

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.181456

基于故障可观性指标的配电网 FTU 最优配置模型研究

周勳¹, 么军², 姚远³, 陈艳波³, 王旭东², 赵晓龙¹

(1. 中国电力科学研究院有限公司, 北京 100192; 2. 国网天津市电力公司, 天津 300010;
3. 华北电力大学电气与电子工程学院, 北京 102206)

摘要: 在配电网中, 自动化馈线终端设备安装分散、数量较多, 对其位置与数量进行优化配置有利于缩短配电网故障时的故障定位、隔离与修复时间, 从而提高配电网的供电可靠性。提出一种基于配电网故障可观性的 FTU 混合配置方法。该方法在未经自动化改造的配电网结构基础上, 对在开关处配置“二遥”FTU、“三遥”FTU 或不进行 FTU 配置进行了优化分析。首先给出了配电网故障可观测率的定义, 在此基础上提出一种以供电可靠性与经济性为约束条件, 以故障可观测率最大为目标的配电网 FTU 优化配置模型。针对模型的特点, 采用遗传算法进行求解, 得到了配电网 FTU 混合配置的最优方案。通过在 RBTS-BUS4 配电网算例上进行测试, 验证了所提方法的合理性与有效性。

关键词: 配电网; 故障可观性; FTU 优化配置; 遗传算法

Research on FTU optimal configuration model of distribution network based on fault observability index

ZHOU Meng¹, MO Jun², YAO Yuan³, CHEN Yanbo³, WANG Xudong², ZHAO Xiaolong¹

(1. China Electric Power Research Institute, Beijing 100192, China; 2. State Grid Tianjin Electric Power Company, Tianjin 300010, China; 3. School of Electrical and Electronic Engineering, North China Electric Power University, Beijing 102206, China)

Abstract: In the distribution network, the installation of automated feeder terminal equipment is scattered and the number is large. Optimizing the configuration of its location and quantity is beneficial to shortening the fault location, isolation and repair time when the distribution network is faulty, thereby improving the power supply reliability of the distribution network. In this paper, a FTU hybrid configuration method based on fault visibility of distribution network is proposed. That is to say, on the basis of the distribution network structure without automation, this method optimizes the configuration of monitoring terminal unit, controlling terminal unit or no FTU configuration at the switch. Firstly, the definition of the fault observability of the distribution network is given. On this basis, a distribution network FTU optimal configuration model with the constraint of power supply reliability and economy and the objective of maximum observable fault rate is proposed. According to the characteristics of the model, the genetic algorithm is used to solve the problem, and the optimal scheme of FTU hybrid configuration of distribution network is obtained. The rationality and effectiveness of the proposed method are verified by testing on the RBTS-BUS4 distribution network.

This work is supported by Science and Technology Project of State Grid Corporation of China “Research and Demonstration for Urban Distribution Network Metering System Optimization and Key Parameter Identification” (No. SGTJDK00DWJS1700030).

Key words: distribution network; fault observability; FTU optimization configuration; genetic algorithm

0 引言

随着对配电网安全性与供电可靠性要求的不断

增高, 配电网故障后的快速故障定位、隔离与修复变得至关重要^[1-2]。馈线终端装置(Feeder Terminal Unit, FTU)是配电网自动化的重要组成部分, 包括“二遥”(遥信、遥测)FTU与“三遥”(遥信、遥测与遥控)FTU, 它们能将故障后的信息进行实时量测并传递到控制中心。经中心决策后发送远端命令进行遥控或进行人工修复, 从而实现对配电网故障的

基金项目: 国家电网公司科技项目资助 (SGTJDK00DWJS1700030) “城市配电网量测体系优化配置与关键特征参数辨识技术研究及示范”

快速隔离及修复^[3-5]。显然, FTU 的配置数量与位置影响着配电系统的供电可靠性。综上, 为实现配电网故障的快速定位、隔离及修复, 提高供电可靠性, 并考虑 FTU 投资和运行的经济性, 对 FTU 进行优化配置成为必然选择^[6]。

目前, 基于 FTU 的配电网的故障定位主要包括人工智能算法与图论法^[7]。人工智能算法主要包括遗传算法、神经网络算法等, 该算法具有较好的容错性, 但计算量大, 定位速度还不够快^[8]。图论法中主要用到的方法为矩阵法, 该法计算量小, 定位速度快, 但容错性不够高^[9]。已有的配电网 FTU 的优化配置研究主要从配电系统的供电可靠性与经济性两方面考虑^[10], 模型多为混合整数非线性规划模型或混合整数线性规划模型, 求解方法主要包括遗传算法、隐枚举法、动态规划法等^[11-12]。文献[13]将配电网结构与“树”类比进行建模分析, 从适应度方面对 FTU 进行了优化配置计算。文献[14]通过对全“二遥”、全“三遥”以及无 FTU 三种情况下的平均供电可靠性(Average Service Available Index, ASAI)进行了计算, 进而根据实际工程中对 ASAI 的不同要求选择 FTU 配置方案, 在具体的方案中对 FTU 进行优化配置分析, 但并未给出三者混合配置的情况。

