

利用电弧特性的并行退火单端测距算法

胡少鹏¹, 徐鹏²

(1. 广东电网公司汕尾供电局, 广东 汕尾 516611; 2. 广东省电力学校, 广东 广州 510520)

摘要: 提出一种基于电弧特性进行单端故障测距的算法。仿真研究和实验室试验都表明, 电弧电流过零时电弧电压的梯度出现较大的波动。含有电弧电压在零区梯度信息的指标可以有效地反映故障位置。该文采用并行退火算法可以快速有效地提取出架空线路的故障点。仿真表明算法简单有效。

关键词: 故障测距; 模拟退火; 并行算法

中图分类号: TM744

文献标识码: A

文章编号: 1003-4897(2006)13-0005-04

0 引言

由于架空线路跨度大、自然环境复杂, 发生故障的机会较多。其中 80% ~ 90% 是由于闪络造成的暂时性故障。尽管可以通过快速重合闸的办法消除故障恢复供电, 但是却给系统留下了安全隐患。查找这类故障点较为困难。因此, 准确的故障定位可以有效地减少维护的工作量、提高线路的维护水平。

目前的故障测距方法很多^[1~5]。阻抗单端测距的方法由于使用的设备简单、信息量少、易于实现等特点受到广泛重视。但是单端阻抗法测距的精度不易提高, 重要原因在于模型误差。

有些研究认为^[5], 可以将电弧近似用恒阻抗描述, 利用稳态电气量进行故障测距。电弧等离子体的研究和电力系统试验都表明, 在频率较低的交流感性回路中, 尽管电弧电流接近正弦, 但是电弧电压畸变非常明显, 电弧等值模型应是时变的非线性阻抗。也有一些研究^[3]认为, 可以用流控方波电压源和恒阻抗串联描述电弧, 利用稳态电气量进行故障测距。大多数的实验研究表明, 电力系统的故障电弧电压接近于方波。但是这种方法需要假定电弧电流和本侧测量电流同相位。因此, 故障点离本侧越远, 测量误差越大。

本文在文献[1]的基础上, 利用电弧电压梯度作为故障判别依据, 并采用并行退火算法, 合理缩小搜索区间, 极大地提高了故障位置检测的效率和精度。

1 方法原理

1.1 电弧故障点的判别指标

输电线路上的交流电弧是热等离子体, 其内部

物理过程非常复杂。影响电弧性质的因素很多, 如: 空气的热导率、电弧长度、形状、辐射情况、对流情况、交流外回路的参数等。因此电弧的特性具有很大的分散性和不确定性。

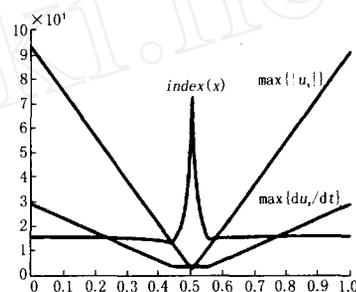


图 1 架空线路电压幅值、变化率和比值

Fig 1 Amplitude, the gradient and ratio of voltage on transmission line

但是一般研究认为, 交流电弧在电弧电流过零时, 由于阴极表面带正电的离子质量较大, 不易移动, 形成一个薄层, 阻碍电子的通过, 使电弧具有初始耐压强度, 冷却条件越好, 初始耐压强度越高。文献[6]研究了在气体环境下, 一维圆桶壁型交流电弧和外回路耦合的关系。研究表明, 在电源频率较低或电弧的热迟豫时间较短的情况下, 由于电弧的热存储能力较差, 电弧重燃后电压出现较大的再燃峰值电压。也就是说, 电弧电压在过零点附近具有较大的梯度。对电力系统输电线路的电弧测量表明, 电弧电压接近于方波, 并且在过零点具有较大的梯度。为了准确地判断电弧故障点的位置, 应结合电压过零点梯度信息作为故障点判别的依据。

为了避免线路上不同位置电压幅值的影响, 文献提出结合了电压幅值和电压过零点梯度信息的判别指标较好地解决了上述问题。

事实上,在电压稳定后,在 1~2 周波内取如下性能指标,即可收到很好的效果。

$$index(x) = \frac{\max(|du_x/dt|)}{\max(|u_x|)}$$

图 1 给出了在一个三相系统发生单相接地故障后,输电线路上的 $\max(u_x)$ 和 $\max(|du_x/dt|)$ 以及 $index(x)$ 的变化情况, $index(x)$ 最大的点准确地指明了故障发生位置。

