

基于遗传算法的电网故障行波定位装置的优化配置

李泽文¹, 易志鹏^{1,2}, 杨毅¹, 李想¹, 杨雨薇³

(1. 智能电网运行与控制湖南省重点实验室, 长沙理工大学, 湖南 长沙 410114; 2. 国网黄山供电公司, 安徽 黄山 245000; 3. 湖南省电力培训中心, 湖南 长沙 410131)

摘要: 为了提高电网故障行波定位系统的稳定性和经济性, 提出了一种电网故障行波定位装置的优化配置方法。该方法首先根据配置规则建立的约束关系进行故障行波定位装置的初始配置, 然后运用遗传算法对得到的初始配置方案进行优化, 最后对于行波定位装置配置数目相同的方案根据配置冗余度进行方案优选。该方法将优化过程与配置过程有效结合, 可缩小遗传算法的寻优范围, 从而提高遗传算法的求解速度。最后对某系统进行仿真验证表明, 经过优化后的配置方案可以在不影响电网故障定位鲁棒性和准确性的基础上适当减少故障行波定位装置的配置, 有利于节约投资。

关键词: 行波; 故障定位; 优化配置; 遗传算法; 冗余度

Optimal placement of traveling wave fault location equipment for power grid based on genetic algorithm

LI Zewen¹, YI Zhipeng^{1,2}, YANG Yi¹, LI Xiang¹, YANG Yuwei³

(1. Hunan Province Key Laboratory of Smart Grids Operation and Control, Changsha University of Science and Technology, Changsha 410114, China; 2. Hunan Electric Power Corporation Training Center, Changsha 245000, China; 3. Hunan Electric Power Training Center, Changsha 410131, China)

Abstract: In order to improve the economy of the power grid traveling wave fault location system, an optimal method of power grid traveling wave fault location equipment (TWFLE) is proposed. First, configuration rules are established under the constraint relationships TWFLE initial configuration, and then genetic algorithm is used to optimize the initial configuration, the solutions of final configuration with the same number are selected based on large redundancy configuration. The configuration process and optimization effective integration process are combined, which can reduce the scope of genetic algorithm optimization and thus improve solution speed. Simulation results show that the optimal scheme can reduce the number of TWFLE without influence on reliability and accuracy of fault location, so it can save investment effectively.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 51377012 and No. 51207013), Hunan Science and Technology Major Foundation (No. 2012FJ1003), Natural Science Foundation of Hunan Province (No. 13JJ6044), Key Foundation of Hunan Province Department of Education (No. 14A002), and Industrialization Cultivation Project of Hunan Higher Education (No. 13CY008).

Key words: traveling wave; fault location; optimal placement; genetic algorithm; redundancy

中图分类号: TM76 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2015)03-0077-07

0 引言

随着电力系统和计算机通信技术的长足发展,

基金项目: 国家自然科学基金项目(51377012, 51207013); 湖南省科技重大专项(2012FJ1003); 湖南省自然科学基金项目(13JJ6044); 湖南省教育厅重点项目(14A002); 湖南省高校产业化培育项目(13CY008)

国内外许多科研工作者对故障行波定位算法与技术进行了深入的研究^[1-2], 同时对行波定位装置也进行了积极的研制^[3-4]。但传统方法一般是对单条输电线路故障利用单端或双端行波定位算法对故障点进行定位, 当定位装置失效时, 可靠性与准确性难以保证, 而且单台行波定位装置的时间记录错误也会影响故障定位的精准度。随着电网系统规模的扩大, 传统基于单条输电线路的单端或者双端故障行波定

位技术已经越来越难以满足人们对电网安全稳定运行日益高涨的呼声。因此,基于整个电网的故障行波定位算法的研究激发了广大电力工作者的研究热情。虽然基于全网的故障行波定位算法^[5]能保证电网中线路发生故障时对故障进行快速的清除,确保电网安全运行的可靠性,但其必须在所有的变电站都安装故障行波定位装置,这样做会增加系统的投资成本。因此,行波故障定位装置优化配置的研究^[6]已经成为行波定位技术的发展方向之一。