为精确衡量 FTU 配置对配电网故障定位的贡献, 本文首先定义了配电网故障可观测率; 在此基础上, 以配电网故障可观测率最大为目标函数, 将平均供电可用率以及总成本(包括故障停电时间带来的损失以及配电设备维修费用)作为约束条件, 构建了 FTU 优化配置模型, 此模型为纯整数非线性规划问题。针对模型的特点, 论文选择遗传算法对该模型进行求解。文章最后在 RBTS-BUS4 配电母线系统上^[15]对所提方法进行了测试。

1 配电网故障可观测性

1.1 配电网故障定位

配电网结构常呈辐射状, 即单电源带馈线的辐射状的网架结构, 从电源至某开关节点的电流流向是固定的。因而从某开关节点反溯至电源一般只存在唯一电力流通道。

图 1 为某一简单辐射状配电网, 编号 1-10 为开关编号。当在图 1 所示的开关 7、8、9 和 10 围成的区域发生故障 *a* 时, 由电源至故障处的故障电流路径为“1-3-7”; 当发生故障 *b* 时, 由电源至故障处的故障电流路径为“1-3-7-9”。这就验证了当故障发生时, 有且仅有 1 条流过故障电流的通道。

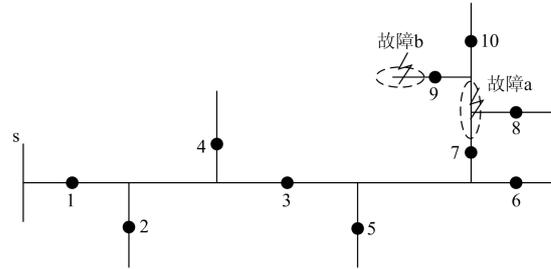


图 1 简单辐射状配电网结构图

Fig. 1 Structure of a simple radial distribution network

配电网辐射状网络结构与树形结构有很多相似之处, 而树形结构已有成熟的定义, 为配电网故障可观测提供分析工具^[16]。开关结构可由树形结构表示。某开关至根节点最短路径内包含的开关数加一为该开关的层数, 根节点对应层数为 1。则图 1 所示的配电网对应的树形结构如图 2 所示。

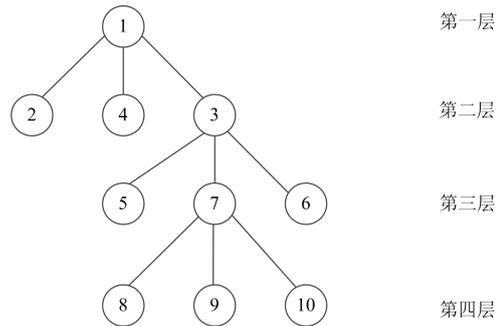


图 2 配电网开关树状结构图

Fig. 2 Distribution network switch's tree structure diagram

1.2 配电网故障可观测性

图 1 所示的配电网可能发生故障的区域可由电源至故障区域之间涉及到的开关组表示。全部故障区域对应的故障电流流通过径以及开关组情况如表 1 所示。

表 1 故障区域对应开关组表示

Table 1 Representation of the switch group corresponding to the fault area

故障区域	故障电流流通过径	开关组	故障区域	故障电流流通过径	开关组
1	1	1	6	1-3-6	1,3,6
2	1-2	1,2	7	1-3-7	1,3,7
3	1-3	1,3	8	1-3-7-8	1,3,7,8
4	1-4	1,4	9	1-3-7-9	1,3,7,9
5	1-3-5	1,3,5	10	1-3-7-10	1,3,7,10

由表 1 可知, 当配电网某处发生故障时, 若对应的故障电流通道上的开关组均配置了 FTU, 则能够实现对该故障的精确定位, 即可以将故障精确定

位于几个相邻分段开关之间的区域。

由于故障位置可由故障电流的通道来定位和表示^[17-19]。为此, 可定义配电网故障可观测为: 如果依据 FTU 提供的量测信息, 能够将故障定位于几个开关围成的区域内, 称此时配电网故障具有可观性。特别地, 如果所有的开关处均配置了 FTU, 则所有故障所在的区域均可被精确定位, 称此时的配电网故障完全可观, 此时也具有最高的供电可靠性。但是, 在所有开关处都安装 FTU 时的造价过高, 经济性不好, 现阶段还不宜实现。

为了精确定位所有故障, 统计表 1 中所有开关出现的频次, 同时统计图 2 中每个开关的所有下游开关的数目, 统计结果如表 2 所示。

表 2 配电系统开关配置 FTU 频次及下游开关数

Table 2 FTU frequency of the switch of the distribution system and the corresponding number of downstream switches

