

[文章编号] 1003-4684(2019)05-0056-04

基于 EMTR 和 PSO 的输电线路故障定位

艾轩源¹, 刘 辉¹, 曹宝玉², 谭 畅³

(1 湖北工业大学电气与电子工程学院, 湖北 武汉 430068;

2 国网大冶供电公司, 湖北 大冶 435100; 3 国网湖北检修公司, 湖北 武汉 430050)

[摘 要] 引进电磁时间反演技术来进行故障定位。当输电线路发生单相接地故障时, 利用电流波动方程时间反演的特性, 计算出故障点电流能量值, 通过能量极值点与故障距离的关系可以实现高精度的故障定位, 且几乎不受故障电阻的影响。

[关键词] 电磁时间反演; 输电线路; 故障定位; 过渡电阻

[中图分类号] TM773

[文献标识码] A

传统输电线路故障定位的研究方法主要有故障分析法和行波法两大类^[1]。文献[2-4]都是利用故障分析法进行故障定位: 先建立合适的输电线路模型再根据母端测量的电压和电流数据来求解方程计算出故障距离, 该方法的实验结果容易受到过渡电阻的影响, 而且对线路参数非常敏感。文献[5-7]都是利用行波法进行故障定位, 通过电流或者电压的行波特性来识别波头并根据行波测距的公式计算出故障距离, 行波法的局限性也非常明显, 其中单端行波法难以识别反射波头, 而双端行波法要求测量数据时间高度同步。本文考虑应用粒子群算法(PSO)与电磁时间反演技术相结合, 克服传统故障定位方法带来的问题。

1 EMTR 和 PSO 的原理

1.1 EMTR 原理

电磁时间反演(EMTR)是指时域信号在时间轴上逆转传递过程, 在信号源的地方会发生时空同步聚焦的现象^[8-10]。可以利用图 1 所示输电线路的分布参数模型来证明输电线路上的电压和电流的波动方程是符合 EMTR 的条件。

在该电路中, 结合基尔霍夫电流、电压定律有:

$$\begin{aligned} & u(x, t) - R\Delta x i(x, t) - \\ & L\Delta x \frac{\partial i(x, t)}{\partial t} - u(x + \Delta x, t) = 0 \quad (1) \\ & i(x, t) - G\Delta x u(x + \Delta x, t) - \end{aligned}$$

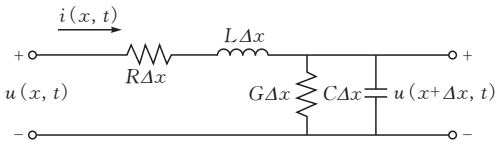


图 1 输电线路分布参数等效模型

$$C\Delta x \frac{\partial u(x + \Delta x, t)}{\partial t} - i(x + \Delta x, t) = 0 \quad (2)$$

由式(1)和式(2)可得:

$$\frac{\partial u(x, t)}{\partial x} = -Ri(x, t) - L \frac{\partial i(x, t)}{\partial t} \quad (3)$$

$$\frac{\partial i(x, t)}{\partial x} = -Gu(x, t) - C \frac{\partial u(x, t)}{\partial t} \quad (4)$$

对于无损线路而言, 满足 $R=0, G=0$, 由式(3)和式(4)可得电压的波动方程

$$\frac{\partial^2 u^2(x, t)}{\partial x^2} - LC \frac{\partial^2 u(x, t)}{\partial t^2} = 0 \quad (5)$$

当用 $-t$ 来代替式(5)中的 t 时有

$$\frac{\partial^2 u^2(x, -t)}{\partial x^2} - LC \frac{\partial^2 u(x, -t)}{\partial t^2} = 0 \quad (6)$$

当 $u(x, t)$ 为波动方程式(5)的解时, $u(x, -t)$ 也是波动方程式(5)的解。因此, 电压行波在无损线路上传播时, 电压波动方程满足 EMTR 的对称性。

1.2 PSO 原理

PSO 算法是一种模拟鸟类捕食过程的智能优化算法, 每个粒子都被视为优化问题的假定解, 不同的粒子都有相应的适应度函数值。粒子的速度与其运动方向和距离息息相关, 同时单个粒子的速度可以进行自适应动态调整, 最终实现整个空间的寻优

