遗传算法[J]. 电力系统自动化, 2002, 26(2): 57-61.  
BI Pengxiang, LIU Jian, LIU Chunxin, et al. A refined genetic algorithm for power distribution network reconfiguration[J]. Automation of Electric Power Systems, 2002, 26(2): 57-61.

[2] 许喆, 潘金生, 樊淑娴, 等. 基于改进萤火虫算法的含 DG 配电网重构方法[J]. 电力系统保护与控制, 2018,

- 46(14): 26-32.  
XU Zhe, PAN Jinsheng, FAN Shuxian, et al. A distribution network reconfiguration method with distributed generation based on improved firefly algorithm[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(14): 26-32.
- [3] IQBAL F, SIDDIQUI A S. Optimal configuration analysis for a campus microgrid—a case study[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2017, 2(2): 245-256. DOI: 10.1186/s41601-017-0055-z.
- [4] 刘禹. 考虑最大供电能力的有源配电网架规划研究[J]. 智慧电力, 2018, 46(6): 88-94.  
LIU Yu. Study on active distribution network planning considering maximum power supply capability[J]. Smart Power, 2018, 46(6): 88-94.
- [5] 张光亚, 赵莉莉, 边小军, 等. 考虑供需互动和分布式电源运行特性的主动配电网网架规划[J]. 智慧电力, 2018, 46(6): 81-87.  
ZHANG Guangya, ZHAO Lili, BIAN Xiaojun, et al. Framework planning of active distribution network considering supply and demand interaction & DG operation characteristics[J]. Smart Power, 2018, 46(6): 81-87.
- [6] 肖轩怡, 汪泓, 陈春, 等. 基于自适应负荷调整网络矩阵的配电网重构[J]. 电工技术学报, 2018, 33(10): 2217-2226.  
XIAO Xuanyi, WANG Feng, CHEN Chun, et al. A network reconfiguration method based on adaptive load regulation matrix[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2018, 33(10): 2217-2226.
- [7] 迟吉运, 韦钢, 李功新, 等. 复杂有源配电网供电路径快速优化[J]. 电工技术学报, 2017, 32(13): 219-228.  
CHI Jiyun, WEI Gang, LI Gongxin, et al. Fast optimization of power supply route for the complex active distribution network[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2017, 32(13): 219-228.
- [8] 陶顺, 陈鹏伟, 肖湘宁, 等. 智能配电网不确定性建模与供电特征优化技术综述[J]. 电工技术学报, 2017, 32(10): 77-91.  
TAO Shun, CHEN Pengwei, XIAO Xiangning, et al. Review on uncertainty modeling and power supply characteristics optimization technology in smart distribution network[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2017, 32(10): 77-91.
- [9] KUMAR P, ALI I, THOMAS M S, et al. Imposing voltage security and network radiality for reconfiguration of distribution systems using efficient heuristic and meta-heuristic approach[J]. IET Generation Transmission & Distribution, 2017, 11(10): 2457-2467.
- [10] LI Zhechao, JAZEBI S, DE LEON F. Determination of the optimal switching frequency for distribution system reconfiguration[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2016, 99: 1-1.
- [11] 易海川, 张彼德, 王海颖, 等. 提高 DG 接纳能力的配电网动态重构方法[J]. 电网技术, 2016, 40(5): 1431-1436.  
YI Haichuan, ZHANG Bide, WANG Haiying, et al. Distribution network dynamic reconfiguration method for improving distribution network's ability of accepting DG[J]. Power System Technology, 2016, 40(5): 1431-1436.
- [12] 黄红程, 顾洁, 方陈. 基于无向生成树的并行遗传算法在配电网重构中的应用[J]. 电力系统自动化, 2015, 39(14): 89-96.  
HUANG Hongcheng, GU Jie, FANG Chen. Application of undirected spanning tree-based parallel genetic algorithm in distributed network reconfiguration[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(14): 89-96.
- [13] 李洪美, 崔翰韬, 万秋兰. 考虑电动汽车充电策略的配网重构二阶锥规划模型[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(18): 4674-4681.  
LI Hongmei, CUI Hantao, WAN Qiulan. Distribution network reconfiguration based on second-order conic programming considering EV charging strategy[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(18): 4674-4681.
- [14] JABR R A, SINGH R, PAL B C. Minimum loss network reconfiguration using mixed-integer convex programming[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2012, 27(2): 1106-1115.
- [15] HAGHIGHAT H, ZENG B. Distribution system reconfiguration under uncertain load and renewable generation[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2016, 31(4): 2666-2675.
- [16] 初壮, 窦孝祥, 于群英. 考虑风电随机性的多场景配电网重构[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(1): 132-138.  
CHU Zhuang, DOU Xiaoxiang, YU Qunying. Multi scene distribution network reconfiguration considering the randomness of wind power[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(1): 132-138.
- [17] 王薪莘, 卫志农, 孙国强, 等. 计及分布式电源和负荷不确定性的多目标配网重构[J]. 电力自动化设备, 2016, 36(6): 116-121.  
WANG Xinping, WEI Zhinong, SUN Guoqiang, et al. Multi-objective distribution network reconfiguration considering uncertainties of distributed generation and load[J]. Electric Power Automation Equipment, 2016, 36(6): 116-121.
- [18] 肖峻, 苏步芸, 贡晓旭, 等. 基于馈线互联系数的配电

