

极大似然估计在小电流接地选线中的应用

冯娟, 邵如平

(南京工业大学 自动化与电气工程学院, 江苏 南京 211816)

摘 要: 文章将极大似然估计原理引入小电流接地故障选线, 建立故障选线零序网络模型, 利用极大似然估计良好的辨识特性识别线路参数, 通过比较故障线路和非故障线路中的电容参数是否符合模型选出故障线路。仿真结果表明, 该方法简单、可靠, 能有效地选出故障线路, 且不受过渡电阻、消弧线圈和间歇性电弧的影响。

关键词: 小电流接地系统; 极大似然估计; 故障选线

中图分类号: TM713 **文献标识码:** A **文章编号:** 1671-0959(2011)10-0098-03

为提高供电可靠性, 我国配电网主要采用小电流接地系统。由于故障电流微弱、电弧不稳定等原因, 小电流接地系统单相接地故障选线问题一直没能得到彻底的解决^[1]。现有的选线方法大多基于两种思路: ①通过比较故障后各条线路的电压、电流等电气量的幅值和相位选线, 如群体比幅比相法^[2]、五次谐波法^[3]和残流增量法^[4]等, 这类方法受线路参数、过渡电阻等因素影响较大, 实际使用效果并不理想; ②对故障后信号进行提取处理, 利用故障暂态一定特征频带内的电气量选线, 如首半波法^[5]、小波变换法^[6]和行波法^[7]等, 这类方法可以克服传统选线方法的诸多不足, 但大多数研究将重点放在暂态信号的提取方面, 对暂态信号的利用还不够。注入信号法^[8]在理论上有一定的有效性和可行性, 但投资大、抗干扰能力不佳。模糊理论选线法^[9]、神经网络法^[10]等多重判据选线方法的提出可提高选线的准确率, 但目前这些方法的模型都是在理想条件下建立的, 离实际应用还有一定距离。

参数估计法^[11]的提出为小电流接地选线提供了新的思路, 此法不用添加任何设备, 也不需要故障后的信号进行提取处理, 直接利用各条线路首端检测到的零序电压、电流信号实现选线。极大似然估计是一种以观测值的出现概率最大为准则的参数估计方法, 在系统辨识中有着广泛的应用。小电流接地系统发生单相接地故障时, 故障线路和非故障线路的电容参数发生了变化, 鉴于系统的这种变化特点, 文章将极大似然参数估计方法应用到小电流接地选线中, 利用极大似然估计得到故障后各条线路的电容参数, 通过比较电容参数的差异判断故障线路。

1 极大似然估计基本原理

极大似然估计的基本思想是构造一个与测量数据和未知参数有关的似然函数, 并通过极大化这个函数获得模型

的参数辨识^[12-14]。

设 z 为一个随机变量, z 的 k 个观测值构成的随机序列 $\{z_k\}$ 与未知参数 θ 有关, 假定已知概率密度函数 $p(z_k | \theta)$ 。要根据这些观测值来估计未知参数 θ , 估计的准则就是 $\{z_k\}$ 的出现概率为最大。为此, 定义一个似然函数:

$$L(z_k | \theta) = p(z_1 | \theta) p(z_2 | \theta) \cdots p(z_k | \theta) \quad (1)$$

极大似然估计的实质是求出使 L 达到最大值的参数 θ 的估值 $\hat{\theta}$ 。为了便于求 $\hat{\theta}$, 对式(1)等号两边取对数, 得到对应的对数似然函数:

$$\ln L = \sum_{i=1}^k \ln p(z_i | \theta) \quad (2)$$

求式(2)对 θ 的偏导数, 令偏导数为 0, 可得 θ 的极大似然估值 $\hat{\theta}$ 。

2 极大似然估计在选线中的应用

2.1 选线模型建立

设系统共有 n 条线路, 将线路等效成 Π 型模型, 建立单相接地故障时的零序网络如图 1 所示。图中, u_0 为母线零序电压; U_{f0} 为故障点虚拟电源在零序网络上的压降; D_j 表示第 j 条线路的检测点; i_{0j} 、 R_{0j} 、 L_{0j} 、 C_{01j} 、 C_{02j} 分别为线路 j 的零序电流、零序电阻、零序电感和母线侧及负荷侧的零序电容(对于故障线路 k , 这些量表示从故障点到母线的值); 开关 K 的开合状态分别对应中性点不接地系统和中性点经消弧线圈接地系统。

