

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.210335

# 基于 EPSILON 约束法的配电自动化设备多目标优化布点模型

陈锐智<sup>1</sup>, 李析鸿<sup>1</sup>, 陈思羽<sup>1</sup>, 陈艳波<sup>2</sup>

(1. 国网重庆市电力公司璧山分公司, 重庆 402760; 2. 华北电力大学电气与电子工程学院, 北京 102200)

**摘要:** 通过在配电网中配置自动化设备可以有效限制故障带来的负面影响, 从而提高供电可靠性, 减少停电损失, 但采用全覆盖式的布点方案会极大程度地加剧电力公司的资金压力。为了合理地配置各类自动化设备, 最大程度地发挥资金效能, 提出了配电自动化设备的多目标优化布点模型。首先, 分析了各类设备布点情况与负荷停电时间之间的关系, 进而获得了供电可靠性与停电损失关于设备布点情况的表达式。然后, 以各类设备的全生命周期费用作为约束, 搭建了基于混合整数线性规划的配电自动化设备多目标优化布点模型, 并通过数学求解器配合 EPSILON 约束法对其进行求解, 以有限的资金获得最大的供电可靠性以及最小的停电损失。最后, 基于 IEEE RBTS-BUS4 的算例结果表明, 所提出的模型可以精确有效地对配电自动化设备进行优化布点, 并直观地反映供电可靠性与停电损失之间的关系, 为电网规划人员提供了辅助材料。

**关键词:** 配电自动化设备; 优化布点; 多目标; EPSILON 约束法

## Multi-objective layout optimization model of distribution automation equipment based on the EPSILON constraint method

CHEN Ruizhi<sup>1</sup>, LI Xihong<sup>1</sup>, CHEN Siyu<sup>1</sup>, CHEN Yanbo<sup>2</sup>

(1. Bishan Branch of State Grid Chongqing Electric Power Company, Chongqing 402760, China;

2. School of Electrical and Electronic Engineering, North China Electric Power University, Beijing 102200, China)

**Abstract:** The deployment of automation equipment in the distribution network can effectively limit the negative impact of failures, thereby improving power supply reliability and reducing power outage losses. However, a full coverage scheme would greatly aggravate the financial pressure on power companies. In order to rationally configure various types of automation equipment and maximize the effectiveness of funds, a multi-objective optimization model of distribution automation equipment is proposed. First, the relationship between the distribution of various equipment and the time of load outage is analyzed, and then the expression of the reliability of power supply and the loss of power outage on the distribution of equipment is obtained. Secondly, with the life cycle cost of various types of equipment as constraints, a multi-objective optimization model of distribution automation equipment based on mixed integer linear programming is established. A mathematical solver is used in conjunction with the EPSILON constraint method for analysis, trying to use limited funds to obtain the greatest power supply reliability and the smallest power outage loss. Finally, the results of calculation examples based on IEEE RBTS-BUS4 show that the proposed model can accurately and effectively optimize distribution automation equipment, intuitively reflect the relationship between power supply reliability and power outage losses, and provide power grid planners with supplementary materials.

This work is supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 51777067).

**Key words:** distribution automation equipment; layout optimization; multi-objective; EPSILON constraint method

## 0 引言

为了保证可靠供电, 当配电网出现故障以后, 需要通过故障定位<sup>[1-3]</sup>、故障隔离<sup>[4-6]</sup>以及负荷转供

(Fault Location, Isolation, Supply Restoration, FLISR)等措施减少故障带来的影响。配电自动化设备比如故障指示器(Fault Indicator, FI)能远程检测故障电流加速定位, 而自动开关(3% & 1/2 Control Switch, RCS)既能远程检测电流又能遥控分合开关, 兼顾定位和隔离, 如果能够在配电网中合理的位置配置这些设

基金项目: 国家自然科学基金项目资助(51777067)

备, 则可以加速 FLISR 的效率, 提升供电可靠性。!

关于配电自动化设备的优化布点是国内外研究的热门课题<sup>[7]</sup>, 文献[8]从故障观测角度对设备安装问题求解。文献[9-12]考虑故障指示器加速巡线的作用, 对其配置展开了优化。文献[13-15]对自动化技术进行了梳理和归类, 提出了配电自动化系统差异化设计原则。文献[16-19]在对自动化设备进行优化过程中考虑了手动与自动开关在故障隔离中的作用。文献[20]通过故障遍历, 对配网自愈能力进行了评估, 并将故障概率作为权重得到了其自愈水平。文献[21-24]将自动化设备的优化布点问题搭建为整数规划问题, 以便获得全局最优解。

然而上述研究未考虑配电网中用户数量与负荷量分布不一致对设备布点的影响。此外, 在处理多目标问题上多采用带精英策略的非支配排序遗传算法(Non dominated Sorting Genetic Algorithm-II, NSGAI<sup>II</sup>)<sup>[25-26]</sup>, 无法保证解的质量, 造成经济上不必要的投入, 而能够保证解质量的精确算法多采用加权法, 权值不好确定, 不容易直观地反应多个目标之间的关系, 为电网规划工作带来了不便。