为了保证电网故障行波定位系统的经济性与可靠性,文献[7]根据邻接变电站个数确定初步配置方案,然后采用模拟退火算法进行优化配置,具有一定的参考价值,但该方案在确定初步配置时必须通过电网故障定位计算进行校验,受故障点位置影响较大,计算较为复杂,且配置结果受制定配置原则的人为因素影响较大,可能导致配置方案非最优;文献[8]根据行波在电网中传输的自由度,通过求解最大非奇子集得到最优配置结果,相比文献[7]具有更优的配置方案,但当存在多种配置方案时,如何进行选择并没有做进一步的说明;文献[9]假定线路故障,采用保留故障线路的 Floyd 算法简化网络,进而集合出需要配置定位装置的节点。该算法避免了配置原则的人为因素影响,但当环网中有多条线路长度相近时,无法利用 Floyd 算法简化网络,可能导致优化失败。文献[10]提出了计及测量装置失效的行波固有频率定位方法,该方法在测量装置失效的情况下,利用相邻线路故障信息得到定位结果,具有较高的可靠性,但基于固有频率的定位方法定位精度受频率主成分提取的影响,频率混叠会导致故障定位失败。

本文通过对上述方法进行研究,提出了一种运用遗传算法的对电网中安装的故障行波定位装置进行优化配置的方法,该方法能有效解决上述优化配置算法存在的计算复杂、人为因素影响大和可能优化失败的技术缺陷;并引入冗余度指标综合分析优化配置的经济性与可靠性,在存在配置数目相同的多种方案时选择可靠性最高的方案为最优方案,使得配置方案更可靠、鲁棒性更强。

1 电力系统的可观性和冗余度分析

1.1 电力系统可观性分析

所谓电力系统的可观性指的是系统中所有的支路状态能被直接或间接量测出来,本文中的可观性是指电网中所有的支路行波信号都能被定位系统检测到,主要考虑系统的拓扑可观^[11]。

由图论的观点,电网结构可视为一个由 N 个顶

点(表示电网结构中的变电站) b 条边(表示电网结构中的支路或者线路)构成的图 $G=(V,E)$, 其中 V 表示图的顶点集合即电网结构中的变电站, E 表示图的边集合即电网结构中的支路, 电网测量网络可以组成一个测量子图 $G'=(V',E')$, 并有隶属关系 $V' \subseteq V$, $E' \subseteq E$ 。如果测量子图 G' 与图 G 满足隶属关系 $V' \subseteq V$, 即测量子图 G' 包含了图 G 的所有顶点, 则该系统是拓扑可观的。

1.2 冗余度分析

对于所有支路信号都能被检测到的故障行波定位装置数目最小配置方案中, 当有相同数目的行波定位装置为了综合考虑配置方案的可靠性引入冗余度指标, 因此定义观测冗余度为

$$R = \sum_{k=1}^L V_{\text{observe}}(k) - L \quad (1)$$

式中: R 表示观测冗余度; L 为电网络图中总支路的条数; $V_{\text{observe}}(k)$ 表示支路 k 被观测的次数; $k = 1, 2, \dots, L$ 。

冗余度指标可以综合分析配置方案的可靠性与鲁棒性, 冗余度大说明网络中所有支路被重复检测到的次数多, 可靠性高。

2 行波定位装置的初步配置

2.1 行波定位装置配置的优化问题定义

对于一个有 N 个节点的电网系统, 行波定位装置配置的优化问题可定义为

$$\begin{cases} \text{Min} & J = \sum_{i=1}^N x_i \\ \text{s.t.} & U_k = 1 \end{cases} \quad (2)$$

式中: J 表示行波定位装置的个数; $U_k = 1$ 表示第 k 支路可观测; $i = 1, 2, \dots, N$; N 表示系统变电站数; x_i 是一个二进制变量, $x_i = 1$ 表示节点 i 配置行波定位装置, $x_i = 0$ 表示节点 i 没有配置行波定位装置。