根据图 1, 对于任意一条非故障线路, 此时线路的零序电流和零序电压满足以下关系:

$$u_0 = R_0(i_0 - \frac{1}{2}C_{01}\frac{du_0}{dt}) + L_0\frac{d}{dt}(i_0 - \frac{1}{2}C_{01}\frac{du_0}{dt}) + \frac{2}{C_{02}}\int^t(i_0 - \frac{1}{2}C_{01}\frac{du_0}{dt})dt \quad (3)$$

收稿日期: 2010-12-12

作者简介: 冯娟(1986-), 女, 江苏扬州人, 硕士研究生, 2011年毕业于南京工业大学自动化与电气工程学院。

式中, i_0 、 R_0 、 L_0 、 C_{01} 、 C_{02} 为该线路的零序电流、零序电阻、零序电感和母线侧及负荷侧的零序电容。

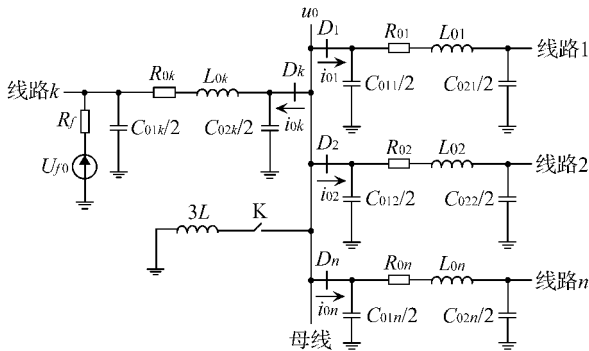


图1 单相接地故障零序网络模型图

由式(3)可见, 在小电流接地系统单相接地故障中, 线路的零序电流电压都是一组随机变量, 它们和线路的零序电阻、零序电感和零序电容参数有关, 实际应用中可以认为零序电流电压是服从正态分布的, 这些都符合极大似然估计应用的先决条件。

2.2 极大似然估计实现接地选线

极大似然法实现模型的参数辨识是建立在差分方程基础上的, 故用数值微分和复化梯形积分公式将式(3)离散化处理, 得差分方程:

$$u_0(k) = R_0 i_0(k) - \frac{1}{2} R_0 C_{01} \frac{u_0(k+1) - u_0(k-1)}{2T} + L_0 \frac{i_0(k+1) - i_0(k-1)}{2T} - \frac{1}{2} L_0 C_{01} \frac{u_0(k+1) - 2u_0(k) + u_0(k-1)}{T^2} + \frac{2}{C_{02}} T \left[\frac{1}{2} i_0(k) + \sum_{m=1}^{k-1} i(m) \right] - \frac{C_{01}}{C_{02}} u_0(k) \quad (4)$$

式中, $u_0(k)$ 、 $i_0(k)$ 分别为故障发生后第 k 个采样点的零序电压和零序电流值, T 表示采样间隔。

观测数据是线路首端采集到的零序电流电压, 设共采集 N 个输入输出数据, 将模型式(4)转化成极大似然估计形式

$$\begin{aligned} Y_N &= \varphi_N \theta \\ Y_N &= u_0(k) \\ \varphi_N &= [i_0(k), -\frac{u_0(k+1) - u_0(k-1)}{4T}, \\ &\frac{i_0(k+1) - i_0(k-1)}{2T}, -\frac{u_0(k-1) - 2u_0(k) + u_0(k-1)}{2T^2}, \\ &2T(\frac{1}{2} i_0(k) + \sum_{m=1}^{k-1} i(m)), -u_0(k)] \\ \theta &= [R_0, R_0 C_{01}, L_0, L_0 C_{01}, \frac{1}{C_{02}}, \frac{C_{01}}{C_{02}}]^T \end{aligned} \quad (5)$$

零序电流电压数据服从正态分布, 方差为 σ^2 , 在参数 θ 条件下其似然函数表示为:

$$L(Y_N | \hat{\theta}) = \frac{1}{(2\pi\sigma^2)^{\frac{N}{2}}} \exp \left[-\frac{(Y_N - \varphi_N \hat{\theta})^T (Y_N - \varphi_N \hat{\theta})}{2\sigma^2} \right] \quad (6)$$