开关	频次	下游开关数目	开关	频次	下游开关数目
1	10	9	6	1	0
2	1	0	7	4	3
3	7	6	8	1	0
4	1	0	9	1	0
5	1	0	10	1	0

由表 2 可知: 1) 为精确定位所有故障, 每个开关处应配置 FTU 的频次等于该开关的所有下游开关的总数目加上 1; 2) 在配电网对应的树形结构中, 位于下游开关处配置的 FTU 会为配电网的故障定位做出更大的贡献。

基于以上分析, 为体现不同开关位置处配置的 FTU 对故障定位的不同贡献, 可定义 FTU 对配电网故障可观测的贡献率为

$$\mu_i = \frac{\alpha_i + 1}{\sum_{j=1}^N (\alpha_j + 1)} \quad (1)$$

式中: μ_i 代表第 i 个开关配置 FTU 时对配电网故障可观性的贡献率; α_i 代表第 i 个开关下游开关的数目; N 代表开关的总数目。

可定义一个系统中所有已配置的 FTU 对配电网故障可观性的贡献率之和为配电网故障可观率, 并作为配电网故障可观性的衡量指标。贡献率之和越大, 配电网故障的可观性越好。

基于上述分析, 引进配电网故障可观率指标 η , 定义为

$$\eta = \sum_{i=1}^N (x_i \mu_i) = \begin{cases} \sum_{i=1}^N \left(x_i \frac{\alpha_i + 1}{\sum_{j=1}^N (\alpha_j + 1)} \right) & (x_i = 0, 1) \\ \sum_{i=1}^N \left((x_i / 2) \frac{\alpha_i + 1}{\sum_{j=1}^N (\alpha_j + 1)} \right) & (x_i = 2) \end{cases} \quad (2)$$

式中: α_i 代表开关 i 对应的下游开关总数, x_i 取值有 0, 1, 2。 $x_i = 0$ 代表开关 i 没有配置 FTU, $x_i = 1$ 代表开关 i 处配置“三遥”FTU, $x_i = 2$ 代表开关 i 处配置“二遥”FTU。

2 配电网 FTU 优化配置模型

由上文分析可知, FTU 配置的选择对配电网的故障定位具有重要影响。以下在配置 FTU 时以配电网的故障可观率最大为目标, 供电可靠性和经济性为约束条件, 建立基于配电网故障可观率最大的 FTU 优化配置模型^[20-21]。

2.1 目标函数

目标函数取配电网故障可观率最大, 即:

$$\max_x \eta = \max_x \begin{cases} \sum_{i=1}^N x_i \frac{\alpha_i + 1}{\sum_{j=1}^N (\alpha_j + 1)} & (x_i = 0, 1) \\ \sum_{i=1}^N \frac{x_i}{2} \frac{\alpha_i + 1}{\sum_{j=1}^N (\alpha_j + 1)} & (x_i = 2) \end{cases} \quad (3)$$

2.2 约束条件

约束条件考虑供电可靠性与经济性。

1) 可靠性约束指标。配电网平均供电可用率 (Average Service Available Index, ASAI) 表示为

$$ASAI = 1 - \frac{\sum T_i / \gamma}{365 \times 24 \times M} \quad (4)$$

式中: M 表示配电网用户总数; $\sum T_i$ 表示故障引起的停电时间; γ 表示因配电网故障停电时间占总停电时间的比例, 一般取常数。本文中取值为 0.8。

2) 经济性约束指标。经济性约束表达式由两部分组成, 分别为因故障停电造成的用户损失以及 FTU 的寿命周期费用, 将其表示为

$$CIC(x) = \sum_{i=1}^{N_f} \sum_{j=1}^{N_L} t_{ij} \lambda_i \sum_{k=1}^3 P_{jk} F_{jk} \quad (5)$$

$LCC(x) = N_{FD} \times P_{FD} + N_{FTU2} \times P_{FTU2} + N_{FTU3} \times P_{FTU3}$ (6)
 式中: $CIC(x)$ 为用户停电损失; $LCC(x)$ 为普通开关与 FTU 的寿命周期费用; N_f 代表可能发生故障的馈线段数目; N_L 代表负荷总数; t_{ij} 代表故障 i 引起负荷 j 的停电时间; λ_i 代表馈线段 i 发生故障的概率; k 代表负荷下对应的负荷种类; P_{jk} 代表负荷点 j 的第 k 类负荷大小; F_{jk} 为某类型负荷的单位停电损失费用; N_{FD} 和 P_{FD} 分别代表普通开关的数量与单价; N_{FTU2} 和 P_{FTU2} 分别代表“二遥” FTU 配置的数量及单价; N_{FTU3} 和 P_{FTU3} 分别代表“三遥” FTU 配置的数量及单价。则配电网 FTU 优化配置的约束条件可表示为

$$\begin{cases} ASAI \geq ASAI_g \\ 0 \leq CIC(x) + LCC(x) \leq \text{price} \end{cases} \quad (7)$$