- 网安全域模型[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(20): 36-44.
- XIAO Jun, SU Buyun, GONG Xiaoxu, et al. Model of distribution system security region based on interconnections of feeders[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(20): 36-44.
- [19] 肖峻, 祖国强, 白冠男, 等. 配电系统安全域的数学定义与存在性证明[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(18): 4828-4836.
- XIAO Jun, ZU Guoqiang, BAI Guannan, et al. Mathematical definition and existence proof of distribution system security region[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(18): 4828-4836.
- [20] 祖国强, 肖峻, 左磊, 等. 基于安全域的配电网重构模型[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(5): 1401-1409.
- ZU Guoqiang, XIAO Jun, ZUO Lei, et al. A reconfiguration model for distribution network based on security region[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(5): 1401-1409.
- [21] 毕鹏翔, 刘健, 张文元. 配电网重构的改进支路交换法[J]. 中国电机工程学报, 2001, 21(8): 98-103.
- BI Pengxiang, LIU Jian, ZHANG Wenyuan. A refined branch-exchange algorithm for distribution networks reconfiguration[J]. Proceedings of the CSEE, 2001, 21(8): 98-103.
- [22] DOROSTKAR-GHAMSARI M R, FOTUHI-FIRUZABAD M, LEHTONEN M, et al. Value of distribution network reconfiguration in presence of renewable energy resources[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2016, 31(3): 1879-1888.
- [23] 孙晓艳, 邱志强, 刘俊勇, 等. 配电网转供能力研究综述[J]. 供用电, 2017, 34(7): 60-66, 48.
- SUN Xiaoyan, QIU Zhiqiang, LIU Junyong, et al. A review of the research on load transfer capability of the distribution network[J]. Distribution & Utilization, 2017, 34(7): 60-66, 48.
- [24] 翟玮星, 俞功瑾, 李海龙, 等. 基于负荷均衡原则的城区配电网优化研究[J]. 供用电, 2017, 34(7): 67-70, 74.
- ZHAI Weixing, YU Gongjin, LI Hailong, et al. Study on optimization of urban distribution network based on load balancing principle[J]. Distribution & Utilization, 2017, 34(7): 67-70, 74.
- [25] 李辰雷, 卫志农, 韩连山. 序优化理论在配电网重构中的应用[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(8): 41-48.
- LI Chenlei, WEI Zhinong, HAN Lianshan. Application of ordinal optimization in distribution network reconstruction[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(8): 41-48.
- [26] 张涛, 张东方, 王凌云, 等. 计及电动汽车充电模式的主动配电网多目标优化重构[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(8): 1-9.
- ZHANG Tao, ZHANG Dongfang, WANG Lingyun, et al. Multi-objective optimization of active distribution network reconfiguration considering electric vehicle charging mode[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(8): 1-9.
- [27] 刘柏私, 谢开贵, 周家启. 配电网重构的动态规划算法[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(9): 29-34.
- LIU Bosi, XIE Kaigui, ZHOU Jiaqi. Electrical distribution networks reconfiguration using dynamic programming[J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(9): 29-34.
- [28] 傅子昊, 孙磊, 林振智, 等. 基于节点重要度评价矩阵的网络重构双层优化策略[J]. 电力自动化设备, 2016, 36(5): 37-42.
- FU Zihao, SUN Lei, LIN Zhenzhi, et al. Bi-level network reconfiguration optimization based on node importance evaluation matrix[J]. Electric Power Automation Equipment, 2016, 36(5): 37-42.
- [29] 王荟敬, 卢志刚, 赵号, 等. 计及风电最优逆鲁棒指标的双层优化调度策略[J]. 电网技术, 2017, 41(1): 86-92.
- WANG Huijing, LU Zhigang, ZHAO Hao, et al. Strategy of bilevel optimization dispatch considering wind power optimal inverse robust index[J]. Power System Technology, 2017, 41(1): 86-92.
- [30] LIU X, LI Z. Revealing the impact of multiple solutions in DCOPF on the risk assessment of line cascading failure in OPA model[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2016, 31(5): 4159-4160.

收稿日期: 2018-03-07; 修回日期: 2018-08-15

作者简介:

江 钧(1994—), 男, 通信作者, 硕士研究生, 研究方向为配电网重构; E-mail: jiangjunhu@163.com

赫卫国(1978—), 男, 硕士, 研究员级高级工程师, 研究方向为新能源及智能电网; E-mail: heweigu@epri.sgcc.com.cn

孙国强(1978—), 男, 博士, 副教授, 研究方向为电力系统分析与运行控制。E-mail: hhusunguoqiang@163.com

(编辑 葛艳娜)