

DOI: 10.7667/PSPC160977

# 配电自动化终端布点优化的动态规划研究

陈东新, 武志刚

(华南理工大学电力学院, 广东 广州 510640)

**摘要:** 提高配电系统的供电可靠性是配电自动化系统建设的重要目标, 但需考虑配电自动化设备的经济成本, 且实际工程中通常是分阶段拨款。提出一种考虑供电可靠性和经济成本的配电自动化终端布点优化的动态规划方法, 混合使用多种类型配电终端, 在架空线安装故障指示器、电压时间型终端、电压电流型终端, 在电缆线安装故障指示器、二遥终端和三遥终端, 根据自动化终端类型确定故障影响模式。运用 JAVA 语言进行编程, 实现从 XML 文件读取配网数据。以开关为边界划分配电网的区域节点, 采用开源的图形库 JGraphT 存储配网拓扑信息。考虑故障停电情况, 以用户年平均故障停电时间为评价供电可靠性的指标, 分别建立以可靠性指标为优化目标和以投资总额为优化目标的配电自动化终端布点优化的动态规划模型。使用建模系统 GAMS 求解模型, 得到配电终端布点优化结果。采用某地区区域配电网自动化终端布点规划作为算例验证, 结果显示了该方法的可行性与优越性, 为类似实际工程提供借鉴与依据。

**关键词:** 配电自动化终端; 布点优化; 动态规划; 非线性混合整数规划

## Dynamic planning of distribution automation terminal units placement optimization

CHEN Dongxin, WU Zhigang

(College of Electric Power, South China University of Technology, Guangzhou 510640, China)

**Abstract:** To improve the reliability of distribution system is an important goal of the construction of distribution automation system, but it needs to consider the economic costs of distribution automation equipment. And the funds are usually appropriated by stage. A method to optimize the placement of distribution automation terminal units with dynamic planning is proposed in this paper. Multiple types of distribution terminals are used. Fault indicators, voltage-time type terminal units and voltage-current type terminal units are placed on overhead feeders, and fault indicators, two-remote terminal units and three-remote terminal units are placed on cable feeders. According to the type of automation terminal, the failure-impacted mode can be determined. Via Java programming language, distribution data is read from the XML file. Regional node is separated by switches. Network topology information is stored with graphics library JGraph. Considering the outage caused by fault, the reliability of power supply is evaluated by the outage time of per users. Dynamic planning models to optimize reliability index and total investment are established. The case of distribution terminal units placement planning is about feeders of distribution network in a certain area, and the results verify the method's feasibility and superiority which can be used as a reference in a similar project.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 51437006).

**Key words:** distribution automation terminal units; placement optimization; dynamic planning; nonlinear mixed integer programming

## 0 引言

配电自动化(Distribution Automation, DA)是提高供电可靠性、供电质量和实现配电网高效经济运

行的重要手段, 也是智能电网的重要组成部分<sup>[1-4]</sup>, 一般是由配电主站、配电子站和配电终端组成。配电终端(Distribution Automation Terminal Unit, DATU)是配网自动化系统的基本组成单元, 其性能与可靠性直接影响到整个系统能否有效地发挥作用。配电终端用于中压配电网中的开闭所、柱上分段开关、

基金项目: 国家自然科学基金重点项目(51437006)

环网柜、配电变压器、重合器、线路调压器、无功补偿电容器的监视与控制,与配网自动化主站通信,提供配电网运行控制及管理所需的数据,执行主站给出的对配网设备进行调节控制的指令。

配电终端层主要包括安装在开闭所内的开闭所终端设备(Distribution Terminal Unit, DTU)和安装在线路环网柜、柱上开关处的馈线终端设备(Feeder Terminal Unit, FTU),以及安装在箱式变、杆上变等配电变压器处的配变监测终端(Distribution Transformer supervisory Terminal Unit, TTU)。它们负责采集柱上开关、负荷开关、配电变压器等配电设备的运行信息并转发至主站,接收主站的远方控制命令,实现对配电设备的远方监控。馈线自动化(Feeder Automation, FA)是配电自动化终端的核心功能之一,实现对中、低压配电网故障自动定位、隔离及非故障区域的供电恢复。1台FTU只能对1台柱上开关进行监控,而1台DTU可以对几台开关进行监控。架空馈线的“三遥”终端模块一般采用馈线终端单元(FTU)实现,电缆馈线的“三遥”终端模块一般采用站所终端单元(DTU)实现,故架空线的终端既可以安装于柱上开关处,也可以安装于架空馈线其他位置,电缆的配电终端一般安装于环网柜中<sup>[5-8]</sup>。当馈线采用电压时间型和电压电流型自动化开关时,往往以整条分支为单位配置,而且一旦采取了一种方式(电压时间型),在该区域内就不会再采取另一种方式(电压电流型)。电压时间型分段器针对负荷开关,电压电流型则需要断路器,两种方式都需要变电站出线断路器至少具备两次重合闸能力。三遥终端要求相应开关具备电操作机构、适合三遥的通道和备用操作电源,而两遥终端和故障指示器则不必。