式中: $ASAI_g$ 为要求的最低配电网平均供电可用率; price 为实际工程中能够接受的最高报价。

2.3 停电时间表示

当配电网故障发生时, 对于处于不同位置的负荷, 如负荷处于故障区段上游、下游或在故障区段内等, 其停电时间的表示与计算都有所不同, 且不同的 FTU 配置方案也会影响配电网故障引起的停电表达式的形成^[22]。因此, 为准确计算配电网平均供电可用率与经济成本, 以下详细讨论不同情况下的配电网故障停电时间表达方式。

本文对该问题进行以下规定:

1) 定义若某馈线除首末两端有开关外无其他开关存在, 则该馈线称为“单位馈线”。

2) 在本文中出现的配电网故障均为配电网馈线故障, 且故障发生的区域均只发生在“单位馈线”内。

3) “单位馈线”发生故障时, 若某负荷(处于该馈线的上游或下游)至该馈线的最短路径中存在“二遥” FTU 或“三遥” FTU, 此时认为故障定位时间为 0, 否则故障定位时间存在。

4) “单位馈线”发生故障时, 若处于该馈线段内的负荷的上游段开关为“二遥” FTU 或“三遥” FTU, 此时认为故障定位时间为 0, 否则故障定位时间存在。

5) “三遥” FTU 动作时间较普通开关动作时间很小, 忽略不计。

当“单位馈线”发生故障时, 根据负荷所处的位置将其分为四类, 分别为: 不在故障范围内、故障上游、故障下游以及故障区间内, 分别表示为 Z_1 、

Z_2 、 Z_3 和 Z_4 。根据该分类方法, 停电时间可表示为

$$t_{if}(x_i) = \begin{cases} 0 & Z \in Z_1 \\ t_{loc}(x_i) + t_{iso}(x_i) + t_{CB} & Z \in Z_2 \\ t_{loc}(x_i) + t_{iso}(x_i) + t_{ic} & Z \in Z_3 \\ t_{loc}(x_i) + t_{rep} & Z \in Z_4 \end{cases} \quad (8)$$

式中: Z 代表故障区域; x_i 表示负荷 l 至故障区域 f 之间包含的开关配置 FTU 的情况; x_i 取值为 0, 1, 2, 分别表示不进行 FTU 配置, 配置“三遥” FTU 及配置“二遥” FTU; $t_{if}(x_i) = 0$ 代表负荷 j 处于故障区域 i 之外, $t_{if}(x_i) = t_{loc}(x) + t_{iso}(x) + t_{CB}$ 代表负荷 j 处于故障区域 i 上游的停电时间, $t_{if}(x_i) = t_{loc}(x) + t_{iso}(x) + t_{ic}$ 代表负荷 j 处于故障区域 i 下游的停电时间, $t_{if}(x_i) = t_{loc}(x) + t_{rep}$ 代表负荷 j 处于故障区域 i 内的停电时间。其中, $t_{loc}(x)$ 代表故障定位时间, $t_{iso}(x)$ 代表故障隔离时间, t_{CB} 代表出口处断路器普通开关动作时间; t_{ic} 代表联络开关动作时间, t_{rep} 代表故障修复时间。

根据负荷分类, 故障定位时间 $t_{loc}(x)$ 进一步表示为

$$t_{loc}(x) = \begin{cases} t_2 \prod_{i \in R_f} (2 - x_i)(1 - x_i) & Z \in Z_2 \text{ or } Z_3 \\ t_2 \frac{(1 - x_{i-1})(2 - x_{i-1})}{2} & Z \in Z_4 \end{cases} \quad (9)$$

$(x_i = 0, 1, 2)$

式中: t_2 代表平均故障定位时间; R_f 代表负荷 l 至故障 f 处的最短路径; i 代表该路径上的开关编号。

故障隔离时间 $t_{iso}(x)$ 表示为

$$t_{iso}(x) = C \prod_{i \in R_f} |1 - x_i| \quad (x_i = 0, 1, 2) \quad (10)$$

式中, C 代表分段开关与“二遥” FTU 的动作时间。本文中取动作时间为 1.5 h。

2.4 模型求解

上一节构建了基于配电网故障率最大的 FTU 最优配置模型, 该模型在数学上属于纯整数非线性规划问题。

本文采用遗传算法求解。遗传算法的基本步骤包括: 初始种群的产生、种群内个体的选择、种群内个体的交叉、种群内个体的变异。经过上述过程, 种群内个体经历了“自然条件”的选择, 适应性更高的个体得以保留。经过反复迭代处理, 最终能够得到适应度最佳的个体。本文中初始种群个体数取 100, 变异率取 0.001, 交叉率取 0.6, 迭代次数为