在引入上述性能指标后,故障测距问题转化为如下数学问题:

$$\max index(x) = \frac{\max(|du_x/dt|)}{\max(|u_x|)}$$

st $0 \leq x \leq 1$

1.2 并行退火算法

并行退火算法的基本思想是在均匀设计的基础上,设计多个退火计算方案,根据各方案的收敛情况,通过区间估计合理缩小搜索区间,使算法具有较强的全局寻优能力、较快的收敛速度和较高的运算效率。

为使算法具有全局寻优能力,应使初始点尽可能均匀分布在整个区间上。对于一维问题这种分布较为简单。可以采用如下方法进行赋值:

$$x_j = \bar{x} + \frac{\bar{x} - x}{n-1} (j-1) \quad j=1, 2, \dots, n$$

其中: \bar{x} 和 x 为变量 x 取值区间的上限和下限, n 为试验次数。

对于给定的模拟退火模式,用上述方法产生一组序列 x_j 作为初始点,同时进行模拟退火计算,经 k 次运算后得到 n 个个体 x_j^k ($1 \leq j \leq n$),其目标函数分别为 $index(x_j^k)$ ($1 \leq j \leq n$)。对 n 个个体进行适应度分析,构造适应度函数:

$$v_j = \frac{index(x_j^k) - f_0}{\sum_{j=1}^n [index(x_j^k) - f_0]}$$

其中: f_0 取值只需保证 $index(x_j^k) - f_0$ 恒为正值。对于 n 个运算结果可按指定的选择率进行选择,并将被选中的个体顺序排列为 $\{i | 1 < i < n\}$ 。

根据被选中的具有较高适应度的个体分布状况进行区间估计:

$$\bar{x} = \max(i) + rand \cdot p \cdot [\max(i) - \min(i)]$$

$$x = \min(i) - rand \cdot p \cdot [\max(i) - \min(i)]$$

p 称为变异系数,取值一般为 1%~5%, $rand$ 为 (0~1) 之间的随机数^[7]。

按照给定的模拟退火模式,在新区间上重新均

匀分布初值,进行并行退火算法计算,直到区间小于指定值为止。对于一般的优化问题,文献 [7] 证明算法已接近于 1 的概率收敛于全局极大点。

由图 1 故障点判别指标的分布模式可知,故障点判别指标在故障点附近迅速增大,在其它位置变化较为平缓。采用初值均匀分布的并行退火算法并重新进行区间估计,不但可以保证在整个区间上开始搜索,而且可以极大地提高运算的效率和结果的精度。

同逐步搜索法相比,在达到相同精度情况下,两者运算量相差很大。为达到 10^{-5} 的精度,逐步搜索法须计算 100 000 次;并行退火算法以 5 个并行个体计算,每个个体计算 20 次,退火温度从 100 度到 1 度,退火速度 0.6 为例,算法经过 3 次区间更新,即可达到上述精度,计算量约为 1 800 次。

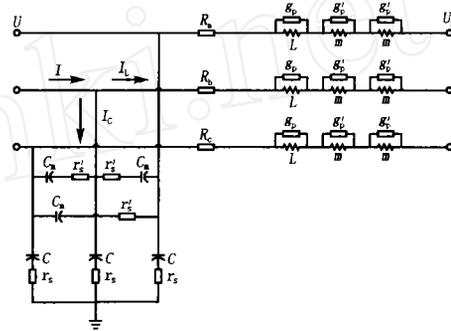


图 2 型网络计算电路

Fig 2 Computing circuit on model

1.3 网络模型和线路电压计算

经完好换位的三相高压电路型等值电路状态变量间满足如下基本关系:

$$I = \underline{L} + \underline{k} \quad (1)$$

$$I_c = C \frac{dU}{dt} \quad (2)$$

$$U_x = U - R \underline{I} - L \frac{d\underline{I}}{dt} \quad (3)$$

其中: $C = \begin{bmatrix} C_a & -C_m & -C_m \\ -C_m & C_b & -C_m \\ -C_m & -C_m & C_c \end{bmatrix}, L = \begin{bmatrix} L_a & m & m \\ m & L_b & m \\ m & m & L_c \end{bmatrix}$,

$$U = \begin{bmatrix} u_a \\ u_b \\ u_c \end{bmatrix}, I = \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix}$$

为保证算法稳定性,保证寄生震荡衰减,按照 EMTP 的约定,对电容支路串联小电阻(一般为 $r_s C_a = r_s C_m = \frac{0.15}{2} \Omega$);对电感支路并联小电导