文献[9-11]主要研究了配电网中开关的优化配置。文献[5, 12-13]主要面向供电可靠性进行配电终端的数量或者位置的研究,并未考虑配电终端设备的经济成本。文献[14]以系统供电可靠性为约束,以经济性最优为目标对三遥配电自动化终端的优化配置问题建立了混合整数非线性解析模型,采用C++编程混合调用大规模商业优化软件进行求解,该文献未考虑三遥以外的其他常用配电终端。以可靠性最优为目标,以经济性为约束的配电终端布点优化也是需要研究的问题。

动态规划是运筹学的一个分支,最早由美国数学家 R.E.Bellman 等人在研究多阶段决策问题时提出,其思想是将多阶段决策问题转化为一系列单阶段子问题,逐个求解,全过程的最优化是由每一阶段到终点的最优化过程所组成<sup>[15]</sup>。适合用动态规划

求解的问题应具有无后效性,又称马尔科夫性,即某阶段的状态一旦确定,则之后过程的发展与之前各种状态及决策无关,仅由本阶段的状态及之后的决策决定。文献[16]研究了动态规划在电力建设项目投资决策中的应用,该文献采用逆序求解法求解动态规划模型。动态规划的求解方法有顺序求解和逆序求解法,本文采用顺序求解法。

本文研究了考虑供电可靠性和经济成本的配电自动化终端布点优化的动态规划问题,在架空馈线安装故障指示器、电压时间型 FTU 和电压电流型 FTU,在电缆馈线安装故障指示器、二遥 DTU 和三遥 DTU,以用户年平均故障停电时间作为评价可靠性的指标,建立优化可靠性指标和优化投资总额两种动态规划模型,按照给定资金百分比逐阶段进行改造,便于实际工程的实施。使用 JAVA 编程语言和开源的类库 JGraphT 读取数据、生成网络拓扑、得到优化模型,调用通用代数建模系统 GAMS 求解模型,选择的求解器是 BARON。最后给出某地区的区域配电网算例实施过程验证所提模型与方法的有效性,与只装三遥的情况作比较,并与遗传算法进行对比,说明本文方法的优越性。

## 1 故障影响模式

### 1.1 故障影响模式分类

1) 对于架空线,节点  $j$  故障对节点  $i$  的影响可划分为以下 9 种故障影响模式: 不受影响模式、架空线传统隔离模式、架空线故障指示器隔离模式、电压时间型 FTU 隔离模式、电压电流型 FTU 隔离模式、架空线手动转供模式、架空线故障指示器转供模式、电压时间型 FTU 转供模式、电压电流型 FTU 转供模式。

2) 对于电缆,节点  $j$  故障对节点  $i$  的影响可划分为以下 9 种故障影响模式: 不受影响模式、电缆传统隔离模型、电缆故障指示器隔离模式、二遥隔离模式、三遥隔离模式、电缆手动转供模式、电缆故障指示器转供模式、二遥转供模式、三遥转供模式。

### 1.2 故障影响模式的确定

1) 若节点  $j$  故障对节点  $i$  无影响,则节点  $j$  故障对节点  $i$  的故障影响模式为不受影响模式。

2) 若节点  $j$  故障,节点  $i$  需要隔离/转供,对于架空线(电缆)而言,有如下情况所述。

(1) 对于相邻的区域节点  $i$  和  $j$ 。

(a) 若两节点之间开关无终端监测,则节点  $j$  故障对节点  $i$  的故障影响模式为传统隔离/转供模式;

(b) 若两节点之间的开关是由故障指示器监测,则节点  $j$  故障对节点  $i$  的故障影响模式为故障指示

器隔离/转供;

(c) 若两节点之间的开关是由电压时间型 FTU(二遥 DTU)监控, 则节点  $j$  故障对节点  $i$  的故障影响模式为电压时间型 FTU(二遥 DTU)隔离/转供;

(d) 若两节点之间的开关是由电压电流型 FTU(三遥 DTU)监控, 则节点  $j$  故障对节点  $i$  的故障影响模式为电压电流型 FTU(三遥 DTU)隔离/转供。

(2) 对于不相邻的区域节点  $i$  和  $j$ , 先获取  $i$  到  $j$  的路径。

(a) 若该路径上有电压电流型 FTU(三遥 DTU), 则节点  $j$  故障对节点  $i$  的故障影响模式为电压电流型 FTU(三遥 DTU)隔离/转供;