为了精确求解配电自动化设备多目标优化布点问题, 辅助规划人员的工作, 本文以多目标混合整数二次规划模型(Multi-objective Mixed Integer Quadratic Programming, MOMIQP)作为基础, 提出了考虑用户数量以及负荷量分布不一致的配电自动化设备多目标优化布点模型。首先分析了自动化设备布点情况对停电时间的影响, 并将设备的安装以及维护费用之和作为经济性约束, 以最大化供电可靠性与最小化停电损失作为目标, 通过EPSILON约束法配合精确算法对所提出的模型进行求解。最终通过不同情景证明了本文模型能够在保证解的精度同时, 利用有限的资金尽可能有效地提高供电可靠性, 减少停电带来的损失, 并直观反映两个目标的关系, 为配网规划工作提供了辅助材料。

### 1 问题描述

如图 1 所示, 为简单馈线拓扑结构, 配置有出口断路器与联络开关,  $m_1 - m_3$  为中压线路, 在 3 个负荷节点依次接入柱上变、低压线路以及负荷。

根据经验, 自动化设备一般安装在负荷节点两侧, 图中馈线配置了 RCS 以及 FI。当永久故障  $i$  发生在线路  $m_2$  时, 出口断路器重合闸失败, 将故障限制在该条馈线, 但同时该馈线陷入停电状态。由于故障电流流经 RCS, 并没有流过 FI, 因此配调中心采集信息后研判故障发生在由线路  $m_2$  和  $l_{(2,1)}$ 、 $l_{(2,2)}$

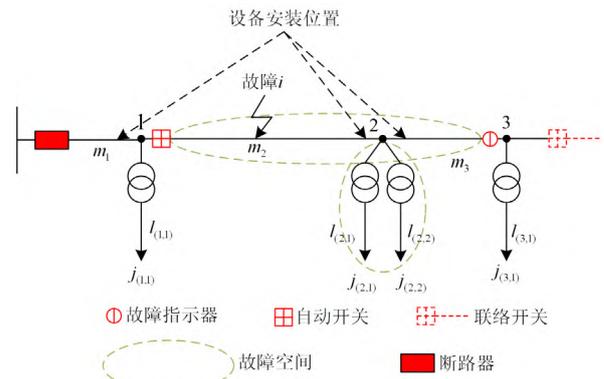


图 1 简单馈线拓扑

Fig. 1 Simple feeder topology

组成的故障空间中。对于负荷  $j_{(1,1)}$ , 由于其到故障之间存在 RCS, 可以通过 RCS 开合与故障隔离, 主电源使其恢复供电, 定义为情况 1。但对于负荷  $j_{(2,1)}$ 、 $j_{(2,2)}$  与  $j_{(3,1)}$ , 由于无法与故障隔离, 需要等待抢修人员在故障空间中巡线, 找到故障并维修以后才能恢复供电, 停电更久, 定义为情况 2。

综上所述, 自动化设备可以显著减少负荷停电时间, 但是由于配电网覆盖范围大, 而资金投入有限, 不可能在所有位置都配置自动化设备。如何合理有效地布点自动化设备是无法避免的实际问题。

本文围绕自动化设备优化布点问题展开, 在有限资金下, 在合适位置安装合适的自动化设备, 从而获得最大供电可靠性以及最小停电损失。!

### 2 数学模型

定义  $x_{f,n}$  与  $y_{f,n}$  分别为第  $f$  条馈线第  $n$  个 FI 以及 RCS 安装位置的配置变量, 其值为 1 则代表在对应的位置配置该设备, 其值为 0 则代表不配置。  $X$  与  $Y$  表示对应 FI 以及 RCS 所有配置变量的集合。本节首先分析自动化设备布点情况对停电时间的影响, 然后搭建相关的经济性约束与可靠性指标, 最终得到有关自动化设备优化布点的多目标混合整数二次规划模型。

#### 2.1 巡线时间

观察图 1, 馈线上任意线路  $s$  到故障  $i$  之间只要存在至少一个自动化设备, 则该线路位于故障空间之外, 不需要进行巡线, 因此首先定义用于判断线路是否位于故障空间之外的布尔型变量  $b_{f,i,s}(X,Y)$ , 其值为 0 则代表该线路位于故障空间, 反之相反。其实现方式如下:

$$\frac{\sum_{n \in \Omega_{f,j,s}} (x_{f,n} + y_{f,n})}{M} \leq b_{f,i,s}(X,Y) \leq \sum_{n \in \Omega_{f,j,s}} (x_{f,n} + y_{f,n}) \quad (1)$$

式中:  $\Omega_{f,i,s}$  为馈线  $f$  上故障  $i$  到线路  $s$  之间所有设备安装候选位置集合, 可以通过 Dijkstra 最短路算法获得<sup>[19]</sup>;  $M$  为一个极大值, 本文取 1 000。

进一步搭建巡线时间  $T_{f,i}^{\text{search}}(X,Y)$ 。

$$T_{f,i}^{\text{search}}(X,Y) = \sum_{s \in \Omega_{f,i}} \frac{l_{f,s}}{v_{f,s}} (1 - b_{f,i,s}(X,Y)) \quad (2)$$