200 次。

为提高算法的求解效率, 本文对种群个体的选择采用了轮盘赌式算法。该算法的基本思想是个体被选中的概率与其适应度函数值成正比, 即适应度越高的个体被选中的几率越大。同时, 该函数也保证了适应度低的函数仍有被选中的可能, 增加了种群样本产生的随机性。设想群体全部个体的适当性分数由一张饼图来代表, 如图 3 所示。

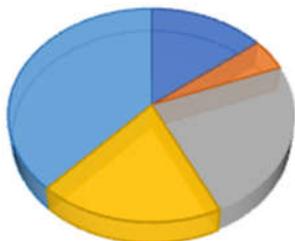


图 3 轮盘赌算法饼图

Fig. 3 Roulette algorithm diagram

群体中每一染色体指定饼图中一个小块。块的大小与染色体的适应性分数成比例, 适应性分数愈高, 它在饼图中对应的小块所占面积也愈大。如图 3 中, 深蓝色部分对应面积最大, 因此其被选中的概率就最高。为了选取一个染色体, 要做的就是旋转这个轮子, 直到轮盘停止时, 看指针停止在哪一块上, 就选中与它对应的那个染色体。

式(3)所示的 FTU 优化配置模型的求解流程如图 4 所示。

3 算例分析

3.1 RBTS-BUS4 算例描述

为测试本文模型的有效性, 以 RBT-BUS4 配电系统为例进行分析。该系统来自加拿大 Saskatchewan 大学 R. Billinton 教授等为开展配电系统可靠性教学研究而整理的六个配电系统算例之一, 其包括 33 kV 及 11 kV 两个电压等级。其中, 33 kV 为环形网络, 11 kV 为放射形网络, 出线故障时可以倒换。配电系统结构如图 5 所示。

该配电系统包含 38 个负荷节点、97 个计算节点、4 779 个配电用户。计算需要用到的参数如表 3、表 4 所示。

对于因配电网停电造成的停电损失, 不同的用户类型在不同的停电时间段内对应的停电损失不同。为方便表示, 对三种用户类型进行编号。“住宅”编号为 1, “小型用户”编号为 2, “商业”编号为 3。停电损失情况如表 5 所示。

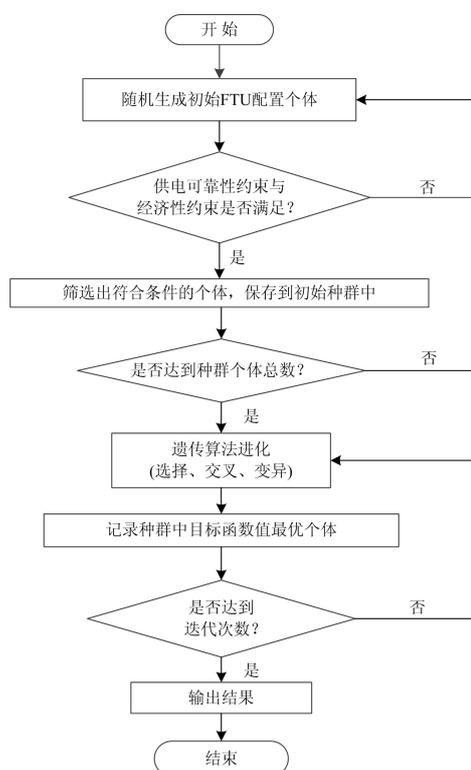


图 4 FTU 优化配置流程图

Fig. 4 FTU optimization configuration flow chart

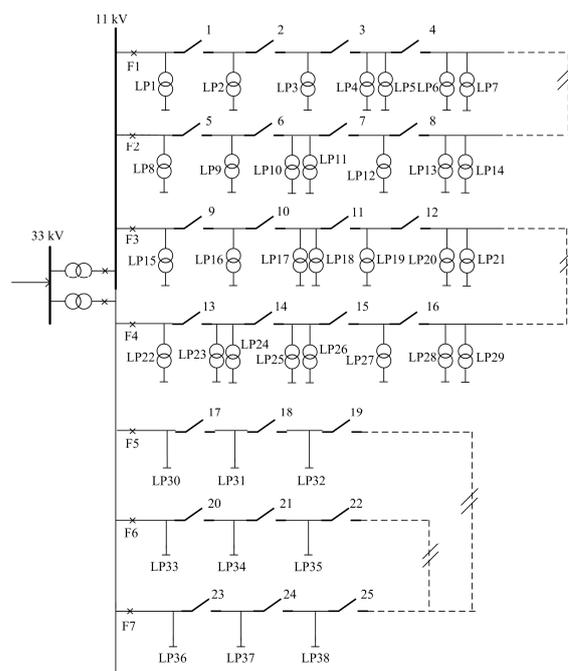


图 5 RBTS-BUS4 配电系统

Fig. 5 RBTS-BUS4 power distribution system

3.2 数据处理

为便于仿真的运算, 在不影响计算结果的情况下, 对算例做以下简化。

表 3 RBTS-BUS4 配电系统负荷参数

Table 3 RBTS-BUS4 power distribution system

load parameters			
负荷数量	负荷数	用户类型	用户数量
15	1-4, 11-13, 18-21, 32-35	住宅	220
7	5, 14, 15, 22, 23, 36, 37, 38	住宅	200
7	8, 10, 26-30	小型用户	1
2	9, 31	小型用户	1
7	6, 7, 16, 17, 24, 25, 28	商业	10
总数			4 779