2.2 行波定位装置优化配置原则

行波定位装置配置问题可看成在 2 个约束条件下进行求解的优化问题: 1) 电网系统中故障行波定位装置配置数目为最小; 2) 电网中所有线路发生故障之后能进行准确的故障定位。

根据上述两个约束条件本文采用的电网故障行波定位装置的具体配置原则如下:

- 1) 如果某变电站与它相邻的变电站有且只有一个则该变电站必须配置行波定位装置;
- 2) 每条线路两端的邻接变电站或者路径最短的两远端变电站必须配置行波定位装置;

3) 设节点 a 周围有 b 个节点, 则该节点与周围节点至少要配置 b 台行波定位装置才能使节点 a 相邻的支路可观。

2.3 约束关系式的建立

(1) 形成关联矩阵 A 。

对 A 中的元素做如下定义:

$$A_{m,n} = \begin{cases} 1 & m = n \\ 1 & \text{节点}m\text{和节点}n\text{相连接} \\ 0 & \text{节点}m\text{和节点}n\text{不连接} \end{cases} \quad (3)$$

以图 1 所示某 110 kV 电网结构为例进行行波定位装置配置分析。

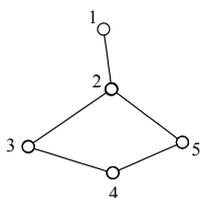


图 1 某 110 kV 电网结构

Fig. 1 Scheme of a 110 kV power grid

把根据所定义的关联 $A_{m,n}$ 的定义转换成二进制矩阵的形式即可获得关联矩阵 A , 建立图 1 节点系统的关联矩阵, 如下式:

$$A = \begin{pmatrix} x_1 & x_2 & x_3 & x_4 & x_5 \\ 1 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 1 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 1 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 1 & 0 & 1 & 1 \end{pmatrix} \begin{matrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \\ x_4 \\ x_5 \end{matrix}$$

(2) 根据行波定位装置优化配置规则以及关联矩阵, 约束关系式可以写成如下的形式:

$$\begin{cases} f_1 = x_1 = 1 \\ f_2 = x_1 + x_2 + x_3 + x_5 \geq 3 \\ f_3 = x_2 + x_3 + x_4 \geq 2 \\ f_4 = x_3 + x_4 + x_5 \geq 2 \\ f_5 = x_2 + x_4 + x_5 \geq 2 \end{cases} \quad (4)$$

不等式 $f_1 = 1$ 表示邻接变电站(与某变电站相邻的变电站)数为 1 的变电站必须配置行波定位装置。不等式 $f_2 \geq 3$ 表示在节点 1、2、3、5 上至少要配置 3 台行波定位装置才能使节点 2 相邻的支路可观, 不等式 $f_3 \geq 2$ 表示在节点 2、3、4 上至少要配置 2 台行波定位装置才能使节点 3 相邻的支路可观, 不等式 $f_4 \geq 2$ 表示在节点 3、4、5 上至少要配置 2 台行波定位装置才能使节点 4 相邻的支路可观, 不等

式 $f_5 \geq 2$ 表示在节点 2、4、5 上至少要配置 2 台行波定位装置才能使节点 5 相邻的支路可观。

对关系式(4)进行求解得 $x_1=1, x_3=1, x_4=1, x_5=1$, 或 $x_1=1, x_2=1, x_3=1, x_5=1$, 即在节点 1、3、4、5 或 1、2、3、5 配置行波定位装置可使所有支路可观。