式中:  $\Omega_{f,s}$  为馈线  $f$  的线路集合;  $l_{f,s}$  为线路  $s$  的长度;  $v_{f,s}$  为线路  $s$  的巡线速度。

## 2.2 停电时间

同理, 当故障发生以后, 馈线上任意负荷节点  $j$  到故障  $i$  之间只要存在至少一个 RCS, 则不需要等待故障巡线以及故障修复, 而是直接通过故障隔离并转供快速恢复供电, 极大地减少了负荷的停电时间, 结合问题描述, 搭建停电时间  $T_{f,i,j}(X,Y)$ 。

$$\begin{cases} T_{f,i,j}(X,Y) \geq t^{\text{RCS}} & \text{情况1} \\ T_{f,i,j}(X,Y) \geq (T_{f,i,j}^{\text{search}}(X,Y) + t^{\text{repair}}) \times \left(1 - \sum_{n \in \Omega_{f,i,j}} y_{f,n}\right) & \text{情况2} \end{cases} \quad (3)$$

式中,  $t^{\text{RCS}}$  与  $t^{\text{repair}}$  分别为自动开关动作时间与故障期望维修时间。

## 2.3 经济性约束

为了衡量设备布点过程中的经济性, 将设备的全生命周期费用即设备的购买安装费用以及生命周期中维修费用之和作为本文的经济性约束, 其表达式为  $LCC(X,Y) =$

$$\left( \sum_{f \in \Omega_f} \sum_{n \in \Omega_{f,n}} (x_{f,n} \text{inv}^{\text{FI}} + y_{f,n} \text{inv}^{\text{RCS}}) \right) \left( 1 + \sum_{t \in \Omega_t} \frac{1}{(1+DR)^t} \right) \quad (4)$$

式中:  $\Omega_f$  为馈线集合;  $\Omega_{f,n}$  为馈线  $f$  上设备安装位置集合;  $\Omega_t$  是设备的使用年限集合;  $DR$  为维修费用折扣率;  $\text{inv}^{\text{FI}}$  与  $\text{inv}^{\text{RCS}}$  分别为 FI 与 RCS 的购买安装费用。

## 2.4 供电可靠性指标

本文选取平均供电可靠率作为供电可靠性指标, 可表示为

$$ASAI(X,Y) = \left( 1 - \frac{\sum_{f \in \Omega_f} \sum_{i \in \Omega_{f,i}} \sum_{j \in \Omega_{f,j}} \lambda_{f,i} N_{f,j} T_{f,i,j}(X,Y)}{365 \times 24 \times 60 \times 60 \times \sum_{f \in \Omega_f} \sum_{j \in \Omega_{f,j}} N_{f,j}} \right) \times 100\% \quad (5)$$

式中:  $\Omega_{f,i}$  与  $\Omega_{f,j}$  分别为馈线  $f$  上所有可能的故障点与负荷节点集合;  $N_{f,j}$  为馈线  $f$  上负荷节点  $j$  的用户数量;  $\lambda_{f,i}$  为馈线  $f$  上故障  $i$  的故障概率。

## 2.5 停电损失指标

本文选取因为停电过程中损失的电费作为停电损失指标, 其可表示为

$$CIC(X,Y) = \sum_{t \in \Omega_t} \sum_{f \in \Omega_f} \sum_{i \in \Omega_{f,i}} \sum_{j \in \Omega_{f,j}} \sum_{k \in \Omega_{f,j,k}} \lambda_{f,i} T_{f,i,j}(X,Y) P_{f,j,k} R_k (1 + \mu)^t \quad (6)$$

式中:  $\Omega_{f,j,k}$  为馈线  $f$  上负荷节点  $j$  的所有负荷类型集合;  $P_{f,j,k}$  为馈线  $f$  上第  $j$  个负荷节点第  $k$  种负荷的负荷量;  $\mu$  为负荷年平均增长率;  $R_k$  为第  $k$  种负荷对应的电量电价, 可以通过适当地调整其数值大小反应该类负荷的重要程度。

## 2.6 优化布点<sup>[27]</sup>模型

本文以经济性投入作为约束, 最大化供电可靠性以及最小化停电损失, 搭建优化模型如式(7)所示。

$$\begin{cases} \text{maximize } ASAI(X,Y) \\ \text{minimize } CIC(X,Y) \\ \text{s.t. } \begin{cases} LCC(X,Y) \leq LCC^{\text{lim}} \\ x_{f,n} + y_{f,n} \leq 1 \\ \forall f \in \Omega_f, \forall n \in \Omega_{f,n} \end{cases} \end{cases} \quad (7)$$

考虑到 FI 与 RCS 的安装候选位置一致, 且功能部分重合, 因此额外添加安装限制约束, 即同一个安装候选位置只能安装一类设备。

## 3 求解策略

本文提出的模型属于双目标模型, 目前对于双目标模型的精确求解策略主要有加权和字典排序法等, 但是难以对目标函数的重要程度作出界定, 给规划工作带来不便。如果采用 NSGAI 算法进行求解, 容易陷入局部最优解, 造成不必要的经济性损失。因此本文采用 EPSILON 约束法<sup>[29]</sup>配合数学求解器中精确算法对文中模型进行求解。以下对 EPSILON 约束法进行简要介绍。