($g_p L_a = g_p m = \frac{0.15}{2} t$, t 为积分步长),如图 2 所示。则上式变形为:

$$I = I_c + I_c \quad (4)$$

$$I_c = C \frac{dU}{dt} - \frac{0.15}{2} t \cdot I_c \quad (5)$$

$$U_x = U - R L_c - L \frac{dI_c}{dt} + \frac{0.15}{2} t \cdot U_L \quad (6)$$

采用梯形积分公式对上式进行递推求解。由(5)得到

$$I_c(t + t) = \frac{2}{1.15} C [U(t + t) - U(t)] - \frac{0.85}{1.15} I_c(t) \quad (7)$$

将(7)代入(6)得到:

$$U_x(t + t) = U(t + t) - R L_c(t + t) - \frac{2}{1.15} t \cdot L [I_c(t + t) - I_c(t)] + \frac{0.85}{1.15} [U(t) - R L_c(t) - U_x(t)] \quad (8)$$

由式(7)和(8),可以根据测量的高压母线电压和出线测量电流推算出线路任意一点的电压波形。

1.4 故障点 Mayr 电弧模型

考虑 Mayr 电弧模型一般形式:

$$\frac{dg}{dt} = \frac{1}{m} \left(\frac{u \cdot i \cdot g}{P_0} - g \right) \quad (9)$$

式中: u 为电弧电压; i 为电弧电流; P_0 为电弧弧柱总功率损失; g 为电弧电导。

由于在工频下,交流电弧的热迟豫时间较小,在交流电流和电压激励下,电弧电导迅速转变为稳态电导。此时电弧输入输出功率相等,有 $P_0 = G_s \cdot i^2$ 。(G_s 为稳态电导)Mayr 模型公式变为:

$$\frac{dg}{dt} = \frac{1}{m} (G_s - g) \quad (10)$$

在电力系统电弧分析中,Mayr 模型被广泛使用。实际问题是, P_0 和 m 都不是常数。如何取值可以使 Mayr 模型更接近于实际观测。

文献 [8] 通过大量仿真研究,给出了 m 和 G_s 的取值。

文献 [8] 认为 m 取值应由下式决定

$$m = \frac{l_p}{I_a}$$

式中: l_a 为电弧弧长 (cm),一般可取为爬电距离; I_a 为电弧电流幅值 (A); l_p 为常数 2.85×10^5 。

$$G_s = \frac{|i(t)|}{V_p l_p}$$

式中: $|i(t)|$ 为电弧电流绝对值; V_p 为单位长度电弧电压降落,一般取 $15 \sim 20$ V/cm。

Mayr 模型下,交流电弧波形见图 4。由于热迟豫时间较短,电弧波形具有快速上升的重燃电压。

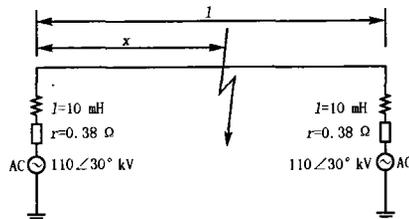


图 3 单相 RL 系统接线

Fig 3 Single phase system on RL model

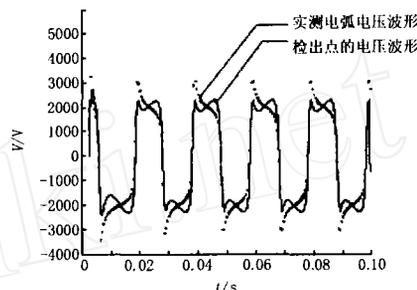


图 4 电弧电压和计算点电压波形

Fig 4 Arc voltage and the voltage wave on computing fault location

2 算例

2.1 两端电源系统单相 RL 等值线路模型系统仿真

本文首先在 EMTP 下对图 3 所示系统进行了仿真,系统参数如图所示。

表 1 单相交流系统电弧性接地测量结果

Tab 1 Results of location for arc fault on single phase system

故障点 / km	10	20	30	40	50	60	70	80	90
计算值 / km	10.118	20.167	30.201	40.253	50.307	60.348	70.374	80.441	90.525
误差 / (%)	1.18	0.83	0.67	0.63	0.61	0.58	0.53	0.55	0.58

2.2 两端电源系统三相 型等值电路模型系统仿真

本文对 型线路三相系统进行了发生单相电弧性接地和两相电弧短路的系统进行仿真,并采用并行退火算法进行了故障测距,取得了较为满意的结果。

两端电源三相系统网络结构与图 3 相同。系统参数如下:

$$U_M = 150 \text{ } 30^\circ \text{ kV}, U_N = 150 \text{ } 0^\circ \text{ kV}, m = m_1 = 0.38, l_m = l_n = 10 \text{ mH}$$