[收稿日期] 2019-06-27

[第一作者] 艾轩源(1989-), 女, 湖北鄂州人, 湖北工业大学硕士研究生, 研究方向为电气工程

[通信作者] 刘 辉(1962-), 男, 湖北武汉人, 工学博士, 湖北工业大学教授, 研究方向为电气工程

过程。每个粒子都用位置、速度和适应度值来表示,适应度值决定该粒子的好坏。

在 D 维的空间中,对于含有 n 个粒子的种群 $\mathbf{X}=(\mathbf{X}_1,\mathbf{X}_2,\cdots,\mathbf{X}_n)$,其中第 i 个粒子为 $\mathbf{X}_i=(x_{i1},x_{i2},\cdots,x_{iD})^\mathrm{T}$, \mathbf{X}_i 表示该粒子的位置即为优化问题的一个假定解。第 i 个粒子的速度可以表示为 $\mathbf{V}_i=(V_{i1},V_{i2},\cdots,V_{iD})^\mathrm{T}$,粒子个体极值可以表示为 $\mathbf{P}_i=(P_{i1},P_{i2},\cdots,P_{iD})^\mathrm{T}$,种群极值可以表示为 $\mathbf{P}_g=(P_{g1},P_{g2},\cdots,P_{gD})^\mathrm{T}$ 。

在迭代过程中,粒子通过个体极值和种群极值更新自身的速度和位置:

$$V_{id}^{k+1}=\omega V_{id}^k+c_1r_1(P_{id}^k-X_{id}^k)+c_2r_2(P_{gd}^k-X_{id}^k)$$

(7)

$$X_{id}^{k+1}=X_{id}^k+V_{id}^{k+1}$$

(8)

其中 ω 是惯性权重, k 是当前迭代次数, V_{id} 是粒子速度, c_1 和 c_2 是加速度因子, r_1 和 r_2 是随机数。

1.3 基于 EMTR 和 PSO 的故障定位原理

对于实际电力系统而言,输电线路的结构非常复杂,但是最终通过网络简化后都可以归结为一个两端供电系统,因此本文重点针对双端电源系统来说明基于 EMTR 的故障定位原理。对于图 2 所示的两端系统,在 M 端和 N 端母线处分别设置电压和电流测量装置。输电线路总长为 L_{MN} , F 点发生单相故障,故障点到 M 端的距离为 X_f ,输电线路的波阻抗为 Z_c ,接地阻抗为 Z_f ,接地故障的等效电源电压为 U_f ,双端的等效电源电动势分别为 E_M 和 E_N ,双端电源等效阻抗分别为 Z_M 和 Z_N 。

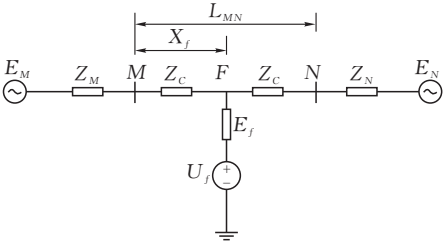


图 2 简单双端供电系统模型

EMTR 的过程的核心思想是对信号的频域相位取共轭来使时域的时间出现反转亦称之为反演,用式(9)来表达:

$$u(x,-t)\leftrightarrow U^*(x,\omega)$$

(9)

M 端电压的理论值函数可以在频域中进行分析:

$$U_M(\omega)=\frac{(1+\rho)e^{-\gamma x_f}}{1+\rho e^{-2\gamma x_f}}U_f(\omega)$$

(10)

其中 ρ 和 γ 分别为反射系数和传播系数。

对式(10)取共轭得到频域下电压时间反演的结果 $U_M^*(\omega)$,线路中频域下的电流

$$I_M^*(\omega)=\frac{U_M^*(\omega)}{Z_M}$$

(11)

当反演的电流行波传回输电线路时,在故障点处会出现时空的同步聚焦,此时电流行波能量被增强而出现极大值点,从下面的数学理论推导也能得出该结论。

$$I_f(x'_f,\omega)=\frac{(1+\rho)e^{-\gamma x'_f}}{1+\rho e^{-2\gamma x'_f}}I_M^*(\omega)$$

(12)

其中 x'_f 表示故障点位置。

将式(10)和式(11)代入式(12)可得

$$I_f(x'_f,\omega)=\frac{(1+\rho)^2U_f^*(\omega)e^{-\gamma(x'_f-x_f)}}{Z_M(1+\rho e^{-2\gamma x'_f})(1+\rho e^{2\gamma x_f})}I_M^*(\omega)$$

(13)

假设在区间 $[0,L_{MN}]$ 上存在 m 个故障点 x'_f ,电流反演信号在这些故障点处的电流能量值是关于电流的一元函数,即

$$P(X'_{fm})=\sum_{j=1}^N i_{x'_f m}^2$$

(14)