对式(6)等号两边取对数得:

$$\ln L(Y_N | \hat{\theta}) = -\frac{N}{2} \ln 2\pi - \frac{1}{2} \ln \sigma^2 - \frac{(Y_N - \varphi_N \hat{\theta})^T (Y_N - \varphi_N \hat{\theta})}{2\sigma^2} \quad (7)$$

求式(7)对 $\hat{\theta}$ 的偏导数并令其为零就可求出极大似然估计下的电容参数估值。为保证辨识结果的稳定, 用一段时间内的采样值对电容参数做出一个估计值, 然后推移数据窗, 用另外一组数据再得出一个估计值, 如此重复, 可求得电容参数的一个序列 $\{C_k\}$ 。对该序列计算电容参数的平均值 \bar{C} , 通过比较各条线路是否符合模型选出故障线路, 如果每条线路的 \bar{C} 都符合模型, 则母线发生故障。

$$\bar{C} = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N C(k) \quad (8)$$

3 仿真实验

系统仿真模型如图2所示, 变压器为 Y/Y_0 形联结, 低压侧中性点通过开关 K 和消弧线圈相连, K 的开合状态分别对应中性点不接地系统和经消弧线圈接地系统。线路的正序阻抗为 $Z_1 = (0.17 + j0.38) \Omega/\text{km}$, 正序对地导纳 $b_1 = j3.045 \mu\text{s}/\text{km}$, 零序阻抗为 $Z_0 = (0.23 + j1.72) \Omega/\text{km}$, 零序对地导纳 $b_0 = j1.884 \mu\text{s}/\text{km}$ 。根据线路参数计算出消弧线圈电感为 5.67H。故障发生在长度为 30km 的第六条出线上。

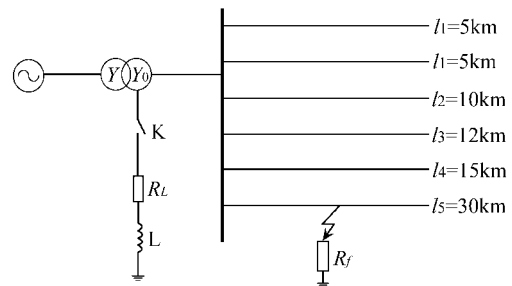


图2 系统仿真模型

在不同仿真条件下分别对小电流接地故障进行仿真, 将仿真中测量的母线端电压、电流数据导入 MATLAB 工作环境, 调用故障后电压、电流数据, 利用 MATLAB 中编写的极大似然估计程序计算。由于篇幅所限, 表1列出了经中性点不接地系统不同接地故障情况时应用极大似然估计所得的部分接地选线结果。图3为不同故障条件下各线路电容参数的辨识结果。

从表1和图3中可以看出, 线路1到线路5极大似然估计所得的电容参数和线路实际电容参数相近, 而线路6极大似然估计所得电容参数和线路实际电容参数相差甚远, 而且和其他线路辨识结果差异很大, 据此可判断发生故障的是线路6。理论上, 故障线路的模型并不满足式(3), 所以故障线路根据式(3)建模得出的辨识结果必然是与实际不符的。仿真结果和理论结果一致, 可见应用极大似然估计实现选线具有很高的准确度。

表1 中性点不接地系统极大似然估计结果

仿真条件		电容参数平均值 $\bar{C}/\mu\text{F}$						选线结果
		线路1	线路2	线路3	线路4	线路5	线路6	
过渡电阻 R_f/Ω	0	0.01505	0.03010	0.03613	0.04516	0.06022	-0.3433	线路6
	10	0.01505	0.03011	0.03615	0.04518	0.06026	-0.3434	
	200	0.01512	0.03023	0.03628	0.04535	0.06048	-0.3439	
初相角 $\varphi/(^\circ)$	0	0.01539	0.03079	0.03696	0.04627	0.06178	-0.3471	线路6
	30	0.01513	0.03026	0.03632	0.04541	0.06056	-0.3444	
	90	0.01489	0.02977	0.03571	0.04463	0.05948	-0.3408	
故障距离 l/km	3	0.01455	0.02911	0.03494	0.04367	0.05821	-0.3649	线路6
	8	0.01485	0.02970	0.03562	0.04452	0.05932	-0.3468	
	20	0.01495	0.02991	0.03588	0.04484	0.05978	-0.3113	