3 基于遗传算法的行波定位装置配置方案的优化

3.1 遗传算法简介

遗传算法(Genetic Algorithms, GA)是于 1975 年由 Holland 教授首次提出^[12], 它是模拟生物在自然环境中的遗传和进化过程而形成的一种随机优化算法, 在机器学习、模式识别、图像处理、神经网络、组合优化等领域中都有广泛的应用。该算法是基于生物进化论“适者生存”的规律, 通过选择、交叉、变异三个算子的作用逐步求解问题的最优解。其主要特点是: ① 对问题参数编码成“染色体”进行操作, 而不是参数本身, 使得 GA 不受函数约束条件的限制。② GA 搜索过程是从问题解的一个集合开始, 不是从单个个体开始。③ 主要用到目标函数与约束关系的信息具有隐含并行搜索特性, 从而大大减小陷入局部极小的可能。④ 采用随机转换规则, 而非确定性规则。⑤ GA 具有全局搜索能力, 最善于搜索复杂问题和优化配置问题。

3.2 染色体编码

考虑到行波定位装置的配置状态可以用 0 或 1 表示其配置状态, 0 表示没有配置行波定位装置, 1 表示配置了行波定位装置, 所以染色体编码方式采用二进制方式, 系统节点个数 N 等于染色体的长度, 每个基因位置由节点编码方式进行确定, $x_i=1$ 表示节点 i 配置了一台故障行波测量装置, $x_i=0$ 表示节点 i 未配置测量装置($i=1, 2, \dots, N$)。故障行波定位装置优化配置问题解的维数就等于电力系统节点的个数, 并采用二进制编码, 即每一维二进制的编码取值只能是 0 或 1, 二进制编码如图 2。

1	2	3	...	$N-2$	$N-1$	N
0	1	0	...	1	0	1

图 2 二进制编码示意图

Fig. 2 Code diagram of binary

3.3 约束条件处理与适应度函数

对于行波定位装置的优化配置问题, 我们必须满足前述的两个约束条件, 使得系统中所有支路的故障行波信息都能被检测。在配置过程中如果存在不满足约束条件的方案, 本文将采用启发性方法对配置方案进行修复与处理。详细过程为: 首先在不

可观支路附近选择支路最多的一个节点，为其配置 1 台故障行波检测装置，由于配置了一台装置所以与该节点对应的染色体基因位置编码设置为“1”；然后再检测系统是否满足两个约束条件，如果依然不满足则重复进行上述修复处理过程，直到满足所有约束条件。通过对系统的修复与处理，行波定位装置的配置方案就被严格限制在约束条件的可行解内。

适应度函数反映了搜索的要求和目标，即要使得安装的行波定位装置数量最小，又要满足线路故障后能进行故障可靠定位。由于遗传算法要求适应度函数为最大值的表现形式，因此适应度函数设置为

$$F = C_{\max} - C_1 \sum_{i=1}^N X_i \quad (5)$$

式中： C_{\max} 表示为一个较大的数用来确保适应度函数的值大于 0； C_1 表示为一个比例系数。

3.4 基于遗传算法的行波定位装置优化配置步骤

图 3 提出了本文方法的优化配置流程，其具体优化步骤如下^[12]。

步骤 1: 读入电网系统的网络节点参数，约束条件关系及支路信息等数据，设置遗传算法参数具体包括种群的群体规模大小为 m ，算法进行迭代时进行的最大迭代次数为 T ，进行种群之间交叉的概率 P_c ，种群个体变异的概率 P_m 。

步骤 2: 由约束关系求解得初始解即为所需的初始种群，利用二进制编码对初始种群进行编码操作，同时令 $t=0, k=0$ ， m 个种群个体分别为 $x_i^1, x_i^2, \dots, x_i^m$ 。

步骤 3: 对当前群体中 m 个体分别进行的适应值 $F(x_i^1), F(x_i^2), \dots, F(x_i^m)$ 的计算，并依据计算得到的适应值大小对每个个体进行排序。