(b) 若该路径上没有电压电流型 FTU(三遥 DTU), 有电压时间型 FTU(二遥 DTU), 则节点  $j$  故障对节点  $i$  的故障影响模式为电压时间型 FTU(二遥 DTU)隔离/转供;

(c) 若该路径上没有电压电流型 FTU(三遥 DTU)和电压时间型 FTU(二遥 DTU), 有故障指示器, 则节点  $j$  故障对节点  $i$  的故障影响模式为故障指示器隔离/转供;

(d) 若该路径上没有电压电流型 FTU(三遥 DTU)、电压时间型 FTU(二遥 DTU)和架空线故障指示器(电缆故障指示器), 则节点  $j$  故障对节点  $i$  的故障影响模式为传统隔离/转供模式。

## 2 供电可靠性和经济成本

### 2.1 用户年平均故障停电时间

评价配网可靠性的指标有供电可靠率、用户年平均停电时间、用户平均停电损失电量、用户平均故障停电时间等。由于配电终端在故障隔离、转供、修复方面的重要作用, 本文主要考虑故障停电的情况, 使用用户年平均故障停电时间作为可靠性评价指标, 用户年平均故障停电时间是一年中每一用户的平均故障停电时间<sup>[17]</sup>, 计算式为

$$\frac{\sum_{i=1}^n u_i N_i}{\sum_{i=1}^n N_i} \quad (1)$$

式中:  $N_i$  为负荷区域节点  $i$  的用户数;  $u_i$  为节点  $i$  的年平均停电时间;  $n$  为负荷节点个数。区域节点是以开关为分界划分的。 $u_i$  的计算公式为

$$u_i = u_{i1} + u_{i2} \quad (2)$$

式中:  $u_{i1}$  是本区域节点的故障停电时间;  $u_{i2}$  是节点  $i$  受其他区域节点故障影响的停电时间。

本区域节点的故障停电时间  $u_{i1}$  的计算式为

$$u_{i1} = \lambda_{JKJ} \times rt_{JKJ} + \lambda_{JKL} \times rt_{JKL} + \lambda_{cable} \times rt_{cable} + \lambda_{trans} \times rt_{trans} \quad (3)$$

式中:  $\lambda_{JKJ}$  是架空绝缘线路故障率;  $rt_{JKJ}$  是架空绝缘线路修复时间;  $\lambda_{JKL}$  是架空裸导线故障率;  $rt_{JKL}$  是架空裸导线修复时间;  $\lambda_{cable}$  是电缆故障率;  $rt_{cable}$  是电缆修复时间;  $\lambda_{trans}$  是配电变压器故障率;  $rt_{trans}$  是配电变压器修复时间。架空绝缘线路、架空裸导线、电缆和配电变压器的故障率的计算式分别为

$$\lambda_{JKJ} = A_{JKJ} \times l_{JKJ} \quad (4)$$

$$\lambda_{JKL} = A_{JKL} \times l_{JKL} \quad (5)$$

$$\lambda_{cable} = A_{cable} \times l_{cable} \quad (6)$$

$$\lambda_{trans} = A_{trans} \times n_{trans} \quad (7)$$

式中:  $A_{JKJ}$ ,  $A_{JKL}$ ,  $A_{cable}$  和  $A_{trans}$  分别是架空绝缘线路平均故障率、架空裸导线平均故障率、电缆平均故障率和配电变压器平均故障率, 线路的平均故障率即一年中每公里线路的故障次数, 变压器平均故障率即一年中每台变压器的故障次数;  $l_{JKJ}$ ,  $l_{JKL}$ ,  $l_{cable}$  分别是架空绝缘线路、架空裸导线、电缆的长度, 单位是公里;  $n_{trans}$  是配电变压器的台数。

节点  $i$  受其他区域节点故障影响的停电时间  $u_{i2}$  的计算式为

$$u_{i2} = \sum_{j \in \Omega_{isolate-i}} \lambda_j \times t_{ei_{j-i}} + \sum_{k \in \Omega_{transfer-i}} \lambda_k \times t_{etr_{k-i}} \quad (8)$$

式中:  $\Omega_{isolate-i}$  是对节点  $i$  有隔离影响的节点的集合, 也就是节点  $j$  故障, 节点  $i$  需要隔离;  $\Omega_{transfer-i}$  是对节点  $i$  有转供影响的节点的集合, 也就是节点  $k$  故障, 节点  $i$  需要转供; 集合  $\Omega_{isolate-i}$  和  $\Omega_{transfer-i}$  可通过负荷转供优化方法<sup>[18]</sup>计算得到;  $\lambda_j$ ,  $\lambda_k$  分别是节点  $j$  和  $k$  的等值故障率;  $t_{ei_{j-i}}$  是隔离操作时间,  $t_{etr_{k-i}}$  是转供操作时间;  $e$  表示故障影响模式,  $ei_{j-i}$  是  $j$  故障后  $i$  的隔离模式。

