

10kV 线路故障测距模拟退火算法应用

闫钊 李尔学 辽宁工学院自控系 锦州 (121001)

杨仕友 浙江大学电机系 杭州 (310027)

【摘要】 为解决小电流接地系统故障测距问题,以10kV配电网为具体研究对象,对故障率最高的单相接地故障进行了分析研究,建立了网络故障状态下的数学模型,并首次将模拟退火算法应用到小电流接地系统的故障测距问题中,解决了算法应用中的一系列问题,取得了令人满意的计算结果,其测距误差远小于技术要求值。

【关键词】 小电流接地系统 故障测距 模拟退火算法 (SA算法)

引言

故障测距亦称故障定位,指电力系统发生故障时确定故障点位置。目前,针对110kV及以上电压等级的大电流接地系统的基于不同方法、不同原理的各种微机故障测距方法已提出很多,这方面的文献也很多。但对于35kV及以下电压等级的小电流接地系统微机故障测距方法的报道却很少,有待于进一步研究。

小电流接地系统由于网络结构比较复杂,分支多,线路参数不连续等因素的影响,制约了微机测距技术的应用。本文在对已有测距方法进行研究的基础上,对10kV网络进行了细致考查,提出了10kV线路单相接地短路故障测距的新方法,即引进智能化的故障辨识技术,进行故障测距。

1 故障测距的模拟退火算法

模拟退火算法简称SA算法,是一种随机的搜索方法。这种算法的显著特点为(1)不仅具有“下山性”,而且具有“上山性”,在迭代过程中可以取坏值,且随着控制参数的逐渐减小,这种可能性逐渐减小到零;(2)新值的取舍由概率决定;(3)所选取的新值在统计上

满足一定的概率分布。这样算法能够跳出局部最优解区域而收敛于全局最优解,因此它的出现被称为优化思想的一场革命,而且问题越复杂,越显示出其优越性。

SA算法的主要步骤可描述如下:

PROCEDURE SA—algorithm (X_0, T_0);

{ X_0 为任一初始状态, T_0 为控制参数初值 }

(1) $X_k := X_0; j := 0$

(2) REPEAT

(2.1) REPEAT

(2.1.1) $X_{K+1} := \text{generate}(X_K)$;

(2.1.2) IF $f_{K+1} < f_K$ THEN $X_K := X_{K+1}$

ELSE IF accept (X_{K+1}, X_K) THEN

$X_K := X_{K+1}$;

(2.1') UNTIL 'inner-loop stop criterion'

(2.2) $T_{j+1} = \text{update}(T_j); j := j + 1$

(2') UNTIL 'final stop criterion'

此算法中第(1)步是初始化工作。第(2.1.1)步的 $\text{generate}(X_K)$ 函数是指从 X_K 的邻域中随机地产生下一个状态 X_{K+1} 。若 $f_{K+1} < f_K$, 则接收 X_{K+1} 为新的当前状态; 否则仅以一定的概率接收 X_{K+1} 为新的当前状态。这就是 $\text{accept}(X_{K+1}, X_K)$ 函数的功能。算法中(2.1')的 'inner-loop stop criterion' 是指SA算法在每一控制参数 T_j 下的迭代次数。(2') 则描述了整个算法应在何时结束。算法的(2.2)步是表示控制参数 T_j 每次下降的速率, 它用 $\text{update}(T_j)$ 函

数表示。

SA 算法在实际应用中,有一些参数的选值对算法的性能有重要影响,需逐个研究确定。

1.1 连续变量的离散处理

由于 SA 算法最初是为求解组合优化问题而提出的,故它擅长处理变量不连续的优化问题。对于连续变量,一般都事先将自变量在可行域内离散为有限个采样点,在迭代过程中随机选取这些点。这种方法的一个缺点是存储这些采样点需较大的计算机内存,另一个不足是使用人员必须事先给出自变量的有限个离散点,而在问题求解之前对目标函数的形态、分布等不甚了解时,这些离散点只能是在整个求解区域内均匀给出而不能有所侧重,尤其是当使用者对所求问题的领域知识了解得比较少时,情况更是如此。因此本文采用的处理方法是,不事先给出自变量的有限多个离散点,仅给出一定步长向量 SP,根据步长向量 SP,在迭代过程中随机地产生新的状态点。具体过程如下:

