

DOI:10.3969/j.issn.1000-1565.2016.01.016

采样频率对强跟踪滤波器算法故障测距的误差影响

刘素玲¹, 刘萌¹, 薛占钰², 白彦波²

(1. 河北大学 物理科学与技术学院, 河北 保定 071002; 2. 保定钰鑫电气科技有限公司 研发中心, 河北 保定 071052)

摘 要: 当输电线路发生故障时, 要快速、准确、可靠地对故障进行定位, 从而提出了一种基于强跟踪滤波器理论的故障测距方法. 在搭建的模型中, 基于强跟踪滤波器算法原理, 不同的采样频率下, 故障测距的误差是不同的, 结果与解微分方程法测得结果接近, 说明建立的测距模型是准确的. 在 PSCAD/EMTDC 软件下, 对强跟踪滤波算法进行仿真分析, 仿真结果表明, 该算法是一种简单的递推算法, 原理简单, 不需要求解复杂的数学方程, 能更好、更快的消除噪声, 使信号收敛快, 实施性好, 鲁棒性好. 本文主要研究不同采样频率仿真下误差的不同, 为基于强跟踪滤波器算法的电力系统故障测距装置提供了理论依据.

关键词: 输电线路; 采样频率; 故障测距; 强跟踪滤波器

中图分类号: TM711

文献标志码: A

文章编号: 1000-1565(2016)01-0100-06

Effect of sampling frequency on fault location error with the strong tracking filter algorithm

LIU Suling¹, LIU Meng¹, XUE Zhanyu², BAI Yanbo²

(1. College of Physics Science and Technology, Hebei University, Baoding 071002, China;

2. Research and Development Center, Baoding Yuxin Electric Co., LTD, Baoding 071052, China)

Abstract: When the high-voltage transmission lines break down, a new fault location method based on strong tracking filter theory is presented in order to locate the fault point quickly and accurately. In this method, the effect of the sampling frequency to the fault location error is studied with the strong tracking filter algorithm. The state equation is simple and accurate. The strong tracking filter algorithm is applied in the PSCAD/EMTDC software, and the results show that the calculation is simple and accuracy, and it does not need to solve complex mathematical equations, and the noise can be eliminated better and faster using strong tracking filter algorithm. This paper focuses on the research that the sampling frequency affects the fault location error, providing the device of electric power system with the strong tracking filter algorithm.

Key words: transmission line; sampling frequency; fault location; strong tracking filter

输电线路故障是导致电力系统故障最多的一种情况. 单相接地短路故障, 相间短路故障, 相间和接地短路并存故障是常见的 3 种输电线路故障. 其中发生单相接地短路故障的机率最大, 占输电线路故障总数的 95% 左右^[1]. 本文主要研究单相接地短路故障.

收稿日期: 2015-04-20

基金项目: 河北省科技厅资助项目(12214515)

第一作者: 刘素玲(1970—), 女, 河北保定人, 河北大学副教授, 博士, 主要从事电子检测与自动化方向研究.

E-mail: 1487188826@qq.com

强跟踪滤波器理论^[2]用于动态系统故障诊断,最大特点就是利用强跟踪滤波器来估计模型参数.它将控制系统的各种故障归结为一种参数偏差型故障进行处理,采用状态与参数的联合估计方法得到非线性系统的状态与参数的无偏估计,并且在模型参数失配的情况下仍能得到比较准确的非线性系统状态与参数的估计^[3].强跟踪滤波算法与通常的滤波算法相比,具有以下优良特性:对于模型不确定性具有较强的鲁棒性,很强的抗干扰能力和较低的对初值的敏感性,对于过程的缓变或者突变状态均有很强跟踪能力,适中的计算复杂性,便于实时应用^[4].

本文通过建立线路故障数学模型,利用故障后线路各参数、单端电压、电流信号数据,将故障距离作为待估参数,用强跟踪滤波器(STF)理论对待估计参数进行准确估计,从而获得准确的故障距离,并在 PSCAD/EMTDC 软件中用不同的采样频率进行仿真.比较分析数据,观察不同的采样频率对故障测距的误差是否有影响,结果是没有影响,这就为基于强跟踪滤波器算法的电力系统故障测距装置提供了理论依据.强跟踪滤波器算法与传统的解微分方程法相比,强跟踪滤波器算法有一些优势.