步骤 4: 在群体中按一定概率选择 m 个个体作为下一代种群的父本，其中个体被选择到的概率定义为

$$P_i = \frac{F(x_i^j)}{\sum_{j=1}^m F(x_i^j)}, i = 1, 2, \dots, m \quad (6)$$

选择过程中按概率复制具有适应度较高的染色体至下一代，其中邻接变电站数为 1 的变电站其基因编码一直为 1 即其概率为 1；

然后采用一致交叉运算，即染色体位串上的每一位按交叉概率 P_c 进行随机均匀交叉；

再对群体中的个体按照变异概率 P_m 进行变异运算，产生新一代群体变异概率一般取值很小，以保证种群发展的稳定性。

步骤 5: 对所有支路进行可观测性分析，若系

统完全可观，则转步骤 6，否则转步骤 3。

步骤 6: 如果 $t < T$ ，令 $t = t + 1, k = k + 1$ ，转步骤 3；否则转步骤 7。

步骤 7: 对方案进行优化辨别，若优化结果只有一种方案，则该方案为最优方案，若优化结果有多种方案，根据式(1)计算系统的冗余度，冗余度最大的方案为最优方案。

步骤 8: 输出通过遗传运算得到的最优配置方案，运算结束。

基于遗传算法的行波定位装置优化配置流程如图 4 所示。

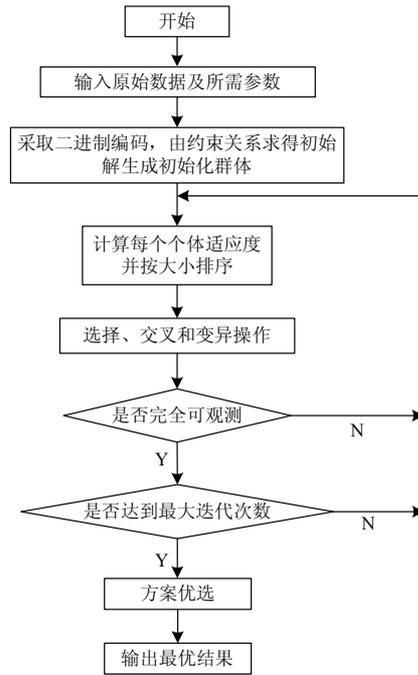


图 3 优化配置流程图

Fig. 3 Flow chart of optimal configuration

4 行波定位装置优化配置方案分析

以某 500 kV 电网系统为例进行行波定位装置优化配置方案分析用来验证配置方法的可行性，要求当电网中线路发生故障时能够对系统所有线路进行可靠故障定位。电网结构如图 4。

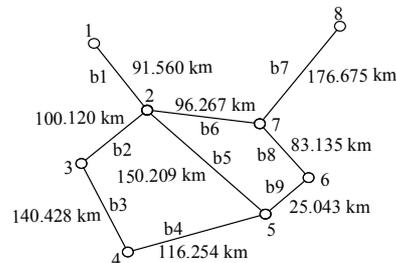


图 4 某 500 kV 电网结构

Fig. 4 Scheme of 500 kV power grid

4.1 行波定位装置优化配置

4.1.1 初步配置

图 4 所示电网结构关联矩阵为

$$A = \begin{pmatrix} x_1 & x_2 & x_3 & x_4 & x_5 & x_6 & x_7 & x_8 \\ 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 1 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 \end{pmatrix} \begin{matrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \\ x_4 \\ x_5 \\ x_6 \\ x_7 \\ x_8 \end{matrix} \quad (7)$$

根据关联矩阵以及约束关系式的建立, 对应约束关系式为

$$\begin{cases} f_1 = x_1 = 1 \\ f_2 = x_1 + x_2 + x_3 + x_5 + x_7 \geq 4 \\ f_3 = x_2 + x_3 + x_4 \geq 2 \\ f_4 = x_3 + x_4 + x_5 \geq 2 \\ f_5 = x_2 + x_4 + x_5 + x_6 \geq 3 \\ f_6 = x_5 + x_6 + x_7 \geq 2 \\ f_7 = x_2 + x_6 + x_7 + x_8 \geq 3 \\ f_8 = x_8 = 1 \end{cases} \quad (8)$$