### 2.2 经济成本

$P_{JK1}$ ,  $P_{JK2}$ ,  $P_{JK3}$ ,  $P_{C1}$ ,  $P_{C2}$ ,  $P_{C3}$  分别为架空线故障指示器、电压时间型 FTU、电压电流型 FTU、电缆故障指示器、二遥 DTU、三遥 DTU 的设备单价,  $n_{JK1}$ ,  $n_{JK2}$ ,  $n_{JK3}$ ,  $n_{C1}$ ,  $n_{C2}$ ,  $n_{C3}$  分别为架空线故障指示器、电压时间型 FTU、电压电流型 FTU、电缆故障指示器、二遥 DTU、三遥 DTU 的设备数量,  $P$  为总投资金额, 计算式为

$$P = \left( \sum_{i=1}^3 P_{JKi} n_{JKi} + \sum_{j=1}^3 P_{Cj} n_{Cj} \right) (1 + ir)^n \quad (9)$$

式中:  $ir$  是利率, 本文以一个规划阶段为一个利率期间;  $n$  是计息期数。

### 2.3 投入产出比

投入产出比是可靠性指标减少量与有效资金的比值。有效资金是考虑资金时间价值和设备使用寿命之后的使用价值，其计算式为

$$PE = \left( \sum_{i=1}^3 \frac{p_{JKi} n_{JKi}}{a_{JKi}} + \sum_{j=1}^3 \frac{p_{Cj} n_{Cj}}{a_{Cj}} \right) (1+ir)^n \quad (10)$$

式中： $a_{JK1}$ ， $a_{JK2}$ ， $a_{JK3}$ ， $a_{C1}$ ， $a_{C2}$ ， $a_{C3}$  分别是架空线故障指示器、电压时间型 FTU、电压电流型 FTU、电缆故障指示器、二遥 DTU、三遥 DTU 的设备使用寿命，单位为年； $PE$  是有效资金。

投入产出比的计算式为

$$r_{o-i} = \frac{d}{PE} \quad (11)$$

式中， $d$  是可靠性指标减少量。

## 3 配电终端布点优化动态规划模型

实际工程中通常是分阶段进行拨款和建设，需规划每个阶段应安装的配电终端。本文给出两种配电自动化终端布点优化动态规划模型，分别为指定投资总额优化可靠性指标的模型、给定可靠性指标期望值优化投资总额的模型。

### 3.1 以可靠性指标作为优化目标的动态规划模型

- 1) 阶段总数  $n$ ，且指定每一阶段的资金。
- 2) 状态变量  $s_k$  是到第  $k$  阶段为止整个系统已有的配电终端的集合。
- 3) 决策变量  $x_k$  及允许决策集合  $\mathbf{X}_k$ ， $x_k$  是第  $k$  阶段安装的配电终端集合， $\mathbf{X}_k$  是满足该阶段资金约束的决策变量集合， $x_k \in \mathbf{X}_k$ 。
- 4) 状态转移方程  $s_k = s_{k-1} + x_{k-1}$ 。
- 5) 指标函数的递推关系为

$$\begin{cases} f_k^*(s_k, x_k^*) = \max_{x_k \in \mathbf{X}_k} \left[ \frac{d_k^*}{PE_k^*} \right] \\ d_k^* = d_{k-1}^* + d(s_k + x_k) \\ PE_k^* = PE_{k-1}^* + PE(x_k) \\ d(s_k + x_k) = u(k) - u(k-1) \\ u(0) = u \\ d_0^* = 0, PE_0^* = 0 \end{cases} \quad (12)$$

式中： $f_k^*(s_k, x_k^*)$  表示第  $k$  阶段的状态为  $s_k$  时，第 1 到第  $k$  阶段的投入产出比； $d_k^*$  是第 1 到第  $k$  阶段可靠性指标减少总量； $PE_k^*$  是第 1 到第  $k$  阶段总共投入的有效资金； $d(s_k + x_k)$  是第  $k$  阶段的可靠性指标减少量； $PE(x_k)$  是第  $k$  阶段投入的有效资金； $u(k)$  是第阶段计算得到的可靠性指标； $u$  是初始状

态时的可靠性指标； $x_k^*$  是第  $k$  阶段的最优决策。每一阶段的优化模型为

$$\begin{cases} \min \frac{\sum_{i=1}^n u_i N_i}{\sum_{i=1}^n N_i} \\ \text{s.t.} \left( \sum_{i=1}^3 p_{JKi} n_{JKi} + \sum_{j=1}^3 p_{JKj} n_{JKj} \right) (1+ir)^{k-1} \leq M \end{cases} \quad (13)$$