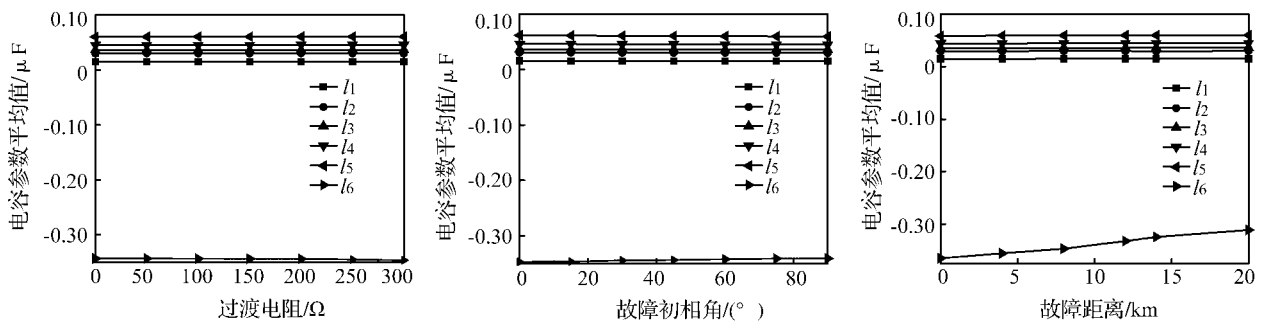


图3 不同故障条件下各线路电容参数的辨识结果

4 结论

文章介绍了极大似然估计基本原理,根据小电流接地系统的故障特征,将其应用到小电流接地选线领域,利用其良好的辨识特性进行故障选线。并从过渡电阻、故障初相角和故障距离等方面进行了仿真测试,仿真结果表明了该方法的可行性和可靠性。这种选线方法具有以下特点:

- 1) 不用添加任何设备,也不需要故障后的信号进行提取处理,直接利用各条线路首端检测到信号实现选线。
- 2) 利用极大似然估计原理识别线路参数,识别原理简单明确,计算结果稳定有效。
- 3) 不受过渡电阻、消弧线圈和间歇电弧的影响,每条线路选线独立进行,使得选线与自动补偿装置一体化,满足配电自动化要求。

参考文献:

- [1] 贺家李,宋从矩. 电力系统继电保护原理 [M]. 北京: 中国电力出版社, 2001.
- [2] 郝玉山,杨以涵. 小电流接地微机选线的群体比幅比相原理 [J]. 电力情报, 1994, (2): 15~19.
- [3] 黄强,张城玮,王毅. 五次谐波法对单相接地故障的定位 [J]. 工程技术, 2007, (30): 65~66.
- [4] 陈忠仁,李微波,吴维宁. 一种新型小电流接地综合选线装置 [J]. 电力自动化设备, 2007, 27(5): 114~117.
- [5] 龚静,李英姿,王亚惠. 基于 DSP 的小电流接地系统暂态首半波法实现 [J]. 电工技术, 2006, (9): 34~35.
- [6] Chaari O, Meunierm, Brouaye F. Wavelet: a new tool for the resonant grounded power distribution system relaying [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1996, 11(3): 1301~1308.
- [7] 扈观义,孔小栋. 小电流接地系统故障行波检测方法 [J]. 山西电力, 2006, (6): 10~12.
- [8] 战祥新,郝世勇,董雷. 小电流接地系统选线注入信号的频率分析 [J]. 工矿自动化, 2008, (5): 37~39.
- [9] 张凯,袁兆强,范李平. 基于模糊理论的小电流接地故障选线融合技术研究 [J]. 重庆大学学报, 2004, 27(5): 86~89.
- [10] 索南加乐,张超,王树刚. 基于模型参数识别法的小电流接地故障选线研究 [J]. 电力系统自动化, 2004, 28(19): 65~70.
- [11] 李言俊,张科. 系统辨识理论及应用 [M]. 北京: 国防工业出版社, 2003.
- [12] 侯媛彬,汪梅,王立琦. 系统辨识及其 MATLAB 仿真 [M]. 北京: 科学出版社, 2004.
- [13] 王志贤. 最优状态估计与系统辨识 [M]. 西安: 西北工业大学出版社, 2004.

(责任编辑 赵巧芝)