首先,根据优化变量的上下界,给出步长向量的初始值 SP_0 ,设变量 X_h 的上、下界分别为 a_h 和 b_h ,则初始步长向量的第 i 个分量为

$$SP_h = \frac{1}{2} (b_h - a_h) \quad (1 \leq h \leq N)$$

在迭代计算中,新值的选取按如下公式:

$$X_{K+1} = X_K + rSP_h$$

式中 r 为区间 $[-1, 1]$ 内的随机数; SP_h 为步长向量在 h 方向上的分量; h 为随机变化自变量的 h 分量。

1.2 控制参数初值的选取

从理论上讲,为避免使算法陷入局部极值点,控制参数初值 T_0 应该选得足够大。但如果该值选得过大,就会增加算法的迭代次数。对于电力系统问题来说,每增加一次循环迭代,都需增加若干次解复数方程的计算,大大增加了计算时间。因此最好的选择是在保证算法不陷于局部极值点的条件下,取最小的控制参数初值。为此本文主要采用如下做法:

试运行 SA 算法,为保证算法在开始搜索时能在整个可行域内均匀地搜索,应使所产生的新状态全部被接受,从而得到控制参数初值。

计算实例表明,本文采用的这种处理方法,能够在保证收敛于全区间最优解的条件下,得到较小的控制参数初值,即把计算量减小到了较低程度。

1.3 冷却调度

冷却调度指的是控制参数 T_j 的下降速率。文献^[2]给出了 SA 算法收敛到全局最优解的一个充分条件,即 SA 算法只有在 T_j 以 $\ln j$ 的速率下降时,才收敛到全局最优值。在实际应用中,这么慢的下降速率是难以接受的,因此必须采用一些近似的方法。Aarts 等人^[3]根据大量的模拟实验证明:只要状态空间的概率分布在每一控制参数 T_j 下都接近拟平稳分布,则 T_j 的变化不一定非得遵从 $\ln j$ 的下降速率,这时 SA 算法仍可产生令人满意的近似最优解。在大多数的实际应用中,一般都取 $T_{j+1} = T_j$,其中 α 在 $0.8 \sim 0.99$ 之间。这种方法的优点是形式简单, T_j 下降较快;其缺点是 α 的选取依不同的问题而异,没有一个比较统一的选择方法。不同的问题要求的 α 值可能相差很大。而且 α 值一旦取定,在算法执行时就不能再改变。本文取 $\alpha = 0.85$ 。

1.4 SA 算法的终止条件

SA 算法的迭代终止判据,从理论上讲只有当控制参数减小到“0”时 SA 算法才能收敛于全局最优点。因此有的文献将算法的终止条件,给定为控制参数 T_j 小于某一足够小的正数。实际上这样做既不科学,又增加了计算工作量,而且对于不同的问题,这个数也不尽相同,为了提高 SA 算法的计算效率,本文采用文献^[4]的处理方法,根据目标函数和方差的变化情况来判是否终止 SA 算法的执行。即当控制参数 T_j 比较小,再继续变化时,目标函数不再有改善,方差基本上不变时,便终止迭代。用数学公式表示为:

$$|f_K - f_{K-p}| < \epsilon \quad (P = 1, 2, \dots, N_p)$$

$$|f_k - f_{opt}| <$$

$$|f_{i-} - f_{i-q}| < \quad (q=1, 2, \dots, N_q)$$

式中 ϵ 和 δ 为给定的一个很小的正数; f_k 为第 k 次改变控制参数后最后一次搜索到的目

标函数值; N_p, N_q 是给定的相邻控制参数的变化次数; f_{i-} 为第 i 个控制参数下目标函数的方差。

2 故障自动辨识技术及实例

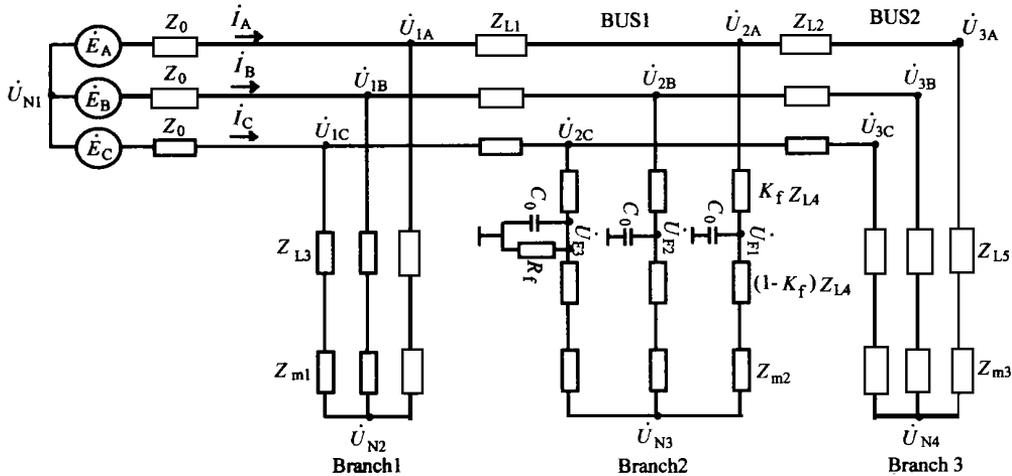


图1 10kV 网络单相接地故障模型

图1是具有三个分支线路的某10kV网络当分支线路2发生C相接地故障时的示意图。图中BUS₁、BUS₂为主干线路 Branch1、2、3为三条分支线路。线路参数见表1