式中， $M$  是该阶段给定的投资金额。模型的优化变量是每个待安装配电终端的位置上的配电终端类型，在编程实现过程中用固定的整数值来代表终端类型，存储于列向量  $\mathbf{X}$  中，表达式为

$$\mathbf{X} = [\mathbf{x}_{\text{location}}]^T \quad (14)$$

式中， $\text{location}$  是待安装配电终端的位置，对于架空馈线，终端安装在柱上开关处，对于电缆馈线，终端安装在环网柜中。对应于不装自动化终端、架空线故障指示器、电压时间型 FTU、电压电流型 FTU、电缆馈线故障指示器、二遥 DTU 和三遥 DTU， $x$  分别对应的值为 0, 1, 2, 3, 4, 5, 6。该模型是非线性混合整数规划模型。

### 3.2 以投资金额作为优化目标的动态规划模型

- 1) 阶段总数  $n$ ，且指定每一阶段的资金。
- 2) 状态变量  $s_k$  是到第  $k$  阶段为止整个系统已有的配电终端的集合。
- 3) 决策变量  $x_k$  及允许决策集合  $\mathbf{X}_k$ ， $x_k$  是第  $k$  阶段安装的配电终端集合， $\mathbf{X}_k$  是满足该阶段指定的可靠性指标减少量期望值的决策变量集合， $x_k \in \mathbf{X}_k$ 。
- 4) 状态转移方程  $s_k = s_{k-1} + x_{k-1}$ 。
- 5) 指标函数的递推关系为

$$\begin{cases} f_k^*(s_k, x_k^*) = \max_{x_k \in \mathbf{X}_k} [f_{k-1}^* + m(s_k + x_k)] \\ f_0^* = 0 \end{cases} \quad (15)$$

式中： $f_0^*$  是初始状态时花费的金额； $m(s_k + x_k)$  是第  $k$  阶段用的金额； $x_k^*$  是第  $k$  阶段的最优决策； $f_k^*(s_k, x_k^*)$  表示第  $k$  阶段的状态为  $s_k$  时，第 1 到第  $k$  阶段所花费的最少金额数目。每一阶段的优化模型为

$$\begin{cases} \min \left( \sum_{i=1}^3 p_{JKi} n_{JKi} + \sum_{j=1}^3 p_{JKj} n_{JKj} \right) \\ \text{s.t.} \frac{\sum_{i=1}^n u_i N_i}{\sum_{i=1}^n N_i} \leq v \end{cases} \quad (16)$$

式中,  $\nu$  是该阶段指定的可靠性指标期望值。

### 4 编程实现

本文使用 JAVA 语言编程读取馈线数据以及实现模型的生成和求解。编程实现的过程如图 1。

1) 本文馈线拓扑信息来源于某地区 GIS 系统导出的 XML 文件, 使用软件包 javax.xml 对文件进行解析, 得到本文需要的数据。

2) 获得馈线数据后, 基于开关设备进行配网结构化简, 定义配电网中以开关设备为边界划分的子配电网为一个区域节点, 从而将复杂配电网简化为较为简单的节点网络。

3) 使用 JGraphT 进行配电网数据建模, 一个区域节点为一个顶点, 将馈线拓扑结构和元件参数整合在一起。JGraphT 是一个免费的 JAVA 图形库, 提供数学图论对象和算法, 可以方便地对配电网的结构进行创建、修改、遍历、显示、添加、删除、获取路径等操作。

4) 建立优化模型后, 使用软件包 com.gams.api 调用 GAMS, 对每一阶段的优化模型进行求解, 直至阶段结束。由于每一阶段的优化模型是非线性混合整数规划模型, 所以选择对该类模型求解性能较好的求解器 BARON。