对约束关系式求解得到初始配置方案为: 1、2、4、5、7、8 或 1、2、3、5、6、8 变电站进行行波信号检测装置的配置。

4.1.2 初始配置方案的优化

将得到初始配置方案: 1、2、4、5、7、8 编码方式为(1,1,0,1,1,0,1,1), 以及 1、2、3、5、6、8 编码方式为(1,1,1,0,1,0,1,1), 取群体规模 $m=80$, 遗传代数 $T=50$, 交叉概率 $P_c=0.8$, 变异概率 $P_m=0.05$, 代入基于遗传算法的行波定位装置优化配置程序, 对图 4 所示节点系统进行验证, 得到配置结果如表 1 所示(表 1 中 J 为最少配置数目, R 为冗余度)。

表 1 行波定位装置配置方案

Table 1 Configuration scheme of traveling wave fault location equipments

配置结果	J	R	行波定位装置配置节点
方案 1	4	11	1、4、6、8
方案 2	4	10	1、4、5、8

由表 1 可知图 4 所示节点系统行波定位装置最少配置数为 4 台, 方案 1 的冗余度较大, 所以变电站 1、4、6、8 配置行波定位装置的方案为最优方案。

4.2 配置方案的仿真分析

对上述得到的冗余度大且配置行波定位装置少的方案 1 进行 EMTP 仿真分析, 如图 4 在 8 个变电站中的 1、4、6、8 变电站进行行波故障定位装置的配置。假设 b4 这条线路距 5 为 40 km 的地方发生短路故障, 故障后产生的行波信号将沿着输电线路在整个电网中进行传播, 此时电网中配置了行波检测装置的 4 个变电站均可检测到故障行波信号和初始行波波头到达相应变电站的时间, 见时间记录表 2。行波定位主站通过接收各定位装置检测到的初始行波到达时间, 然后根据双端定位算法对故障进行定位, 故障定位计算详细步骤如下^[13]。

表 2 行波信号到达时间

站名	时间/ μs	站名	时间/ μs
1	945.81	6	221.63
4	256.75	8	1 092.12

1) 线路故障距离 d_{mn} 的计算: 以仿真的故障线路 b₄ 线路中的 4 号变电站作为参考的一端, 依次通过时间的前后顺序, 对 4 号变电站检测到的有效行波时间数据以及对侧变电站检测到的有效行波时间排成两个数组 X、Y, 表示为: t_4 和 t_1 、 t_6 、 t_8 , 依次取其中 2 个数组的数据按故障行波双端定位算法对故障距离计算, 得到故障点到 4 号变电站故障的距离为 d_{mn} , 具体结果见表 3。

表 3 故障定位计算结果

Table 3 Fault location result by calculation

进行故障定位用到的变电站		d_{mn}/km
变电站 m	变电站 n	
4	1	76.342
4	6	76.203
4	8	76.081

2) 为计算出的故障距离 d_{mn} 设置权重 R_i , 权重设置方法为: 设行波到达变电站 m 、 n 之间经过故障线路的最短路径中变电站的个数为 N (其中也包括变电站 m 及 n), 那么故障距离 d_{mn} 的权重 R_i 设置为 $1/(N-1)$ 。根据权重的设置方法可得故障距离的权重如表 4。