1 测距原理及方法

目前,输电线路故障测距方法可以分为 2 大类:行波法和阻抗法^[5].行波法不能准确地判断故障的位置^[6].阻抗法就其采用的电气量可分为 2 大类:单端测距法和双端测距法^[7].单端测距法是根据单端测得的电压和电流以及其他必要的系统参数来计算出故障距离,但是单端法受到故障过渡电阻的影响^[8].双端测距法采用线路两端的电气量,其测距原理与过渡电阻无关^[9],但通信设备和维护费用较高^[10].本文采用基于强跟踪滤波器理论的单端测距法进行研究.

1.1 强跟踪滤波器算法

在输电线路发生短路故障后,系统状态发生突变,利用强跟踪滤波器的强跟踪特性,能准确跟踪到线路故障距离 l ,可对其进行精确估计.

在算法中采用集中参数模型,如图 1 所示,当线路发生单相接地短路故障时,被测线路的对地分布电容被忽略后,线路的电流电压满足下列方程:

$$u = R_1(i + K_R i_{s0}) + L_1 l \frac{d(i + K_L i_{s0})}{dt} + U_F, \quad (1)$$

式中, u 、 i 分别为故障后监测点检测到的故障相电压、电流瞬时值; R_1 为监测点到故障点的线路电阻; L_1 为线路单位长度的正序电感值; l 为故障距离, $K_R = (R_0 - R_1)/R_1$ 和 $K_L = (L_0 - L_1)/L_1$ 分别为电阻和电感的零序补偿系数; R_0 、 L_0 分别为线路单位长度的零序电阻和电感值; u_F 为故障点电压瞬时值^[11]; i_{s0} 故障时监测点处的零序电流瞬时值.

将故障点电压 u_F 作为状态量,令 $u_F = 0$,为了实现状态 x 和参数故障距离 l 和线路电阻 R 的联合估计,引入辅助状态方程

$$x(t+1) = [l(t+1) \quad R(t+1)]^T = [l(t) \quad R(t)]^T = x(t). \quad (2)$$

令扩展状态 $x_e = [x^T \quad x^T]^T$,将状态 x 和参数 x' 同时作为扩展状态进行联合估计.将电压 u 作为输出,

$$y(t+1) = [u(t+1)] = \begin{bmatrix} 1 \\ L_1 \frac{i(t+1) - i(t) + K_L(i_{s0}(t+1) - i_{s0}(t))}{\Delta t} \\ i(t+1) + K_R i_{s0}(t+1) \end{bmatrix}^T x_e(t+1), \quad (3)$$

将单相接地故障模型化成离散的非线性系统状态估计形式的系统,用强跟踪滤波算法对状态量进行参数估计,得出故障距离 l .

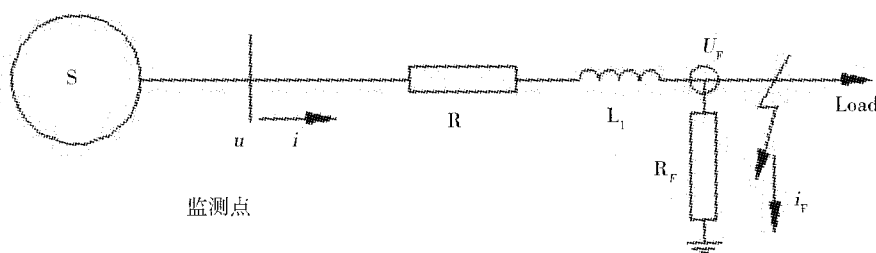


图 1 单相接地短路故障电路示意

Fig. 1 Schematic diagram of single-phase earth fault circuit

1.2 微分方程法

利用解微分方程法求解故障距离时,过渡电阻对故障距离的测量有很大的影响.其微分方程为

$$U(t) = R_1[i(t) + K_R i_{s0}(t)] + L_1 l \frac{d[i(t) + K_L i_{s0}(t)]}{dt} + U_F(t), \quad (4)$$

$$U(t+1) = R_1[i(t+1) + K_R i_{s0}(t+1)] + L_1 l \frac{d[i(t+1) + K_L i_{s0}(t+1)]}{dt} + U_F(t+1), \quad (5)$$

解微分方程时,令 $u_F=0$, 2 式联立只有 l 是未知的,用差分代替微分,可以求解出故障距离.该方法对噪声比较敏感.