表 4 RBTS-BUS4 配电系统基本参数

Table 4 Basic parameters of RBTS-BUS4 power distribution system

参数	值
故障定位时间 t_{loc}	1.2 min
普通开关/“二遥”FTU 动作时间 C	1.5 h
“三遥”动作时间 ε	1.2 min
馈线出口开关动作时间 t_{CB}	1.2 min
联络开关动作时间 t_{lc}	1.2 min
平均故障修复时间 t_{rep}	4.0 h
配电变压器的故障率 λ_t	0.012 4/(f/yr)
馈线的故障率 λ_f	0.042 (f/yr·km)
“二遥”FTU 单价	1 000 元
“三遥”FTU 单价	5 000 元
开关单价	300 元

表 5 不同用户类型对应的停电损失情况

Table 5 Power outage loss corresponding to different user types

用户类型	停电时间		
	10 min	5 h	10 h
住宅	0.06	3.16	5
小型用户	2.88	13.87	27.6
商业	2.05	21.51	63.06

简化 1: 对于处于同一馈线位置的馈线负荷, 将其所带用户数进行合并, 等效为一个负荷。在该算例中, 将 LP4 与 LP5、LP10 与 LP11、LP13 与 LP14、LP17 与 LP18、LP20 与 LP21、LP23 与 LP24、LP28 与 LP29 分别等效为一个负荷。等效后的负荷及用户分布如表 6 所示。

简化 2: 在简化 1 的基础上可知, 对于每条馈线, 负荷与普通开关都是交替依次出现的。即每个负荷两端都存在两个普通开关, 每段馈线内只存在一个负荷。

构造“负荷-馈线”关联矩阵。以馈线 F1 为例, 负荷包括 LP1、LP2、LP3、LP4 与 LP5, 馈线段有

表 6 等效负荷及用户分布

Table 6 Equivalent load and user distribution

负荷编号	LP1	LP2	LP3	LP4	LP5	
馈线 F1	用户数量	220	220	220	420	20
	用户类型	1	1	1	1	3
馈线 F2	负荷编号	LP6	LP7	LP8	LP9	LP10
	用户数量	1	1	221	220	420
馈线 F3	负荷编号	LP11	LP12	LP13	LP14	LP15
	用户数量	1	1	221	220	420
馈线 F4	负荷编号	LP16	LP17	LP18	LP19	LP20
	用户数量	200	10	230	220	440
馈线 F5	负荷编号	LP21	LP22	LP23	—	—
	用户数量	1	1	220	—	—
馈线 F6	负荷编号	LP24	LP25	LP26	—	—
	用户数量	220	220	220	—	—
馈线 F7	负荷编号	LP27	LP28	LP29	—	—
	用户数量	200	200	200	—	—

5 条, 即该关联阵为 5×5 的方阵。规定负荷在馈线段内的标记为“1”, 负荷处于馈线段上游的标记为“2”, 负荷处于馈线段下游的标记为“3”。则对于馈线 F1 的“负荷-馈线”关联矩阵 CM 可以表示为

$$CM = \begin{bmatrix} 1 & 2 & 2 & 2 & 2 \\ 3 & 1 & 2 & 2 & 2 \\ 3 & 3 & 1 & 2 & 2 \\ 3 & 3 & 3 & 1 & 2 \\ 3 & 3 & 3 & 3 & 1 \end{bmatrix}$$

观察该矩阵发现, 该矩阵的主对角线元素均为 1, 下三角部分(主对角线除外)元素均为 3, 上三角部分(主对角线除外)元素均为 2。不仅是馈线 F1, 其余 6 条馈线均呈现上述规律, 这极大方便了编程。

3.3 测试结果分析

首先, 在遗传算法中, 种群大小设置为 200, 交叉概率设置为 0.6, 变异概率设置为 0.001, 迭代次数设置为 100。其次, 设置对于整个配电系统停电损失费用和设备维修费用总和不超过 60 000 元, 平均配电网平均供电可用率不低于 0.998 0。优化配置结果如表 7 所示。

表 7 中, “无”表示该开关处不进行 FTU 配置, “二遥”表示在该开关处配置“二遥”FTU, “三遥”表示在该开关处配置“三遥”FTU。即开关 1、2、3、5、7、9、11、12、13、15、17、19、20、21、