表 4 各故障距离的权重

Table 4 Weight of each fault distance

故障距离 d_{mn}	权重
d_{41}	1/3
d_{46}	1/2
d_{48}	1/4

3) 根据表 3 中的 d_{mn} 和表 4 中各故障距离的权重, 可计算出以 4 号变电站为参考端故障线路的故障距离 d 为

$$d = \frac{\sum_i R_i d_{mn}}{\sum_i R_i} = 76.218$$

综上所述: 运用网络行波故障定位方法可计算得故障点距离 4 号变电站的故障距离为 76.218 km, 测距误差仅为 36 m, 定位准确度比较高可靠性强。

对图 4 所示电网中所有线路的始端、中点和终端附近位置进行单相接地故障仿真得到表 5。由此可知上述的配置方案能对全网进行定位。

表 5 电网所有路线故障定位结果

Table 5 Result of fault location

线路	距离/km	始端附近	中端附近	终端附近
b1	故障点到变电站 1 的故障距离	1.000	50.000	90.000
	故障点到变电站 1 的折算故障距离	1.037	50.041	90.032
b2	故障点到变电站 2 的故障距离	1.500	50.000	95.000
	故障点到变电站 2 的折算故障距离	1.541	50.039	95.037
b3	故障点到变电站 3 的故障距离	2.000	70.500	135.000
	故障点到变电站 3 的折算故障距离	2.041	70.535	135.038
b4	故障点到变电站 4 的故障距离	1.500	55.000	115.000
	故障点到变电站 4 的折算故障距离	1.535	55.039	115.034
b5	故障点到变电站 5 的故障距离	2.000	75.000	145.000
	故障点到变电站 5 的折算故障距离	2.036	75.041	145.033
b6	故障点到变电站 7 的故障距离	1.000	50.000	95.000
	故障点到变电站 7 的折算故障距离	1.038	50.032	95.041
b7	故障点到变电站 8 的故障距离	2.000	85.000	175.000
	故障点到变电站 8 的折算故障距离	2.037	85.035	175.039
b8	故障点到变电站 6 的故障距离	1.000	40.000	80.000
	故障点到变电站 6 的折算故障距离	1.033	40.038	80.035
b9	故障点到变电站 5 的故障距离	1.000	12.000	24.000
	故障点到变电站 5 的折算故障距离	1.033	12.037	24.039

4.3 定位装置失效时的定位分析

当有某台装置失效, 例如装置 1、6 和 8 中任一装置失效时, b4 线路的故障依然可以由变电站 4 与其余正常装置所测得的故障行波到达时间来进行相应的故障定位计算。

假定装置 1 失效, b4 线路的故障依然可以由变电站 4、6 与 8 所测得的故障行波到达时间来进行相应的故障定位计算, 由表 3、表 4 的数据按故障距离计算公式可以计算得到故障点距离 4 号变电站的故障距离 d 为 76.162 km。

假定装置 6 失效, b4 线路的故障依然可以由变电站 1、4 与 8 所测得的故障行波到达时间来进行相应的故障定位计算, 由表 3、表 4 的数据按故障距离计算公式可以计算得到故障点距离 4 号变电站的故障距离 d 为 76.230 km。

假定装置 8 失效, b4 线路的故障依然可以由变电站 1、4 与 6 所测得的故障行波到达时间来进行相应的故障定位计算, 由表 3 与表 4 的数据按故障距离计算公式可以计算得到故障点距离 4 号变电站的故障距离 d 为 76.259 km。

可见, 当某台装置失效后, 仍能根据其他装置记录的行波到达时间进行可靠定位计算。

由上述分析可知本文方法的配置方案不仅能对系统所有支路可观测, 而且还能进一步通过冗余度综合考虑系统的经济性与可靠性, 相比于其余行波定位装置优化算法更具合理性。

5 结论

本文将遗传算法应用于行波定位装置优化配置中, 该算法可保证系统在可观测的前提下使得配置行波定位装置数量最少, 并引入冗余度综合考虑系统的经济性与可靠性, 相比于其他行波定位装置优化算法更具合理性。仿真分析验证了此算法的可行性。

参考文献

- [1] 尹晓光, 宋琳琳, 尤志, 等. 与波速无关的输电线路双端行波故障测距研究[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(1): 35-39.
YIN Xiaoguang, SONG Linlin, YOU Zhi, et al. Study of fault locating for transmission line double terminal traveling waves unrelated to wave speed[J]. Power System Protection and Control, 2011, 39(1): 35-39.
- [2] 张保会, 张嵩, 尤敏, 等. 高压直流线路单端暂态量保护研究[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(15): 18-23.
ZHANG Baohui, ZHANG Song, YOU Min, et al. Research on transient-based protection for HVDC