5) 输出布点优化动态规划的结果。

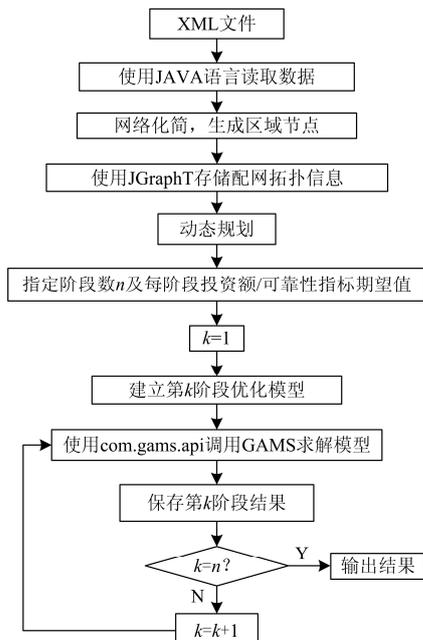


图 1 编程实现的流程图

Fig. 1 Programming flow chart

### 5 算例

本文采用某地区配电网的馈线数据进行算例验

证, 已知设备单价及隔离/转供时间如表 1, 配电网元件故障率和故障修复时间如表 2。化简后的网络拓扑图如图 2, 节点均是以开关为边界化简后的区域节点, 矩形框内的节点同属一条馈线, 0 号节点表示馈线的网供电源所在区域节点, 虚线边为联络线, 以字母“F”开头的编号是馈线 ID, 边旁边的 8 位数编号是该支路编号。计算机配置为: Intel(R) Xeon(R) CPU E3-1226v3; 3.30 GHz; RAM 4 GB; 64 位操作系统。

表 1 设备单价及隔离/转供时间

Table 1 Unit price and isolation / transfer time

设备种类	设备单价/万元	隔离时间/h	转供时间/h	寿命/年
架空线故障指示器	2	0.433	0.683	7
电压时间型 FTU	4	0.15	0.183	6
电压电流型 FTU	8	0.12	0.163	6
电缆故障指示器	1	0.333	0.583	7
二遥 DTU	8	0.05	0.083	5
三遥 DTU	10	0.02	0.063	5
原有开关	—	1.1	1.6	—

表 2 配电网元件故障率和故障修复时间

Table 2 Component failure rate and repair time of distribution network

元件名称	$\lambda$ /(次/年或次/km·年)	$t$ /h
电缆线路	0.03	8.0
架空裸导线	0.22	7.0
架空绝缘线路	0.22	7.0
配电变压器	0.05	5.5

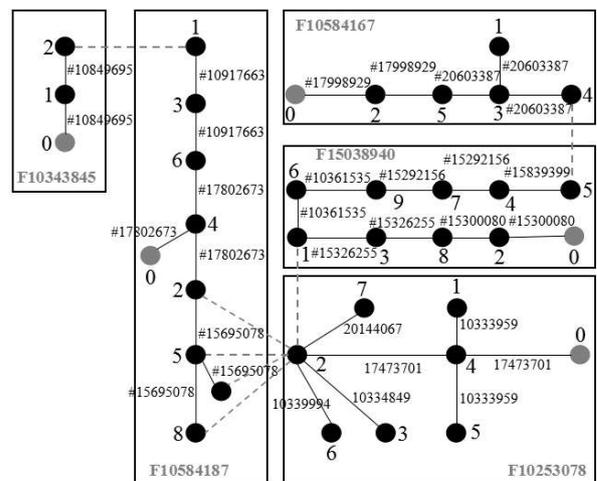


图 2 网络拓扑图

Fig. 2 Network topology

#### 5.1 优化可靠性指标

选择 5 条馈线, 给定总投资总额 80 万元, 建立动态规划模型和每阶段的优化模型, 用 GAMS 进行

求解，并计算出文献[14]中介绍的只装三遥的配电自动化终端优化配置结果，与本文结果进行对比，如表 3。并且使用遗传算法进行计算，算法采用轮盘赌选择算子，交叉方式为单点交叉，交叉率为 0.3，变异率为 0.1，种群大小为 100，共繁衍 200 代，共计算了 50 次，选择其中 10 次较优者作为结果输出，如表 4。表 5 是本文求解的配电自动化终端布点优化结果的分阶段配置情况，分为 5 个阶段。利率取 5%。

表 3 GAMS 优化结果-优化可靠性指标

Table 3 Results optimized by GAMS

项目	分值	
投资/万元	80	
优化前指标/h	9.251 705 882 352 942	
只装三遥	结果/h	8.144 646 464 564 545
	投入产出比	0.008 97
本文方案一多种类型配电终端	结果/h	7.846 546 467 131
	投入产出比	0.0114
	计算时间/ms	22 399

表 4 遗传算法求解结果-优化可靠性指标

Table 4 Solution result of genetic algorithm-optimize reliability index

次数	计算结果/h	投入产出比	计算时间/ms
1	7.936 650 686 274 509	0.0107	215 314
2	7.934 934 117 647 058	0.0107	228 427
3	7.941 858 823 529 412	0.0106	226 721
4	7.949 980 735 294 117 6	0.0105	222 763
5	7.943 065 833 333 333	0.0106	228 505
6	7.938 197 549 019 61	0.0106	220 212
7	7.936 650 686 274 509	0.0107	222 924
8	7.935 121 764 705 882 35	0.0107	224 120
9	7.936 650 686 274 509	0.0107	226 101
10	7.934 934 117 647 058	0.0106	227 467