其中 N 表示在 M 端得到的电流测量值的采样点数。

当 $x_f=x'_f$ 时,由式(13)和式(14)可以得出电流能量值取得最大值。

根据前面的分析可知,在真实的故障点 x_f 处 $P(X'_{fm})$ 取得最大值。为了提高计算的精度和运算效率,本文考虑利用 PSO 算法来寻找全局最优的故障点,使得 $P(X'_{fm})$ 获得极大值(图 3)。将电流测量值的各个采样点当作 PSO 算法的粒子,PSO 的适应度函数即为式(14),其适应度值就是电流能量值,设置粒子总群数为 N ,粒子维数为 1,迭代次数为 250。

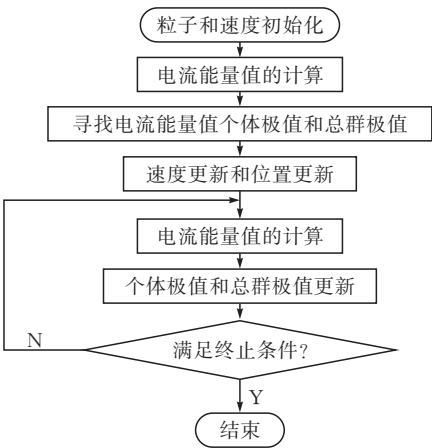


图 3 PSO 寻优流程

2 仿真与验证

在 MATLAB/SIMULINK 中搭建两端供电系统的模型(图 4)。其中参数设置情况: M 端和 N 端采用完全相同的三相交流供电系统,线电压的有效值为 35 kV,电源 A 相的相位角为 0,频率为 50 Hz,内部的连接方式采用 Y 型中性点不接地的方式,三相电源内阻为 0.724 Ω ,三相电源电感为 0.0192 H;

输电线路采用三相分布参数输电线路,线路的频率为 50 Hz,每 km 输电线路的电阻的正序分量和零序分量分别为 0.01273 Ω 和 0.3864 Ω ,每 km 输电线路的电感的正序分量和零序分量分别为

0.9337 mH和 4.1264 mH,每公里输电线路的电容的正序分量和零序分量分别为 0.01274 μF 和 0.007751 μF ,输电线路的总长度为 20 km。

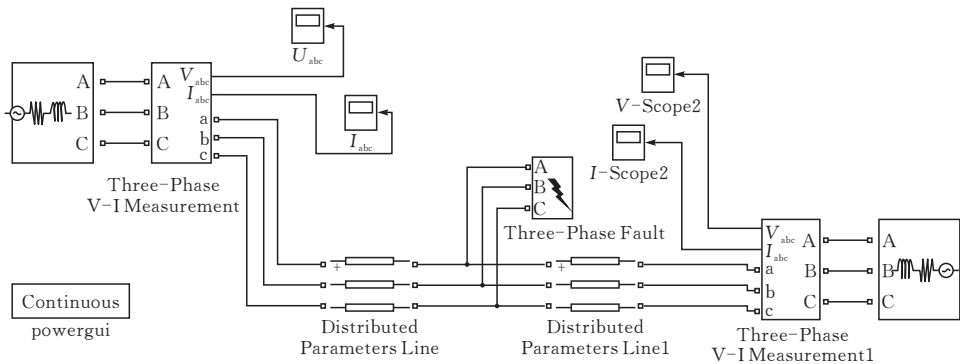
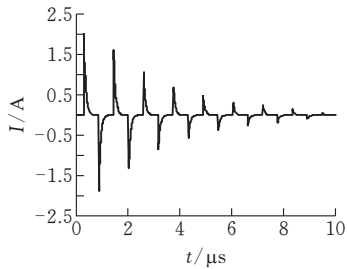


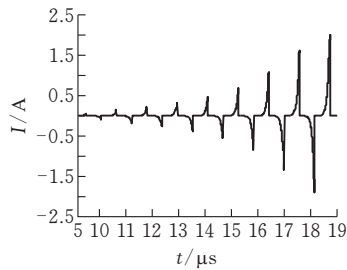
图 4 输电系统模型

在距离 M 端 14 km 处设置发生 A 相接地故障,利用 EMTR 的具体过程见图 5,在 M 端采用故障录波器记录故障电流信号的数据,再利用信号发生器产生反演故障电流信号。

受故障电阻的影响。由表 1 测试出了不同故障距离和不同过渡电阻的实验结果,最大故障距离误差仅为 30 m,达到工程误差要求,结论是:EMTR 和 PSO 测距的精度高且不受故障电阻的影响。