表 2 三相交流系统电弧性单相接地仿真测量结果

Tab 2 Results of location for single phase to earth arc fault on three phase AC system

故障点 /km	10	20	30	40	50	60	70	80	90
计算值 /km	10.124	20.160	30.200	40.138	50.215	60.228	70.160	80.154	90.316
误差 / (%)	1.24	0.80	0.67	0.35	0.43	0.38	0.23	0.19	0.35

表 3 三相交流系统电弧性两相短路仿真测量结果

Tab 3 Results of location for two phase arc fault on three phase AC system

故障点 /km	10	20	30	40	50	60	70	80	90
计算值 /km	10.083	20.102	30.093	39.894	50.142	60.082	70.059	80.074	89.972
误差 / (%)	0.83	0.54	0.31	-0.35	0.28	0.14	0.084	0.084	-0.04

2.3 测量结果分析

电弧研究表明,输电线路闪络短路时,电弧伏安特性是非线性的^[1,6],用恒定阻抗来等值误差较大。本文利用 EMTF 系统在 Mayr 模型下,对具有 10 kV 残压的电弧短路情况进行动态仿真,这种情况更接近于输电线路发生闪络故障的实际情况。

随后进行的故障测距表明:在两侧系统具有一定功角差的情况下,算法具有较高的测量精度。通常单端阻抗法测距在线路近端短路时误差较大^[9,10];另外,随着故障增大,靠近对侧系统发生短路时单端阻抗测距方法的测量误差也会增大^[9,10]。与单端阻抗法相比,测量精度受短路位置影响较小,在整条输电线路路上,测量误差分布较为平稳,靠近两端短路时测量的相对误差不大于 1.5%。

3 结论

本文采用结合电压过零点梯度和电压幅值信息作为故障点判别的依据,并用并行退火算法快速寻找故障点,极大地提高了计算效率。同逐步寻找方法相比,计算精度提高一个数量级,运算时间缩短为五分之一。

总体上说,这种算法不需要假设,故障电流和本侧电流同相位,从而避免由于这种假设而带来的原理误差。本算法具有较高的精度。

本算法取数值震荡稳定后,若干周期内线路电压梯度的极大值和相应电压极大值的比值作为判别指标。从图 1 看出,线路电压梯度的极大值在故障点附近区间上非常接近(其分散区间与电感量有关,电感量越大,分散区间越大),判别指标的变动主要取决于电压极大值变化。从仿真运行效果来看,检测出的点电压波形比真正的故障点电压波形更接近于方波。因此在电弧电压与方波相差较大时,算法会带来较大误差。

从前式(7)、(8)可以看出,根据测端电流和电

压估算电容电流和电感电压时,测端电流和电压的差分误差被迅速放大。为保证算法稳定性,应保证测量电压和电流的精度和不太小的步长。

今后应加强电弧特性研究,寻找更有效的电弧判别指标,避免电弧电压非方波带来的系统误差。

参考文献:

- [1] 古国金,徐国正,钱家骊. 故障电弧特性及在线路故障中的应用[J]. 高电压技术, 1998, 24(2): 73-75.
GU Guo-jin, XU Guo-zheng, QIAN Jia-li Characteristics of Fault Arcs and Its Application for Fault Location in Transmission Lines[J]. High Voltage Engineering, 1998, 24(2): 73-75.
- [2] Zoric K J, Djuric M B. Arcing Fault Detection on Overhead Lines from the Voltage Signals Electrical Power & Energy Systems[J]. 1997, 19(5): 299-303.
- [3] Radojevic ZM, Terzija V V. Numerical Algorithm for Overhead Lines Arcing Fault Detection and Distance and Directional Protection[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 2000, 15(1): 31-37.
- [4] Djuric M B, Radojevic ZM. Time Domain Solution of Fault Estimation and Arcing Faults Detection on Overhead Lines[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 1999, 14(1): 60-67.
- [5] Adu T. A New Transmission Line Fault Location System[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 2001, 16(4): 498-503.
- [6] 荣陞. 交流电弧的外回路对弧柱特性的影响[J]. 力学学报, 1982, 9(5): 461-468.
RONG Sheng Effects of AC Arc's External Circuit on Arc Column Character[J]. Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics, 1982, 9(5): 461-468.
- [7] 高齐圣,张嗣瀛,潘德惠,等. 参数设计的模拟退火并行算法[J]. 系统工程理论与实践, 2000, 8(8): 41-45.
GAO Qi-sheng, ZHANG Si-ying, PAN De-hui, et al Simulated Annealing Concurrent Algorithm of Parameter Design[J]. System Engineering Theory & Practice, 2000, 8(8): 41-45.
- [8] Johns A T, Aggarwal R K, Song Y H. Improved Techniques for Modelling Fault Arcs on Faulted EHV Transmission Systems[J]. IEE Proc—Gener, Transm, and Distrib, 1994, 41(2): 148-154.
- [9] 吴萍,张尧. 基于单端电气量的故障测距算法[J]. 电力系统及其自动化学报, 2003, 15(4): 5-7.