表 5 不同资金分配方式下的输出优化结果

Table 5 Optimization results of different ways of allocating funds

资金分配方式	阶段	资金/万元	投入产出比
本文计算得到的资金分配	1	30	
	2	21	
	3	12	0.0114
	4	12	
	5	5	
平均分配每阶段的资金	1	16	
	2	16	
	3	16	0.009 63
	4	16	
	5	16	

由表 3 可知，在给定投资总额的情况下，混合使用多种配电自动化终端比只安装三遥的效果更好，这是因为虽然三遥监控的开关在发生故障时的进行隔离/转供时间更短，但是三遥的价格偏贵，所以用同样的投资，多装几个故障隔离/转供时间更短但价钱更便宜的其他配电终端，比只装一个三遥对可靠性指标的提升量更大。由表 4 可知，使用 GAMS 优化的结果比使用遗传算法计算得到的更优，这是因为遗传算法是随机搜索，得到的结果可能只是近似最优解，GAMS 内部的寻优算法是传统的数学优化计算方法，本文选用的是 BARON 求解器，该求解器的算法是基于外部逼近法、等式松弛策略和广义罚函数法等传统的数学优化算法，只要模型存在最优解，就一定能被找到。GAMS 的计算时间也比遗传算法更短。由表 5 可知，在考虑资金时间价值和设备使用寿命的情况下，金额的分配对整体的优化效果有影响。

5.2 优化投资总额

选择 5 条馈线进行指定可靠性指标期望值优化投资总额的计算，指定用户年平均故障停电时间为 7.7895 h，该值是表 3 中本文计算的结果，与只装三遥的情况以及遗传算法对比，使用遗传算法共计算了 50 次，选择其中 10 次较优者作为结果输出，结果如表 6 和表 7。输出投资总额最小的算例对应的分阶段布点方案，如表 8。

对比表 3 和表 6 的优化计算结果，可以看出两种模型的计算结果恰好相反，说明用第二个模型在指定可靠性指标情况下对配网进行布点优化计算得到投资总额，反过来用这个总额采用第一种模型对配电网进行自动化改造，能够得到的最好效果与第一种模型指定的可靠性指标正好相等，验证了模型的正确性。

表 6 优化投资总额

Table 6 Optimize total investment

项目	数值
指定可靠性指标期望值/h	7.7895
只装三遥 结果/万元	91
本文方案-多种类型 结果/万元	80
配电终端 计算时间/ms	28 963

表 7 遗传算法求解结果

Table 7 Solution result of genetic algorithm

次数	结果/万元	计算时间/ms	次数	结果/万元	计算时间/ms
1	84	215 314	6	83	220 212
2	83	228 427	7	81	222 924
3	85	226 721	8	82	224 120
4	83	222 763	9	83	226 101
5	82	228 505	10	82	227 467

表 8 分阶段输出优化结果-优化投资总额  
Table 8 Optimization results output by stage-optimize  
total investment

阶段	资金/万元	馈线 ID	位置 ID	设备类型
1	20	10584187	17802673	yao2dtu
		10253078	10315805	dysjftu
		10253078	10334849	dysjftu
		10253078	10333959	jkxfiu
		10584167	17998929	dlxfiu
2	10	15038940	15300080	dlxfiu
		10343845	10849695	yao3dtu
3	20	15038940	15839399	yao3dtu
		10584167	20603387	yao3dtu
4	20	10584187	10917663	yao3dtu
		15038940	15326255	yao3dtu
5	10	15038940	10361535	yao3dtu

## 6 结论

本文面向供电可靠性和经济成本对配电终端进行优化配置, 根据实际工程分阶段拨款的特点进行动态规划, 布点优化的结果用于配电网自动化改造, 用同样的投资达到最大化可靠性指标的效果, 或用最小的投资达到期望的可靠性指标, 可得到如下结论。

1) 相比于只安装三遥终端的情况, 混合采用多种类型的配电自动化终端, 在投资有限的情况下, 用户年平均故障停电时间减少量更大, 供电可靠性提升效果更好。

2) 给定投资总额优化用户年平均故障停电时间和指定可靠性指标期望值优化投资总额两种模型求解的结果正好相反, 即用第二个模型在指定可靠性指标情况下对配网进行布点优化计算得到投资总额, 反过来用这个总额采用第一种模型对配电网进行自动化改造, 能够得到的最好效果与第一种模型指定的可靠性指标正好相等, 验证了模型的正确性。

3) GAMS 计算结果优于遗传算法, 这是因为 GAMS 采用传统数学优化计算方法, 得到的是最优解, 遗传算法采用概率搜索, 很容易陷入局部最优, 最终结果很可能只是近似最优解。

4) 按照给定资金百分比分阶段规划, 逐阶段进行改造, 便于实际工程的实施, 而金额的分配情况会对影响整体的优化效果。

## 参考文献

[1] CIRIC R M, POPOVIC D S. Multi-objective distribution network restoration using heuristic approach and mix integer programming method[J]. International Journal of

Electrical Power & Energy Systems, 2000, 22(7): 497-505.