2 PSCAD 软件仿真分析

2.1 软件仿真

在计算中,故障测距相对误差是

$$e = |\text{测量距离} - \text{故障实际距离}| / \text{线路全长} \times 100\%. \quad (6)$$

利用 PSCAD/EMTDC 软件搭建 220 V 输电线路模型进行仿真,来检验上述强跟踪滤波器理论的故障测距算法,仿真模型见图 2. 其参数如下:线路全长 200 km,线路正序参数为: $r_1=0.036\ 294\ \Omega/\text{km}$, $X_{L1}=0.503\ 1\ \Omega/\text{km}$;零序参数为: $r_0=0.379\ 58\ \Omega/\text{km}$, $X_{L0}=1.327\ 7\ \Omega/\text{km}$. 由 PSCAD 仿真软件仿真的强跟踪滤波器理论下的波形图见图 3、图 4.

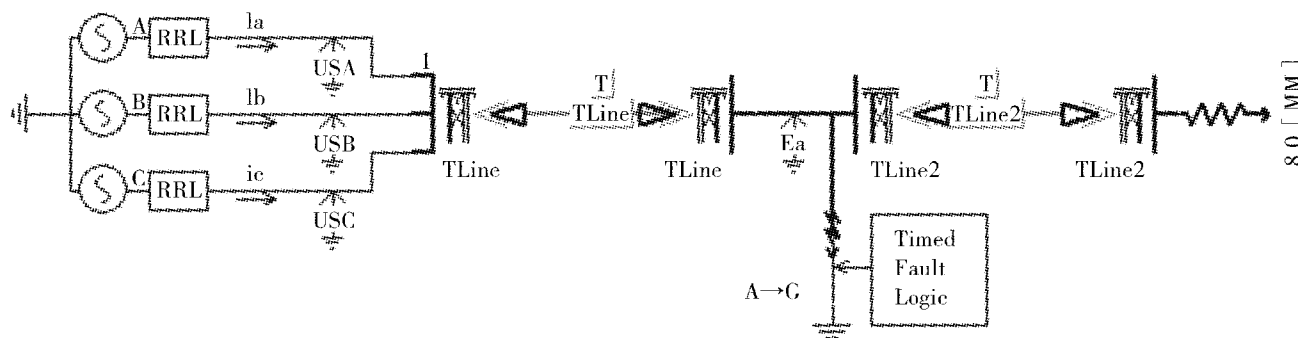


图 2 PSCAD 软件仿真搭建电路模型

Fig. 2 The build circuit model in PSCAD software

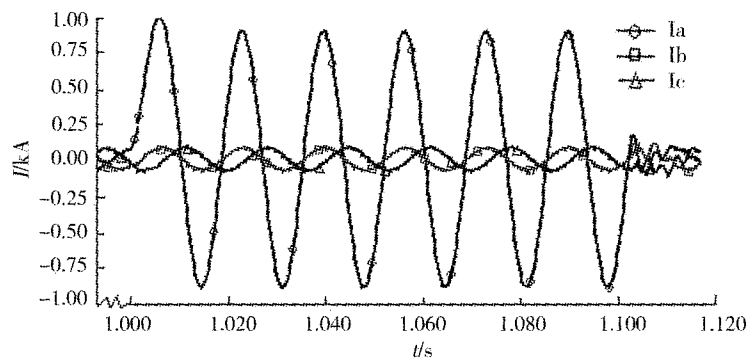


图 3 单相接地短路故障电流仿真示意

Fig. 3 Single-phase earth fault current simulation schematic diagram

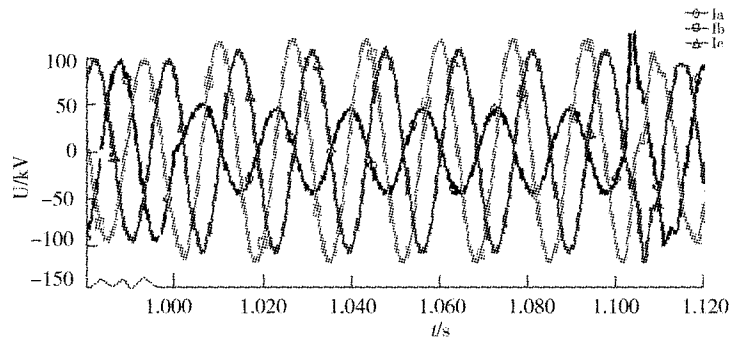


图 4 单相接地短路故障电压仿真示意

Fig. 4 Single-phase earth fault voltage simulation schematic diagram

在 PSCAD 软件仿真下得出在不同采样频率下,故障后监测点检测到的故障相电压、电流瞬时值,故障时监测点处的零序电流瞬时值,应用 MATLAB 软件调用这些值,从而得到在不同采样频率下输电线路各处单相接地短路的故障测距结果.数据见表 1.