(a)故障录波器记录故障电流信号



(b)信号发生器产生反演故障电流信号
图 5 使用 EMTR 过程中的波形图

为了说明不同过渡电阻的测试情况,在图 4 的模型中设置分别取过渡电阻为 1 Ω 、10 Ω 和 50 Ω ,并采用 EMTR 和 PSO,通过 PSO 可以找到极值点 $x_f=13.96$ km,即为实际故障点的位置,计算每 2 km 等距假设故障点电流能量值归一化后的结果(图 6)。由图 6 可知,在 14 km 处电流能量值最大,假设故障点的电流能量值均比该点小,说明实际故障点位于 14 km 附近,同时进一步说明了 PSO 算法全局寻优得到结果的正确性。当设置的故障点在 14 km 处,EMTR 和 PSO 测距的误差距离仅为 0.04 km,误差百分数为 0.2%,且故障测距结果不

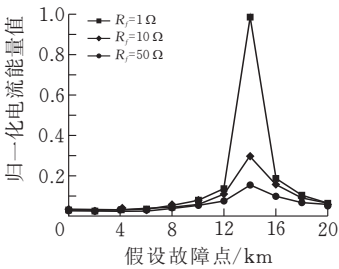


图 6 故障点和等距假设故障点电流的能量值分布情况

表 1 不同过渡电阻的故障测距结果

故障位置/km	过渡电阻/ Ω	故障测距/km	误差距离/km	误差/%
2	0	2.01	0.01	0.5
	1	2.01	0.01	0.5
	10	2.01	0.01	0.5
	50	2.01	0.01	0.5
6	0	5.98	0.02	0.3
	1	5.98	0.02	0.3
	10	5.98	0.02	0.3
	50	5.98	0.02	0.3
10	0	1	10	50
	10.02	10.02	10.02	10.02
	0.02	0.02	0.02	0.02
	0.2	0.2	0.2	0.2
16	0	15.97	0.03	0.188
	1	15.97	0.03	0.188
	10	15.97	0.03	0.188
	50	15.97	0.03	0.188

3 结束语

本文将 EMTR 和 PSO 引入到故障定位,通过

SIMULINK 搭建系统仿真的模型,并且借助故障录波器和信号发生器来实现 EMTR 的功能,反演故障电流信号进行测试,通过实现推导说明了单相接地故障点处电流能量值取得极大值,利用 PSO 算法进行全局寻优得到电流能量值的极值点即为故障点的位置,从而实现了高精度的故障测距且不受过渡电阻的影响。

[参 考 文 献]

[1] 谢李为,柳祎璇,曾祥君,等.基于 VMD 和 S 变换的多端输电线路故障定位[J].电力系统及其自动化学报,2019,31(2):126-134.

[2] 高博,张超.直流频变电缆参数测量与故障定位原理[J].电力系统及其自动化学报,2018,30(4):7-15.

[3] 徐铭铭,王鹏,高明春.基于潮流计算的直流配电网单极接地故障定位算法[J].电力系统保护与控制,2018,46(8):103-109.

[4] 王小君,任欣玉,和敬涵,等.基于 μ PMU 相量信息的配电网故障测距方法[J].电网技术,2019,43(3):810-818.

[5] 范春菊,姜军,郭煜华,等.输电线路行波故障测距技术的发展与应用[J].电力系统及其自动化学报,2017,29(4):129-134.

[6] 李振兴,吴李群,田斌,等.采用区域电网多点测量信息的行波故障定位[J].电力系统自动化,2017(8):152-158.

[7] 李振兴,程宜兴,吴李群,等.基于初始波头广域传输路径的行波定位单元优化配置[J].电力系统自动化,2017,41(18):60-66.

[8] Razzaghi R, Lugrin G, Rachidi F, et al. Assessment of the influence of losses on the performance of the electromagnetic time reversal fault location method[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2017, 32(5): 2303-2312.

[9] Razzaghi R, Paolone M, Rachidi F, et al. Fault location in multi-terminal HVDC networks based on electromagnetic time reversal with limited time reversal window[C]// Power Systems Computation Conference. IEEE, 2014.

[10] Lugrin G, Razzaghi R, Rachidi F, et al. Electromagnetic time reversal applied to fault detection: The issue of losses[C]// 2015 IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility (EMC). IEEE, 2015.

Research on Fault Location of Transmission
Line Based on EMTR and PSO

AI Xuanyuan¹, LIU Hui², CAO Baoyu², TAN Chang³

(1 School of Electrical and Electronic Engineering, Hubei Univ. of Tech., Wuhan 430068, China;
2 State Grid Daye Power Supply Company, Daye 435100, China;
3 State Grid Hubei Maintenance Company, Wuhan 430050, China)

Abstract: EMTR is introduced to locate faults. When a single-phase ground fault occurs in the transmission line, the current energy value of the fault point is calculated by using the time reversal characteristic of the current wave equation. The high-precision fault location can be achieved through the relationship between the energy extreme point and the fault distance, which is hardly affected by fault resistance.

Keywords: EMTR; transmission Line; fault location; transition resistance

[责任编辑: 张岩芳]