对于一般的双目标优化问题:

$$\begin{cases} \text{maximize } f_1(x) \\ \text{maximize } f_2(x) \\ \text{s.t. } g(x) \leq 0 \end{cases} \quad (8)$$

定义以下三类特殊点。

(1)  $f^l = (f_1^l, f_2^l)$ , 其中:

$$f_1^I = \max\{f_1(x)\} \quad (9)$$

$$f_2^I = \max\{f_2(x)\} \quad (10)$$

(2)  $f^N = (f_1^N, f_2^N)$ , 其中:

$$f_1^N = \min\{f_1(x) : f_2(x) = f_2^I\} \quad (11)$$

$$f_2^N = \min\{f_2(x) : f_1(x) = f_1^I\} \quad (12)$$

(3) 以及  $f_1^E = (f_1^I, f_2^N)$  和  $f_2^E = (f_1^N, f_2^I)$ , 根据定义, 这两个点为多目标问题中帕累托前沿的一部分。

如图 2 所示, EPSILON 约束法的特点是首先找到  $f^I$  与  $f^N$  点, 确定图中的矩形空间, 帕累托前沿上的所有点均位于该空间中, 而矩形空间的另外两个顶点即前沿边界点。可以近似地认为, 该算法是从其中一个边界点出发, 沿着红色箭头的方向, 在满足一定约束的情况下, 寻找帕累托前沿, 直到寻找到另外一个边界点。

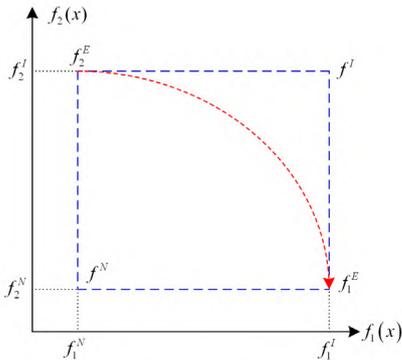


图 2 EPSILON 约束法示意图

Fig. 2 Schematic diagram of EPSILON constraint method

其中, 针对本文模型的 EPSILON 约束算法具体流程如图 3 所示。

#### 4 算例分析

为了验证本文模型的有效性以及合理性, 采用图 4 所示的 IEEE RBTS-BUS4 系统来对其进行验证, 并设定了 4 个不同情景以分析其合理性和有效性。该配电系统共有 7 条馈线, 38 个负荷节点, 4 779 户用户, 总平均负荷 24.58 MW。线路故障率、线路长度、负荷量以及用户数等数据详见文献[29]。其他参数如表 1—表 3 所示。

表 1 时间参数

Table 1 Time parameters

$t^{RCS}/s$	$t^{repair}/s$	$\Omega_i/年$	$DR$	$v^{low}/(m/s)$	$v^{mid}/(m/s)$
300	28 800	15	0.05	0.1	0.5

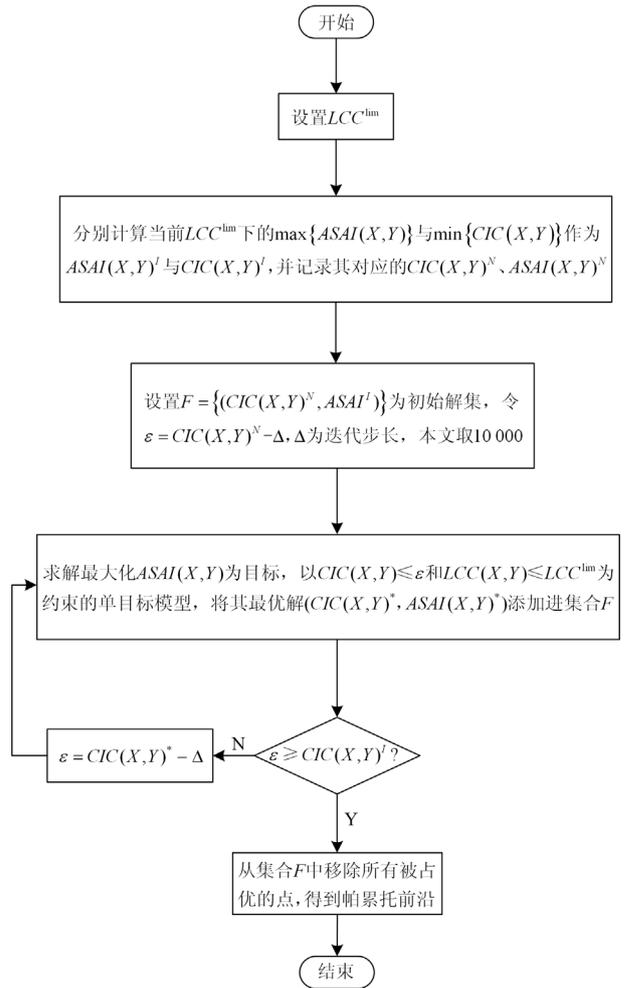


图 3 EPSILON 约束法流程图

Fig. 3 EPSILON constraint method flow chart

其中,  $v^{low}$ 、 $v^{mid}$  分别为低压和中压线路的巡线速度。

表 2 价格参数

Table 2 Price parameters

$inv^I/元$	$inv^{RCS}/元$	$R_1/(元/kWh)$	$R_2/(元/kWh)$	$R_3/(元/kWh)$
15 000	105 000	0.52	1.8	1.8