表 1 输电线路单相接地短路仿真测距结果
Tab. 1 Single-phase earth fault simulation results

故障距离/km	采样频率/kHz	强跟踪滤波器算法/km	相对误差/%	解微分方程法/km	相对误差/%
20	2	20.080	0.040	19.995	0.003
	5	20.010	0.005	19.930	0.035
	10	20.008	0.004	19.970	0.015
	50	20.000	0.000	19.924	0.038
	100	20.000	0.000	19.920	0.040
50	2	50.190	0.095	50.040	0.020
	5	50.030	0.015	49.880	0.060
	10	50.020	0.010	49.920	0.040
	50	50.005	0.003	49.970	0.015
	100	50.000	0.000	49.860	0.070

续表 1
Centinue tab. 1

故障距离/km	采样频率/kHz	强跟踪滤波器算法/km	相对误差/%	解微分方程法/km	相对误差/%
100	2	100.380	0.190	100.200	0.100
	5	100.080	0.040	99.850	0.075
	10	100.050	0.025	99.80	0.100
	50	100.040	0.020	99.790	0.105
	100	100.040	0.020	99.790	0.105
150	2	150.590	0.295	150.470	0.235
	5	150.180	0.090	149.920	0.040
	10	150.140	0.070	149.830	0.085
	50	150.140	0.070	149.80	0.100
	100	150.140	0.070	149.80	0.100
180	2	180.750	0.375	180.700	0.350
	5	180.270	0.135	180.020	0.010
	10	180.240	0.120	179.910	0.045
	50	180.240	0.120	179.870	0.065
	100	180.240	0.120	179.860	0.070

2.2 分析结果

强跟踪滤波器算法在输电线路故障测距中的误差和解微分方程方法的误差是很接近的. 由此可知, 强跟踪滤波器理论在故障测距时, 精确性能得到保证. 在采样频率不同的情况下, 基于强跟踪滤波器算法原理的故障测距的最大误差是 0.375%, 与解微分方程法的相对误差相近. 在故障距离不同时, 基于强跟踪滤波器算法原理的故障测距的最大误差也是 0.375%, 误差范围也在允许范围内. 由此可知, 该故障测距方法不受采样频率和故障距离的影响. 在相同故障距离下, 采样频率越大, 故障距离越接近真实值, 在实际中可用高配置的仪器来提高采样频率, 从而减小测量误差. 在相同采样频率下, 故障距离越大, 其测得的相对误差越大. 这是由于故障距离越远, 测量时间会稍长, 这就导致测量的故障距离误差增大. PSCAD 仿真结果表明, 强跟踪滤波器算法能快速跟踪故障后的状态量, 能利用故障后 1 个周期的单端电流、电压数据, 来实现故障测距.

3 结论

本文研究采样频率对强跟踪滤波器算法故障测距的误差影响.

1) 状态变量是线路故障距离、首端到故障点的线路电阻、故障点处的故障电压, 输入、输出量分别是线路单端故障电流和电压信号, 利用状态量和输入、输出量建立的测距模型既准确又简单.

2) 强跟踪滤波器算法原理简单, 递推算法是一种不要求解复杂数学方程的简便算法. 运用强跟踪滤波器算法, 能更好、更快的消除噪声, 使信号收敛得快, 时间上没有过多限制, 实施性好, 鲁棒性好.

3) 由于本文主要研究强跟踪滤波器算法在采样频率不同对故障测距的误差影响, 故令过渡电阻为零. 过渡电阻不为零的情况, 将继续深入研究.

4) 采样频率相同, 故障距离不同时, 基于强跟踪滤波器算法的单端故障测距的误差在允许范围内. 由数据可以看出, 测量的故障距离距监测点越近, 其测距精确度越高. 在实际中更是如此, 由于输电线路受到地质、气候、湿度等条件的影响, 故障距离距监测点越远, 这些影响会更深刻, 误差会增大.

5) PSCAD 仿真表明, 不同采样频率下, 对基于强跟踪滤波器算法的过渡电阻为零的单端故障测距的误差与解微分方程法近似, 但比解微分方程法运算更简便, 精度也能保证, 为基于强跟踪滤波器算法的电力系统故障测距装置提供了理论依据.