表1 10kV 网络线路参数

线路	型号	线路阻抗(/km)	线路长度(km)
BUS ₁	LG-50	$Z_{L1} = 0.65 + j0.365$	20
BUS ₂	LG-50	$Z_{L2} = 0.65 + j0.365$	20
Branch ₁	LG-35	$Z_{L3} = 0.85 + j0.373$	10
Branch ₂	LG-35	$Z_{L4} = 0.85 + j0.373$	5
Branch ₃	LG-35	$Z_{L5} = 0.85 + j0.373$	5

电源等效内阻 $Z_0 = 0.325 + j0.1825$,线路等效对地电容 $C_0 = 0.0094\mu\text{F}/\text{km}$,负载阻抗 $Z_{m1} = 91.8 + j122.4$, $Z_{m2} = 295.35 + j264.6$, $Z_{m3} = 722.3 + j844.43$ 。 R_f 为发生单相接地故障时伴随的接地电阻(变量), K_f 为故障点距该分支线路首端的距离与该分支线路全长之比(变量), U_{N1} 、 U_{N2} 、 U_{N3} 、 U_{N4} 为中性点电压。

根据图1,应用节点电压法,我们可以建立分支2发生C相接地故障时的数学模型(共16

个电压平衡方程式,这里从略)。同理,可写出主干线路及其它分支线路发生单相接地故障时的数学模型。

当单相接地故障发生时,在变电所出口处可测得故障状态下的电压 \dot{U}_{1A} 、 \dot{U}_{1B} 、 \dot{U}_{1C} 和电流 i_A 、 i_B 、 i_C 值。它反映的是某一确定位置和方式下的故障电压、电流值。我们根据前面建立的数学模型用计算机仿真,不断改变故障分支、故障相、故障点位置参数 K_f 及接地电阻 R_f ,进行多次组合,寻找与测出的电压、电流非常接近的计算值,即可找到对应的故障点参数。显然这是个多变量组合寻优问题,为此我们应用最小二乘法原理,建立变电所出口处测得的电压、电流与数学模型上求得的电压、电流之差平方和为最小的目标函数,即

$$F = (\dot{U}_{\text{测}} - \dot{U}_{\text{计}})^2 + (i_{\text{测}} - i_{\text{计}})^2$$

求 F_{\min}

应用模拟退火算法,找出目标函数,从而得到要求的故障点参数,即故障分支、故障相、故障点位置及接地电阻 R_f 。

本文实例应用模拟退火算法进行故障辨识的辨识结果如表2所示。

表 2 故障辨识结果

序号	故障点参数				辨识结果			
	故障分支	故障相	接地电阻(Ω)	故障距离 K_f	故障分支	故障相	接地电阻(Ω)	故障距离 K'_f
1	1	C	20	0.6	1	C	20.002	0.600002
2	1	C	50	0.6	1	C	50.010	0.600002
3	1	C	100	0.6	1	C	100.04	0.600002
4	1	C	200	0.6	1	C	200.14	0.600001
5	3	C	20	0.6	3	C	20.003	0.600003
6	3	C	50	0.6	3	C	50.017	0.600003
7	3	C	100	0.6	3	C	100.06	0.600003
8	3	C	200	0.6	3	C	200.27	0.600003
9	5	C	20	0.6	5	C	20.037	0.599987
10	5	C	50	0.6	5	C	50.113	0.600002
11	5	C	100	0.6	5	C	100.61	0.600001
12	5	C	200	0.6	5	C	200.27	0.600000
13	2	C	100	0.2	2	C	98.95	0.200059
14	2	C	100	0.4	2	C	100.16	0.400080
15	2	C	100	0.6	2	C	100.09	0.600012
16	2	C	100	0.8	2	C	100.01	0.800015
17	4	C	100	0.2	4	C	100.05	0.200002
18	4	C	100	0.4	4	C	100.21	0.399998
19	4	C	100	0.6	4	C	100.29	0.600006
20	4	C	100	0.8	4	C	100.37	0.799999

注: 表中故障分支一栏中,1和2表示BUS₁和BUS₂,3~5表示Branch₁~Branch₃

表2为C相发生接地故障时的辨识结果,A相或B相故障时有类似的对应值。

3 总结

本文应用SA算法对解决小电流接地系统故障测距问题做了初步尝试,经过对算法的不断改进,使运算速度及精度大大提高,完成一次故障辨识工作由最初的5~6h到最终只需3~4min,其故障分支及故障相辨识准确,故障距离辨识结果的误差远小于技术要求值(见表2辨识结果),显示出较好的应用前景。

参考文献

- 1 Kirkpatrick S et al. Optimization by simulated annealing. Science, 1983, 220: 671~680.
- 2 Mitra D et al. Convergence and finite-time behavior of Simulated annealing, 1986, 18: 747~771.