其中,  $R_1$ 、 $R_2$  与  $R_3$  分别为居民负荷、商业负荷以及工业负荷的电量电价。

表 3 NSGAI 算法参数

Table 3 NSGAI algorithm parameters

种群规模/条	进化代数/代	变异概率/%	交叉概率/%
500	100	5	5

采用 Python 3.8 对优化布点模型进行搭建, 并采用数学求解器 Gurobi 求解, 处理器为 i7-3630QM@2.4GHz, 内存为 16.0 GB。

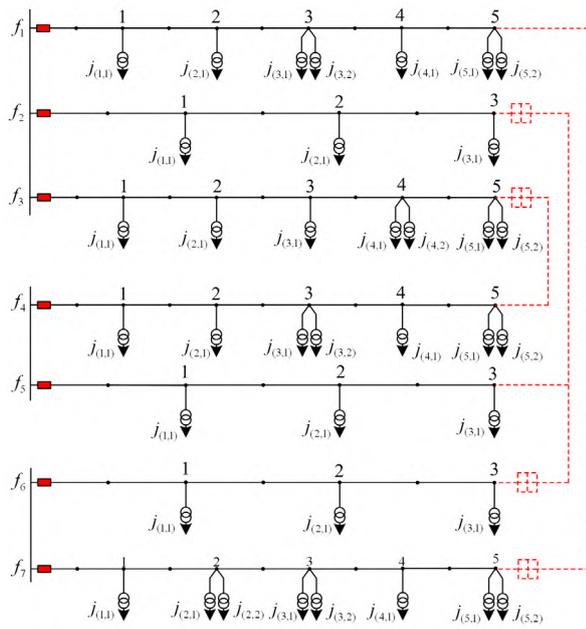


图 4 RBTS-BUS4 系统拓扑

Fig. 4 RBTS-BUS4 system topology

4.1 情景 1

本文模型同时对两类自动化设备优化布点, 为了验证其有效性, 设计以下单目标方案。

- 方案 1: 只配置 FI, 最小化停电损失。
- 方案 2: 只配置 RCS, 最小化停电损失。
- 方案 3: 同时配置 FI 与 RCS, 最小化停电损失。
- 方案 4: 只配置 FI, 最大化供电可靠性。
- 方案 5: 只配置 RCS, 最大化供电可靠性。
- 方案 6: 同时配置 FI 与 RCS, 最大化供电可靠性。

将以上方案在不同的经济约束下进行求解, 得到对应的优化数值与设备数量如表 4、表 5 所示。其中采用如(22x,3y)的设备数量表示方式, 代表对应方案有 22 个 FI 或者 3 个 RCS。

表 4 停电损失优化结果

Table 4 Power outage loss optimization results

方案	6×10 <sup>5</sup> 元	9×10 <sup>5</sup> 元	12×10 <sup>5</sup> 元
1	77740670(22x)	73747824(34x)	71556154(45x)
2	91711641(3y)	78329070(4y)	59794420(6y)
3	75410750(15x,1y)	62078951(13x,3y)	52128381(17x,4y)

表 5 供电可靠性优化结果

Table 5 Power supply reliability optimization results

方案	6×10 <sup>5</sup> 元	9×10 <sup>5</sup> 元	12×10 <sup>5</sup> 元
4	99.861(22x)	99.867(34x)	99.868(45x)
5	99.849(3y)	99.891(4y)	99.920(6y)
6	99.882(8x,2y)	99.916(6x,4y)	99.932(10x,5y)

可以发现, 方案 3 和方案 6 同时考虑两类设备, 布点方案更加灵活, 优化结果在不同经济约束下的表现都好于单一设备的方案。特别地, 方案 3 与方案 6 在相同的约束下, 其设备数量是不一致的, 代表布点方案也不一致, 这是因为以停电损失最小为目标方案的方案中, 设备布点倾向于保证负荷量大、电价高的负荷节点正常供电, 这些节点往往是工商业节点, 用户数量较小, 而以最大供电可靠性为目标的方案中, 设备布点则倾向于保证用户数量多的居民节点正常供电, 但这些节点负荷量较小, 因此是配电网中负荷分布不一致造成了求解结果不一致。以上结果也从侧面证明了本文在对自动化设备进行优化布点时考虑多目标的必要性。

4.2 情景 2

为了进一步地验证上述情景中的结论, 以 9 371 250 元即全配置 RCS 的生命周期费用作为经济约束上限, 0 元作为下限, 以单个 FI 的生命周期费用即 26 250 元作为迭代步长, 对方案 3 以及 6 进行迭代求解, 观察供电可靠性以及停电损失在不同经济约束下的变化关系, 结果图 5 所示。