参 考 文 献:

- [1] 贾雷亮. 输电线路故障点及故障类型的判断[J]. 山西电力, 2008(6): 29-30. DOI:10.3969/j.issn.1671-0320.2008.06.011.
JIA Leiliang. Judgement of fault point and fault classification on transmission line[J]. Shanxi Electric Power, 2008(6): 29-30. DOI:10.3969/j.issn.1671-0320.2008.06.011.
- [2] 杜占龙, 李小民. 多重渐消因子强跟踪 SCKF 及其在故障参数估计中的应用[J]. 系统工程与电子技术, 2014, 36(4): 643-649. DOI:10.3969/j.issn.1001-506X.2014.04.06.
DU Zhanlong, LI Xiaomin. Multiple fading factors strong tracking SCKF and its application in fault parameter estimation [J]. Systems Engineering and Electronics, 2014, 36(4): 643-649. DOI:10.3969/j.issn.1001-506X.2014.04.06.
- [3] 周东华, 席裕庚, 张钟俊. 非线性系统带次优渐消因子的扩展卡尔曼滤波[J]. 控制与决策, 1990, 5(5): 1-6. DOI:10.3321/j.issn.1001-0920.1990.05.002.
ZHOU Donghua, XI Yugeng, ZHANG Zhongjun. Suboptimal fading extended Kalman filtering for nonlinear systems[J]. Control and Decision, 1990, 5(5): 1-6. DOI:10.3321/j.issn.1001-0920.1990.05.002.
- [4] 于百胜, 黄文虎. 基于强跟踪滤波器的在线故障诊断方法[J]. 振动、测试与诊断, 2003, 23(4): 260-264. DOI:10.3969/j.issn.1004-6801.2003.04.005.
YU Baisheng, HUANG Wenhui. Online fault diagnosis based on strong tracking filter[J]. Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis, 2003, 23(4): 260-264. DOI:10.3969/j.issn.1004-6801.2003.04.005.
- [5] 徐子华, 王艳松. 基于强跟踪滤波器的输电线路单端故障测距新方法[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(7): 54-59. DOI:10.7667/j.issn.1674-3415.2013.07.009.
XU Zihua, WANG Yansong. A new one-terminal fault location for transmission lines based on strong tracking filter[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(7): 54-59. DOI:10.7667/j.issn.1674-3415.2013.07.009.
- [6] 郑秀玉, 丁坚勇, 黄娜. 输电线路单端故障定位的阻抗-行波组合算法[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(6): 18-21. DOI:10.7667/j.issn.1674-3415.2010.06.004.
ZHENG Xiuyu, DING Jianyong, HUANG Na. Impedance-traveling wave assembled algorithm of one-terminal fault location for transmission lines[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(6): 18-21. DOI:10.7667/j.issn.1674-3415.2010.06.004.
- [7] 郭俊宏, 谭伟璞, 杨以涵, 等. 电力系统故障定位原理综述[J]. 继电器, 2006, 34(3): 76-81. DOI:10.7667/j.issn.1674-3415.2006.03.019.
GUO Junhong, TAN Weipu, YANG Yihan, et al. Summary on fault location principle in power system[J]. Relay, 2006, 34(3): 76-81. DOI:10.7667/j.issn.1674-3415.2006.03.019.
- [8] KAWADY T, STENZEL J. A practical fault location approach for double circuit transmission lines using single end data [J]. IEEE Trans on Power Delivery, 2003, 18(4): 1166-1173. DOI:10.1109/TPWRD.2003.817503.
- [9] 蒋春芳, 王克英. 基于参数估计的双端不同步故障测距算法[J]. 继电器, 2008, 36(1): 1-4. DOI:10.7667/j.issn.1674-3415.2008.01.001.
JANG Chunfang, WANG Keying. Unsynchronous two-terminal fault location algorithm based on line parameter estimation[J]. Relay, 2008, 36(1): 1-4. DOI:10.7667/j.issn.1674-3415.2008.01.001.
- [10] SADEH J, HADJSAID N, RANJBAR A M, et al. Accurate fault location algorithm for series compensated transmission lines[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 2000, 15(3): 1027-1033. DOI:10.1109/61.871370.
- [11] SANT M T, PAITHANKAR Y G. On line digital fault locator for overhead transmission line[J]. Proceedings of the Institution of Electrical Engineers, 1979, 126(11): 1181-1185. DOI:10.1049/piee.1979.0201.

(责任编辑:王兰英)