[2] 白峪豪. 基于智能配电网关键技术城市配电网规划[J]. 电网与清洁能源, 2015, 31(3): 79-83.

BAI Yuhao. Urban Power distribution network planning based on smart distribution network critical technologies[J]. Power System and Clean Energy, 2015, 31(3): 79-83.

[3] 赵航宇, 赵洪山. 配网自动化技术对供电可靠性影响分析[J]. 陕西电力, 2015, 43(1): 10-14.

ZHAO Hangyu, ZHAO Hongshan. Impact analysis of distribution network automation technology on power supply reliability[J]. Shaanxi Electric Power, 2015, 43(1): 10-14.

[4] 梁姗姗, 吴军, 刘涤尘, 等. 智能电网技术体系与发展趋势研究[J]. 陕西电力, 2015, 43(10): 1-5.

LIANG Shanshan, WU Jun, LIU Dichen, et al. Technology system and development trend of smart grid[J]. Shaanxi Electric Power, 2015, 43(10): 1-5.

[5] 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 system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(12): 44-50.

[6] 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.

ZHENG Lingling, WANG Zheng, ZHANG Zhihua. FTU optimal configuration under different distribution network structures and reliability requirement[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(24): 69-74.

[7] 高洪雨, 陈青, 徐丙垠, 等. 一种馈线自动化仿真培训系统[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(10): 131-136.

GAO Hongyu, CHEN Qing, XU Bingyin, et al. A simulation training platform for feeder automation[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(10): 131-136.

[8] 徐迅, 梅军, 钱超, 等. 基于 IEC 60870-5-104 规约扩展的配电终端自描述功能实现方法研究[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(7): 128-133.

XU Xun, MEI Jun, QIAN Chao, et al. Research method for implementation of the self-describing function of distribution terminals based on the extended IEC 60870-5-104 protocol[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(7): 128-133.

[9] ABIRI-JAHROMI A, FOTUHI-FIRUZABAD M,

- PARVANIA M, et al. Optimized sectionalizing switch placement strategy in distribution systems[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2012, 27(1): 362-370.
- [10] MORADI A, FOTUHI-FIRUZABAD M. Optimal switch placement in distribution systems using trinary particle swarm optimization algorithm[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2008, 23(1): 271-279.
- [11] 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.
- [12] 周文俊, 李春建, 王良, 等. 分层分区的馈线自动化配置方案研究[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(17): 42-76.
- ZHOU Wenjun, LI Chunjian, WANG Liang, et al. Study on hierarchical and divisional configuration scheme of feeder automation[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(17): 42-76.
- [13] 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.
- [14] 王旭东, 梁栋, 曹宝夷, 等. 三遥配电自动化终端的优化配置[J]. 电力系统及其自动化学报, 2016, 28(2): 36-42.
- WANG Xudong, LIANG Dong, CAO Baoyi, et al. Optimal placement of three remote distribution automation terminal units[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2016, 28(2): 36-42.
- [15] BELLMAN R. Dynamic programming[M]. United States of America: Princeton University Press, 1957.
- [16] 钟庆, 吴捷, 黄武忠, 等. 动态规划在电力建设项目投资决策中的应用[J]. 电网技术, 2002, 26(8): 48-51.
- ZHONG Qing, WU Jie, HUANG Wuzhong, et al. Application of dynamic programming for investment decision in electric power construction[J]. Power System Technology, 2002, 26(8): 48-51.
- [17] 陈文高. 配电系统可靠性实用基础[M]. 北京: 清华大学出版社, 2007.
- [18] 武志刚, 马义松. 基于图论和改进模糊遗传算法的配电网转供方法[J]. 华南理工大学学报(自然科学版), 2015, 43(12): 49-70.
- WU Zhigang, MA Yisong. A load transfer method for power distribution networks based on graph theory and improved fuzzy genetic algorithm[J]. Journal of South China University of Technology (Natural Science Edition), 2015, 43(12): 49-70.

收稿日期: 2016-06-30; 修回日期: 2016-11-25

作者简介:

陈东新(1992—), 女, 通信作者, 硕士研究生, 主要研究方向为配电网可靠性分析; E-mail: dxchen1234@163.com

武志刚(1975—), 男, 博士, 副教授, 主要研究方向为用复杂网络理论(现代图论)研究电力系统级联故障和大停电事故的机理及电力系统数字仿真。E-mail: epzgwu@scut.edu.cn

(编辑 姜新丽)