22 处配置“二遥” FTU, 开关 4、6、10、14、18 处配置“三遥” FTU, 开关 8、16 处不进行 FTU 配置。

表 7 FTU 优化配置结果

Table 7 FTU optimization configuration results

馈线	编号	1	2	3	4
馈线 F1	配置	二遥	二遥	二遥	三遥
馈线 F2	编号	5	6	7	8
	配置	二遥	三遥	二遥	无
馈线 F3	编号	9	10	11	12
	配置	二遥	三遥	二遥	二遥
馈线 F4	编号	13	14	15	16
	配置	二遥	三遥	二遥	无
馈线 F5	编号	17	18	—	—
	配置	二遥	三遥	—	—
馈线 F6	编号	19	20	—	—
	配置	二遥	二遥	—	—
馈线 F7	编号	21	22	—	—
	配置	二遥	二遥	—	—

各类指标计算结果如表 8 所示。

表 8 RBTS-BUS4 算例系统指标计算结果

Table 8 Index calculation results of RBTS-BUS4 power distribution system

指标	结果
最佳可观测率 η (目标函数)	0.979 6
配电网供电可靠性 ASAI	0.998 9
总成本(CIC+LCC)	59 799.82 元

其中, 目标函数(配电网最佳故障可观测率)计算结果为 97.96%。配电网平均供电可靠性计算结果为 99.89%, 总成本计算结果为 59 799.82 元, 均满足约束条件。

遗传算法收敛计算结果如图 6 所示。

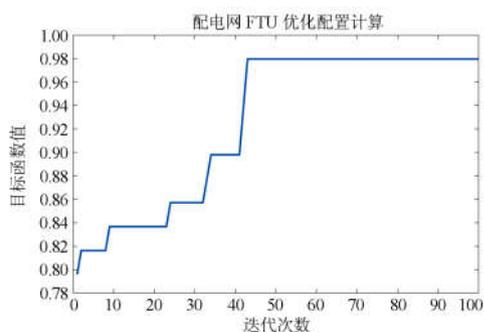


图 6 遗传算法收敛计算结果

Fig. 6 Calculation result of genetic algorithm convergence

图 6 中, 横轴表示遗传算法的迭代次数, 纵轴表示每次迭代计算出的最优种群对应目标函数值。计算结果从第 43 次起达到收敛并稳定在 97.96%。计算结果表明, 在满足配电网经济性与可靠性的要求下, FTU 配置结果使得该配电网系统的可观性

达到了 97.96%, 从而在保证配电网系统供电可靠性与经济性的前提下, 可大大提高配电网故障定位的精确性。

4 结论

为解决配电网故障的快速定位问题, 本文提出了以配电网故障可观率最大为目标、以配电网供电可靠性与经济性为约束条件的 FTU 最优配置模型。理论分析和仿真算例均表明, 本文提出的方法可在兼顾供电可靠性与经济性的同时, 给出最有利于故障精确定位的配电网 FTU 最优配置方案。

参考文献

- [1] HUANG Junhui, GE Shaoyun, HAN Jun, et al. A diagnostic method for distribution networks based on power supply safety standards[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2016, 1(1): 63-70. DOI: 10.1186/s41601-016-0020-2.
- [2] HE Jinghan, LIU Lin, DING Fanfan, et al. A new coordinated backup protection scheme for distribution network containing distributed generation[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2017, 2(2): 102-110. DOI: 10.1186/s41601-017-0043-3.
- [3] 王秋杰, 金涛, 刘军. 计及 FTU 漏报和误报的配电网故障定位分层解析模型[J]. 电力自动化设备, 2019, 39(1): 141-147. WANG Qiujie, JIN Tao, LIU Jun. Research on FTU optimal layout of active distribution network[J]. Electric Power Automation Equipment, 2019, 39(1): 141-147.
- [4] 刘坤, 王克文, 祁小鹏. 基于元件故障率曲线的配电网可靠性评估和配电终端优化配置[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(13): 49-56. LIU Kun, WANG Kewen, JIN Xiaopeng. Reliability evaluation and distribution terminal optimization configuration of distribution network based on component failure rate curve[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(13): 49-56.
- [5] 郭艳艳, 熊国江. 基于正弦与余弦优化算法的配电网故障区间定位[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(13): 97-101. GUO Yanyan, XIONG Guojiang. Fault interval location of distribution network based on sine and cosine optimization algorithm[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(13): 97-101.
- [6] 季宇, 孙彦萍, 吴鸣, 等. 基于可观性分析的计及 DG 不确定性配电网表计优化配置[J]. 电力自动化设备, 2017, 37(3): 26-32. JI Yu, SUN Yanping, WU Ming, et al. Optimization of metering based on DG uncertainty in distribution network based on observability analysis[J]. Electric Power Automation Equipment, 2017, 37(3): 26-32.
- [7] 钟建伟, 朱润枫, 黄秀超, 等. 基于双态二进制粒子群优化算法的配电网故障定位[J]. 电力系统及其自动化学报, 2019, 31(3): 29-34. ZHONG Jianwei, ZHU Yufeng, HUANG Xiuchao, et al.