(下转第 12 页 continued on page 12)

- (10): 9-12
- [2] 王敏, 丁明. 含分布式电源的配电系统规划 [J]. 电力系统及其自动化学报, 2004, 16(6): 5-8
WANG M in, DING M ing Distribution Network Planning Including Distributed Generation [J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2004, 16(6): 5-8
- [3] 王明俊, 刘广一, 于尔铿. 配电系统自动化及其发展 [J]. 电网技术, 1996, 20(12): 62-65.
WANG M ing-jun, LIU Guang-yi, YU Er-keng Distribution Automation System and Its Development [J]. Power System Technology, 1996, 20(12): 62-65.
- [4] Girgis A, Brahma S Effect of Distributed Generation on Protective Device Coordination in Distribution System [A]. Proceedings of 2001 IEEE PES Summer Meeting 2001.
- [5] 刘健, 杜宇, 等. 配电网故障区段判断和隔离的矩阵算法 [J]. 电力系统自动化, 1999, 23(1): 31-33.
LIU Jian, DU Yu, et al A Unified Matrix Algorithm Fault Section Detection and Isolation in Distribution System [J]. Automation of Power Electronics, 1999, 23(1): 31-33.
- [6] Urdaneta A J, Nadira R, Perez L G Optimal Coordination of Directional Overcurrent Relays in Interconnected Power Systems [J]. IEEE Trans on Power Delivery, 1988, 3(3): 903-911.

收稿日期: 2005-12-28; 修回日期: 2006-01-15

作者简介:

张超 (1977 -), 男, 硕士, 主要从事电力系统继电保护及自动化的研究与工作; E-mail: zhangchao_2008@163.com

计建仁 (1972 -), 男, 硕士, 主要从事电力系统继电保护及自动化的技术管理工作;

夏翔 (1974 -), 男, 硕士, 主要从事电力系统自动化以及运行管理工作。

Effect of distributed generation on the feeder protection in distribution network

ZHANG Chao, JI Jian-ren, XIA Xiang

(Hangzhou Electric Power Bureau, Hangzhou 310009, China)

Abstract: As an efficient and clean power generation technology, distributed generation develops very fast recently. Gradually increased distributed generation in the power system will badly affect the present network's structure, its short current strength, current direction and distribution and consequently bring distribution network substantial challenges and new requests on its coordination and control. To enhance power supply reliability and power quality, this paper details the effects of distributed generation on the feeder protection and its operation behavior in the distribution network.

Key words: power system; distributed generation; feeder protection; distribution network

(上接第 8 页 continued from page 8)

2003, 31(6): 42-45.

- WU Ping, ZHANG Yao Location Using One Terminal Data for Transmission Line [J]. Proceedings of the EPSA, 2003, 15(4): 5-7.
- [10] 安艳秋, 高厚磊. 基于分布参数线路模型的精确故障测距算法 [J]. 继电器, 2003, 31(6): 42-45.
AN Yan-qiu, GAO Hou-lei An Accurate Fault Algorithm Based on Distributed Parameter Line Model [J]. Relay, 2003, 31(6): 42-45.
- 收稿日期: 2006-01-14; 修回日期: 2006-03-25
- 作者简介:
- 胡少鹏 (1966-), 男, 电气高级工程师, 从事电网规划、建设、运行及技术管理工作; E-mail: epyqliu@scut.edu.cn
- 徐鹏 (1971-), 男, 讲师, 从事电力系统继电保护研究工作。

A new annealing concurrent computing algorithm for fault locating based on the characteristic of arc

HU Shao-peng¹, XU Peng²

(1. Shanwei Power Supply Bureau, Guangdong Power Grid Corporation, Shanwei 516611, China;

2. Guangdong Electric Power School, Guangzhou 510520, China)

Abstract: This paper proposes a new fault location method on the basis of the characteristic of arc. According to a simulation test and experimental data, the gradient of the arc voltage is large when the arc current passes through zero. An index within the gradient information of the arc voltage on the local region of zero can reflect fault location effectively. A simulated annealing concurrent computing algorithm is adopted to fast and effectively locate the fault points of overhead transmission line. The result shows the method is simple and effective.

Key words: fault location; simulated annealing; concurrent algorithm