- 3 Aarts E. H. L. and Van Learhoken P. J. M. Statistical cooling: a general approach to combinatorial optimization problems. Philips, 1985, 40(4): 193~226.
- 4 Yang Shi you. Combined strategy of simulated Annealing and Genetic algorithm for Inverse Problem. COMPOMA G95, Berlin: 1995.
- 5 王强. 模拟退火算法的改进及其应用. 应用数学, 1993, 6(4): 392~397.

闫钊,女,39岁,付教授,硕士,主要研究方向为电气技术与自动化。

李尔学,男,58岁,教授,主要研究方向为电力电气技术与自动化。

杨仕友,男,34岁,博士后,主要研究方向为电工基础理论。

(下转 21 页)

何一幅图表及其所有操作均被封装在一个框架内, 表现为屏幕上的一个框架窗口, 而由一幅图中某一对象 (如线路), 可以点 (以鼠标) 出描述该子对象的另一幅图表。图形及其图形对象均按层次组织, 如某一测控设备 (杆上 RTU) 在图中以一个“测控点”表示。该测控点的状态 (以不同颜色表示) 表示其所包含的所有遥测或遥信量的总的状态。但用户也可点出该测控点的详细内容。

总之, 由于自动绘图系统及其自动维护的设备属性数据库为 SCADA 及 GIS 系统所共享, 真正做到了 SCADA 与地理信息系统的高度集成, 同时保证了 SCADA 系统实时性能。

SCADA 与实时数据库之间采用了运行时客户/服务器方式的连接。实时数据库作为独立的进程, 运行于每一个工作站节点, 随时准备为多个应用程序提供服务。SCADA 可通过管道向实时数据库发送查询请求 (包括单个查询、批量查询、记录查询、表查询等), 而实

时数据库负责按请求查询结果, 并将结果集通过管道或共享内存文件发回给 SCADA。这种方式既保证实时查询速度, 同时又保证了程序之间的相对独立性, 便于维护和扩展。

4 结论

本文以山东潍坊电业局城网配电自动化工程的开发研究为背景。所开发的配电自动化系统即将投入运行。文中描述的基于地理信息的配网 SCADA 子系统在整个系统中是难点和关键。我们所提出的设计思想已成功地运用于这一系统的开发过程。关于其他各子系统, 我们将分别另文专述。

参考文献

- 1 Trudeau D, Hoffman, Seamour M. A. Integrating AM/FM Maps with Distribution SCADA. IEEE Transaction on Power Delivery, 1990, 5 (2).
- 2 王明俊, 于尔铿, 刘广一. 配电系统自动化及其发展 (一) ~ (七). 电网技术, 1996, (7) ~ 1997, (1).

RESEARCH ON A DISTRIBUTION NETWORK SCADA SYSTEM BASING ON GEOGRAPHICAL INFORMATION

Meng Shaoyong et al (Shandong Industrial University, Jinan, 250014)

Abstract The main features of distribution network are analyzed according to the research on a layered automation system of distribution network. The design and realization of SCADA software system based on geographical information are introduced.

Keywords Distribution network automation SCADA Geographic information

(上接 17 页)

APPLICATION OF SIMULATED ANNEALING ALGORITHM IN FAULT- LOCATION OF 10kV POWER TRANSMISSION LINES

Yan Tian, Li Erxue (Liaoning Industrial College Jinzhou, 121001)

Yang Shiyong (Zhejiang University, Hangzhou, 310027)

Abstract The aim of this paper is to solve the problem of Fault - Location in weak Current Connecting to Earth System, it chooses the electric power distribution network of 10kV as its subject. It analyses and researches a single - phase connecting to earth 's fault that has the highest fault ratio and form mathematical model under network fault state.

The Simulated Annealing Algorithm is applied to fault - location in weak current connecting to earth system for the first time. It solved a series of problems in applying Simulated Annealing Algorithm. It 's proved by the simulating experiment that the Location Error of Fault recognition is far less the requirement.

Keywords weak current to earth system Fault - Location Simulate Annealing Algorithm