Fault location in distribution network based on BBPSO algorithm[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2019, 31(3): 29-34.

[8] 陈歆技, 丁同奎, 张钊. 蚁群算法在配电网故障定位中的应用[J]. 电力系统自动化, 2006, 30(5): 74-77.
CHEN Xinji, DING Tongkui, ZHANG Zhao. Application of ant colony algorithm in fault location of distribution network[J]. Automation of Electric Power Systems, 2006, 30(5): 74-77.

[9] 王阳, 曾祥君, 黎锐烽, 等. 基于图论的配电网故障行波定位新算法[J]. 电力系统自动化, 2012, 36(18): 143-147.
WANG Yang, ZENG Xiangjun, LI Rui Feng, et al. A traveling wave fault location algorithm for distribution network based on graph theory[J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(18): 143-147.

[10] 项添春, 戚艳, 董逸超, 等. 提高配电网供电可靠性和状态可观性的终端优化配置方法[J]. 电力系统及其自动化学报, 2017, 29(6): 107-112.
XIANG Tianchun, QI Yan, DONG Yichao, et al. A terminal optimization configuration method for improving power supply reliability and state observability of distribution network[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2017, 29(6): 107-112.

[11] 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. The layout planning method of distribution automation terminal[J]. Power System Technology, 2016, 40(4): 1271-1276.

[12] 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. Quantity planning of distribution terminals in distribution automation system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(12): 44-50.

[13] 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. Implementation of faults observable in distribution network and configuration method of feeder terminal units[J]. Power System Technology, 2011, 35(2): 94-99.

[14] 郑玲玲, 王铮, 杨丽徒. 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, YANG Lixi. Optimal configuration of FTU under different network structure and reliability requirements[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(24): 69-74.

[15] ALLAN 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 Systems, 1991, 6(2): 813-820.

[16] 毛文晋, 李红伟, 李超. 一种考虑 DG 出力优化分配的配电网重构方法[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(13): 57-63.
MAO Wenjin, LI Hongwei, LI Chao. A distribution network reconfiguration method considering DG output optimization distribution[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(13): 57-63.

[17] 陈健, 刘玉田, 张文, 等. 基于博弈论的配电网中多级微电网优化配置分析[J]. 电力系统自动化, 2016, 40(1): 45-52.
CHEN Jian, LIU Yutian, ZHANG Wen, et al. Analysis of optimal configuration of multi-level microgrid in distribution network based on game theory[J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(1): 45-52.

[18] 张璐, 唐巍, 丛鹏伟, 等. 含光伏发电的配电网有功无功资源综合优化配置[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(31): 5525-5533.
ZHANG Lu, TANG Wei, CONG Pengwei, et al. Comprehensive optimization of active and reactive resources in distribution network with photovoltaic power generation[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(31): 5525-5533.

[19] 尤毅, 刘东, 钟清, 等. 主动配电网储能系统的多目标优化配置[J]. 电力系统自动化, 2014, 38(18): 46-52.
YOU Yi, LIU Dong, ZHONG Qing, et al. Multi-objective optimization configuration of active distribution network energy storage system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2014, 38(18): 46-52.

[20] 谢涛, 蒯圣宇, 朱晓虎, 等. 基于改进遗传算法的配电网故障定位方法[J]. 沈阳工业大学学报, 2019, 41(2): 126-131.
XIE Tao, KUAI Shengyu, ZHU Xiaohu, et al. Fault location method for distribution network based on improved genetic algorithm[J]. Journal of Shenyang University of Technology, 2019, 41(2): 126-131.

[21] 刘健, 张小庆, 陈星莺, 等. 集中智能与分布智能协调配合的配电网故障处理模式[J]. 电网技术, 2013, 37(9): 2608-2614.
LIU Jian, ZHANG Xiaoqing, CHEN Xingying, et al. Centralized intelligence and distributed intelligent coordination of distribution network distribution model[J]. Power System Technology, 2013, 37(9): 2608-2614.

[22] 贾浩帅, 郑涛, 赵萍, 等. 基于故障区域搜索的配电网故障定位算法[J]. 电力系统自动化, 2012, 36(17): 62-66.
JIA Haoshuai, ZHENG Tao, ZHAO Ping, et al. A fault location algorithm for distribution network based on fault region search[J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(17): 62-66.

收稿日期: 2018-12-14; 修回日期: 2019-01-24

作者简介:

周 勤(1987—), 男, 硕士, 工程师, 主要研究方向为智能配电网自动化技术; Email: zhoumeng@epri.sgcc.com.cn

公 军(1972—), 男, 硕士, 高级工程师, 主要研究方向为配电网自动化;

姚 远(1996—), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为配电网自动化、状态估计。

(编辑 葛艳娜)