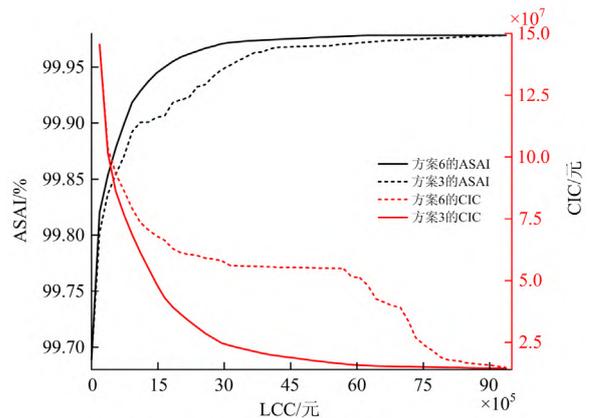


图 5 情景 2 结果

Fig. 5 Results of scene 2

观察发现, 随着经济约束的提高, 两种方案的停电损失以及供电可靠性都在改善, 但存在差距, 且这个差距先增后减。根本原因也是负荷量与用户量分布不均匀。在资金投入较少时, 少数的设备会优先保障负荷量大或者用户量大的节点正常供电, 但随着资金投入的增多, 系统中的设备开始饱和, 其差值减小, 最终全配置 RCS 时差值消除。该算例再次证明了对自动化设备优化布点时考虑多目标的必要性。

4.3 情景 3

为了验证模型的有效性, 将经济约束限制为 761 250 元, 此时方案 6 的可靠性达到 99.9%。采用

EPSILON 约束法求解, 迭代对象为停电损失, 迭代步长设置为 10 000 元。并与 NSGAI 算法进行对比, 具体结果如下。

如图 6 所示, 因为负荷量与用户数量的分布不均匀, 所以在相同的经济约束下存在多种布点策略, 组成多目标优化的帕累托前沿。当停电损失最小, 其供电可靠性最差, 而供电可靠性最好, 对应停电损失也最大。其中 EPSILON 约束算法在解的数量和质量上均优于 NSGAI 算法。因此规划人员能够根据 EPSILON 约束算法得到帕累托前沿, 从而更为直观地分析两个目标之间的关系, 以便于实现不同的规划目标。

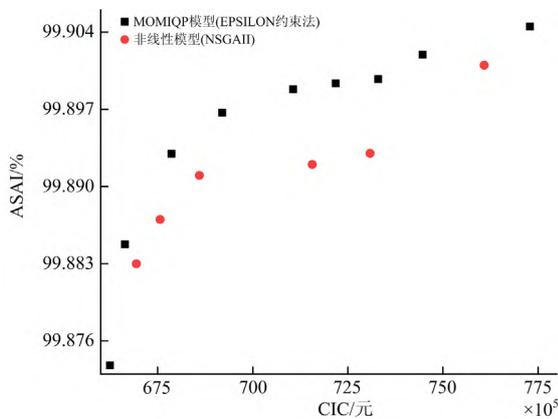


图 6 情景 3 结果  
Fig. 6 Results of scene 3

#### 4.4 情景 4

由于规划人员很难直接确定达到目标需要多少资金投入, 因此经济约束难以确定。

情景 4 同样以 26 250 元为经济约束的迭代步长, 逐渐扩大经济约束并对本文模型进行求解, 进一步地阐述 EPSILON 约束算法的优点, 得到结果如图 7 所示。

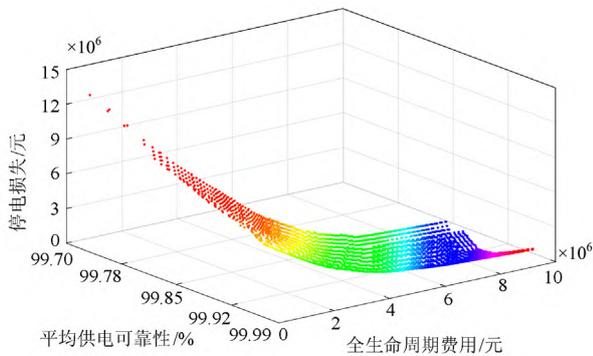


图 7 情景 4 结果  
Fig. 7 Results of scene 4

此时帕累托前沿从平面空间拓展到了立体空间。可以发现有以下若干特点。

特点 1: 当经济约束小于 1 500 000 元时, 较小的经济性投资则可以很大幅度地改善停电损失以及供电可靠性。但随后改善的幅度逐渐减小, 趋近饱和状态。当经济约束大于 4 500 000 元时, 继续追加的投资已经不会明显改善停电损失或者供电可靠性, 此时的投资会极大程度的浪费。

特点 2: 当不对配电网装配任何自动化设备时, 即经济约束为 0 时, 停电损失与供电可靠性是确定的, 因此在空间中对应一个独立的点。而当经济约束逐渐增加时, 因为自动化设备的类型、数量、位置可能有多种组合方式, 因此同一经济约束对应多个解, 即算例 4.3 中的帕累托前沿图。但是随着经济性约束的进一步提升, 此时整个配电网的自动化设备已经趋近饱和, 而且继续增加的自动化设备对于停电损失以及供电可靠性的改善已经逐渐较小, 因此解的个数逐渐减少, 当配电网全配置 RCS 以后, 停电损失与供电可靠性再次形成了空间中一个独立的点。