- lines[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(15): 18-23.
- [3] 韩昆仑, 蔡泽祥, 贺智, 等. 高压直流输电线路故障行波传播特性及其对行波保护的影响[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(21): 20-25.
HAN Kunlun, CAI Zexiang, HE Zhi, et al. Propagation characteristic of fault traveling wave on HVDC line and its influence on HVDC line traveling wave protection[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(21): 20-25.
- [4] 李传兵, 谭博学, 高鹏, 等. 基于D型行波原理的T接线故障测距方法[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(18): 78-82.
LI Chuanbing, TAN Boxue, GAO Peng, et al. A fault location method for T-connection lines based on D-type traveling wave theory[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(18): 78-82.
- [5] 钱海, 贾松江, 李治兵, 等. 基于历史故障波形的行波测距装置检验方法[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(16): 139-143.
QIAN Hai, JIA Songjiang, LI Zhibing, et al. Inspection of traveling wave fault location equipment based on the historical fault waveforms[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(16): 139-143.
- [6] 徐敏, 蔡泽祥, 刘永浩, 等. 基于宽频信息的高压直流输电线路行波故障测距方法[J]. 电工技术学报, 2013, 28(1): 259-265.
XU Min, CAI Zexiang, LIU Yonghao, et al. A novel fault location method for HVDC transmission line based on the broadband travelling wave information[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2013, 28(1): 259-265.
- [7] 李泽文, 姚建刚, 曾祥君, 等. 电网行波故障定位装置的优化配置[J]. 电力系统自动化, 2009, 33(3): 64-68.
LI Zewen, YAO Jiangang, ZENG Xiangjun, et al. Optimal placement of traveling wave fault location equipment for power grid[J]. Automation of Electric Power Systems, 2009, 33(3): 64-68.
- [8] 黄绪勇, 张文魁, 刘沛, 等. 电网行波故障定位装置的最优化配置及其改进算法[J]. 电力自动化设备, 2010, 30(1): 41-44.
HUANG Xuyong, ZHANG Wenkui, LIU Pei, et al. Optimal placement of travelling wave fault locating equipment and its improved algorithm[J]. Electric Power Automation Equipment, 2010, 30(1): 41-44.
- [9] 邓丰, 陈楠, 曾祥君, 等. 基于图论的电网故障行波定位装置最优配置算法[J]. 电力系统自动化, 2010, 34(11): 87-92.
DENG Feng, CHEN Nan, ZENG Xiangjun, et al. An optimal configuration algorithm for traveling wave fault location equipments in power grid based on graph theory[J]. Automation of Electric Power Systems, 2010, 34(11): 87-92.
- [10] 李小鹏, 何正友, 武骁, 等. 计及测量装置失效的输电网行波固有频率故障定位方法[J]. 电网技术, 2013, 37(5): 1217-1222.
LI Xiaopeng, HE Zhengyou, WU Xiao, et al. Natural frequencies based fault location method for transmission network considering measurement device invalidation[J]. Power System Technology, 2013, 37(5): 1217-1222.
- [11] BEDEKAR P P, BHIDE S R, KALE V S. Fault section estimation in power system using Hebb's rule and continuous genetic algorithm[J]. Electrical Power and Energy Systems, 2011, 33(3): 457-465.
- [12] HONG Y Y, CHEN Y Y. Placement of power quality monitors using enhanced genetic algorithm and wavelet transform[J]. IET Generation, Transmission & Distribution, 2011, 5(4): 461-466.
- [13] 曾祥君, 陈楠, 李泽文, 等. 基于网络的故障行波定位算法[J]. 中国电机工程学报, 2008, 28(31): 48-53.
ZENG Xiangjun, CHEN Nan, LI Zewen, et al. Network based algorithm for fault location with traveling wave[J]. Proceedings of the CSEE, 2008, 28(31): 48-53.

收稿日期: 2014-03-09; 修回日期: 2014-12-01

作者简介:

李泽文(1975-), 男, 博士, 副教授, 主要研究方向为电力系统继电保护与控制;

易志鹏(1989-), 男, 通信作者, 硕士研究生, 主要研究方向为电力系统及其自动化。E-mail: yizhipeng0808@163.com