综上所述, 经济约束在 1 500 000 元左右时, 此时的投资是最经济的, 较少的自动化设备就可以很大程度地改善停电损失以及供电可靠性, 但是因为配电网负荷量以及用户数量的分布不均匀, 存在多种自动化设备的布点方式。而本文所给出的模型可以让规划人员直观地分析这些不同方式的差别, 更好地进行配网规划。

#### 5 结论

本文提出了一种配电自动化设备多目标优化布点模型。分析了自动化设备布点情况对停电时间的影响, 以设备相关的经济投入作为约束, 提出了最大供电可靠性以及最小停电损失的多目标混合整数二次规划模型。采用 EPSILON 约束法配合精确算法对以上模型进行求解, 通过 IEEE RBTS-BUS4 系统对所提模型在不同情景下进行测试, 证明了模型同时考虑两类自动化设备优化布点的合理性, 考虑多目标的必要性、求解结果的精确性以及直观性, 能对配电自动化设备布点问题高效求解, 保证供电可靠性以及降低停电损失的同时, 充分发挥资金效能。构建考虑负荷率以及故障率随机波动的配电自动化设备优化布点模型是本课题下一阶段研究的重点。

#### 参考文献

[1] 于力, 焦在滨, 王晓鹏, 等. 基于 PMU 的中压配电网

- 精确故障定位方法及关键技术[J]. 电力系统自动化, 2020, 44(18): 30-38.
- YU Li, JIAO Zaibin, WANG Xiaopeng, et al. Accurate fault location scheme and key technology of medium-voltage distribution network with synchrophasor measurement units[J]. Automation of Electric Power Systems, 2020, 44(18): 30-38.
- [2] 李泽文, 刘基典, 席燕辉, 等. 基于暂态波形相关性的配电网故障定位方法[J]. 电力系统自动化, 2020, 44(21): 72-79.
- LI Zewen, LIU Jidian, XI Yanhui, et al. Fault location method for distribution network based on transient waveform correlation[J]. Automation of Electric Power Systems, 2020, 44(21): 72-79.
- [3] 张健磊, 高湛军, 孙旭日, 等. 基于 NSGA-II 算法的有源配电网故障定位方法研究[J]. 电测与仪表, 2020, 57(9): 33-39.
- ZHANG Jianlei, GAO Zhanjun, SUN Xuri, et al. Research on fault location method for active distribution network based on NSGA-II algorithm[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2020, 57(9): 33-39.
- [4] 郑涛, 吴琼, 吕文轩, 等. 基于主动限流控制的直流配电网保护及故障隔离方案[J]. 电力系统自动化, 2020, 44(5): 114-121.
- ZHENG Tao, WU Qiong, LÜ Wenxuan, et al. Protection and fault isolation scheme based on active current-limiting control for dc distribution network[J]. Automation of Electric Power Systems, 2020, 44(5): 114-121.
- [5] 庞玉彬, 朱大宾, 霍群海, 等. 具有故障隔离能力的新型 MMC 子模块及混联桥臂拓扑[J]. 电力系统自动化, 2018, 42(18): 131-135.
- PANG Yubin, ZHU Dabin, HUO Qunhai, et al. A new type of MMC sub-module and hybrid arm topology with capability of fault isolation[J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(18): 131-135.
- [6] 蔡燕春, 王莉, 曹杰. 基于故障隔离分析的合环运行配电网电源接线方式研究[J]. 供用电, 2019, 36(9): 46-51, 78.
- CAI Yanchun, WANG Li, CAO Jie. Research on power connection mode of the closed-loop operation distribution network based on fault isolation[J]. Distribution & Utilization, 2019, 36(9): 46-51, 78.
- [7] 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. Current status and prospect of research on optimal configuration of switches in distribution networks[J]. Power System Technology, 2008, 32(16): 47-52.
- [8] 陈得宇, 沈继红, 张仁忠, 等. 配电网故障可观测的实现及馈线终端单元配置方法[J]. 电网技术, 2011, 35(2): 94-99.
- CHEN Deyu, SHEN Jihong, ZHANG Renzhong, et al. Realization of fault observability of distribution system and corresponding optimal configuration method of feeder terminal units[J]. Power System Technology, 2011, 35(2): 94-99.
- [9] USIDA W F, COURRY D V, FLAUZINO R A, et al. Efficient placement of fault indicators in an actual distribution system using evolutionary computing[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2012, 27(4): 1841-1849.
- [10] 陈煦斌, 秦立军. 配网故障指示器最优配置研究[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(3): 100-104.
- CHEN Xubin, QIN Lijun. Optimal configuration of fault indicator in distribution network[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(3): 100-104.
- [11] SHAHSAVARI A, MAZHARI S M, FEREDUNIAN A, et al. Fault indicator deployment in distribution systems considering available control and protection devices: a multi-objective formulation approach[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2014, 29(5): 2359-2369.
- [12] FEREDUNIAN A, TALABARI M A. Service restoration enhancement by FIs deployment in distribution system considering available AMI system[J]. IET Generation Transmission & Distribution, 2020, 14(18): 3665-3672.
- [13] 刘健, 程红丽, 张志华. 配电自动化系统中配电终端配置数量规划[J]. 电力系统自动化, 2013, 37(12): 44-50.
- LIU Jian, CHENG Hongli, ZHANG Zhihua. Planning of terminal unit amount in distribution automation systems[J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(12): 44-50.
- [14] 刘健, 林涛, 赵江河, 等. 面向供电可靠性的配电自动化系统规划研究[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(11): 52-60.
- LIU Jian, LIN Tao, ZHAO Jianghe, et al. Specific planning of distribution automation systems based on the requirement of service reliability[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(11): 52-60.
- [15] 李子韵, 成乐祥, 王自桢, 等. 配电自动化终端布局规划方法[J]. 电网技术, 2016, 40(4): 1271-1276.
- LI Ziyun, CHENG Lexiang, WANG Zizhen, et al. Layout planning method of distribution automation terminal[J].

- Power System Technology, 2016, 40(4): 1271-1276.
- [16] DE ASSIS L S, GONZALEZ J F, USBERTI F L, et al. Switch allocation problems in power distribution systems[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2015, 30(1): 246-253.
- [17] BEZERRA J R, BARROSO G C, LEAO R P S, et al. Multiobjective optimization algorithm for switch placement in radial power distribution networks[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2015, 30(2): 545-552.
- [18] SIIRTO O K, SAFDARIAN A, LEHTONEN M, et al. Optimal distribution network automation considering earth fault events[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2015, 30(2): 545-552.
- [19] WANG Shouxiang, LIANG Dong, GE Leijiao, et al. Analytical FRTU deployment approach for reliability improvement of integrated cyber-physical distribution systems[J]. IET Generation, Transmission & Distribution, 2016, 10(11): 2631-2639.
- [20] 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.  
SUN Lei, YANG Hejun, DING Ming. Mixed integer linear programming model of optimal placement for switching devices in distribution system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(16): 87-95.
- [21] XIAO Y, OUYANG J, XIONG X, et al. Fault protection method of single-phase break for distribution network considering the influence of neutral grounding modes[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2020, 5(2): 111-123. DOI: 10.1186/s41601-020-00156-w.
- [22] 蔡超, 丁建忠, 吕峰, 等. 基于整数线性规划模型的配电网故障指示器优化配置研究[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(1): 172-180.  
CAI Chao, DING Jianzhong, LÜ Feng, et al. Optimal placement of fault indicators based on integer linear programming model in distribution network[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(1): 172-180.
- [23] 何乐彰, 何炳源, 徐俊杰, 等. 计及可靠性约束的配电网故障指示器优化布点方法[J]. 电力系统自动化, 2020, 44(18): 116-123.  
HE Lezhang, HE Bingyuan, XU Junjie, et al. Optimal placement method of fault indicator in distribution network considering reliability constraints[J]. Automation of Electric Power Systems, 2020, 44(18): 116-123.
- [24] 刘小春, 伍惠铖, 李映, 等. 配电自动化终端配置的双层优化模型[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(24): 136-144.  
LIU Xiaochun, WU Huicheng, LI Ying, et al. A bi-level optimization model of distribution automation terminal configuration[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(24): 136-144.
- [25] IZADI S A. Financial risk constrained remote controlled switch deployment in distribution networks[J]. IET Generation, Transmission & Distribution, 2017, 12(7): 1547-1553.
- [26] 程梦竹, 张新慧, 徐铭铭, 等. 基于多目标加权灰靶决策的有源配电网故障区段定位方法[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(11): 124-132.  
CHENG Mengzhu, ZHANG Xinhui, XU Mingming, et al. Location method of an active distribution network fault section based on multi-target weighted grey target decision[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(11): 124-132.
- [27] 张俊潇, 唐俊熙, 曹华珍, 等. 配电终端全寿命周期成本模型与智能优化求解[J]. 电测与仪表, 2020, 57(20): 81-89.  
ZHANG Junxiao, TANG Junxi, CAO Huazhen, et al. Life cycle cost model and intelligent optimization of distribution automation terminal unit[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2020, 57(20): 81-89.
- [28] GAZIJAHANI F S, AJOULABADI A, RAVADANEGH S N, et al. Joint energy and reserve scheduling of renewable powered microgrids accommodating price responsive demand by scenario: a risk-based augmented EPSILON-constraint approach[J]. Journal of Cleaner Production, 2020, 262.
- [29] ALLAN R N, BILLINTON R. A reliability test system for educational purposes-basic distribution system data and results[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 1991, 6(2): 813-820.

收稿日期: 2021-03-29; 修回日期: 2021-07-14

作者简介:

陈锐智(1993—), 男, 硕士, 助理工程师, 研究方向为配电自动化; E-mail: 2169889956@qq.com

陈艳波(1983—), 男, 通信作者, 博士, 副教授, 研究方向为电力系统规划。E-mail: chenyanbo@ncepu.edu.cn

(编辑 许威)