

最小二乘法在距离保护中的应用初探

黄彦全¹, 肖建¹, 李晋², 唐磊¹

(1. 西南交通大学电气工程学院, 四川 成都 610031; 2. 铁道第一勘测设计院电化处, 甘肃 兰州 730000)

摘要: 电压和电流信号中存在的非周期分量和高次谐波分量会影响到距离保护测量阻抗的真实性。通过滤除非工频信号而获得的基波阻抗值, 可以确保距离保护动作的正确性。基于最小二乘原理的参数估计是应用相当普及的方法, 将最小二乘法应用于距离保护中, 构建了基于微分方程的系统模型, 提出通过测量电感参数获得测量电抗, 为解决基于微分方程测量电阻参数估计模型误差大的问题, 提出基于有功功率概念构建的测量电阻参数估计模型, 并就所提出方法进行了仿真验证, 表明通过最小二乘法进行的测量阻抗参数估计是可以应用于距离保护的。

关键词: 距离保护; 最小二乘法; 测量电感; 测量电阻

中图分类号: TM773 文献标识码: A 文章编号: 1003-4897(2004)07-0017-04

0 引言

距离保护是电力系统的重要保护类型之一, 在高压输电线路中得到了大量的应用。在短路故障引起的暂态过程中, 电压和电流信号中除周期分量外, 还包含了非周期分量。在距离保护的某些应用场合, 如电气化铁道供电系统中, 由于负荷本身的非线性, 在正常情况下, 电压和电流信号中也含有丰富的高次谐波分量。非周期分量和高次谐波分量在电压和电流信号中的存在, 要求在距离保护中采取滤波措施, 以确保保护动作的正确性。对于微机保护来说, 常用的数字滤波器是采用全波傅里叶和半波傅里叶算法, 从电压和电流的离散序列中把基波信号提取出来, 以达到滤波的目的。对于傅里叶算法在微机保护的应用进行了广泛而深入的研究, 并已取得卓有成效的研究成果。

从电压和电流信号序列中分离出基波信号, 目的在于计算出被保护对象的测量阻抗, 并进行该测量阻抗是否落在保护动作区内的判断。目前基于参数估计距离保护算法正越来越受到人们的重视: 文献[1]对递推最小二乘算法应用到距离保护中进行了初步探讨, 通过递推最小二乘算法直接计算出故障距离; 文献[2]应用最小二乘算法对电压和电流信号中基波分量进行估计; 文献[3]对卡尔曼滤波、最小二乘法、递推最小二乘法及带遗忘因子的递推最小二乘法在距离保护中的应用进行了原理论证。

1 测量阻抗的在线估计算法

阻抗保护的测量阻抗是一个复数, 实部为测量电阻, 虚部为测量电抗, 可以通过以下公式计算出来^[4]:

$$Z_J = \frac{U}{I} \quad (1)$$

或
$$Z_J = \frac{U}{(I + 3KI_0)} \quad (2)$$

前者用于输电线路的相间短路故障保护, 后者用于接地保护。两者在阻抗继电器实现上的差别在于采用了不同的测量电流。以上计算公式采用的电压和电流信号均为频域量, 这也是需要对电压和电流信号进行滤波的原因之一。

采用通过测量电压和测量电流估计出测量电阻(对应测量阻抗的实部)和测量电感(与电力系统的角频率相乘即为测量阻抗的虚部), 则对测量电压信号和测量电流信号没有特殊的滤波要求。对于一条输电线路, 忽略分布电容, 其母线电压 $v(t)$ 和保护测量电流 $i(t)$ 之间存在以下关系:

$$v(t) = Ri(t) + L \frac{di(t)}{dt} \quad (3)$$

其中, R 为测量电阻, L 为测量电感。

以 T 为采样时间间隔, 则式(3)在第 k 时刻的离散表达式为:

$$v_k = Ri_k + L \frac{i_k - i_{k-1}}{T} \quad (4)$$

如果进行 N 次观测, 则各误差的平方和为:

$$J = \sum_{k=1}^N (v_k - Ri_k - L \frac{i_k - i_{k-1}}{T})^2 \quad (5)$$

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(69774024)

要使 J 达到极小值, 分别对 R 和 L 求偏导并使
之等于零, 则有:

$$\frac{\partial J}{\partial R} \Big|_{R=\hat{R}} = -2 \sum_{k=1}^N (v_k - \hat{R}i_k - \hat{L} \frac{i_k - i_{k-1}}{T}) i_k = 0 \quad (6)$$

$$\frac{\partial J}{\partial L} \Big|_{L=\hat{L}} = -2 \sum_{k=1}^N (v_k - \hat{R}i_k - \hat{L} \frac{i_k - i_{k-1}}{T}) \frac{i_k - i_{k-1}}{T} = 0 \quad (7)$$

解由式(6)和式(7)组成的二元一次方程组, 可以
得出电感参数估计值 \hat{L} 的计算公式为:

$$\hat{L} = \frac{\sum_{k=1}^N i_k^2 v_k \frac{i_k - i_{k-1}}{T} - \sum_{k=1}^N v_k i_k \sum_{j=1}^N i_k \frac{i_k - i_{k-1}}{T}}{\sum_{k=1}^N i_k^2 (\frac{i_k - i_{k-1}}{T})^2 - (\sum_{k=1}^N i_k \frac{i_k - i_{k-1}}{T})^2} \quad (8)$$

同样可以得出电阻参数估计值 \hat{R} 的计算公式
为:

$$\hat{R} = \frac{\sum_{k=1}^N i_k v_k \sum_{k=1}^N (\frac{i_k - i_{k-1}}{T})^2 - \sum_{k=1}^N v_k \frac{i_k - i_{k-1}}{T} \sum_{j=1}^N i_k \frac{i_k - i_{k-1}}{T}}{\sum_{k=1}^N i_k^2 (\frac{i_k - i_{k-1}}{T})^2 - (\sum_{k=1}^N i_k \frac{i_k - i_{k-1}}{T})^2} \quad (9)$$

2 测量阻抗在线估计的仿真

为说明以上所提出公式的有效性, 我们进行了
计算机仿真, 利用 EMTP 构建一个简单电力系统模
型用于产生仿真所需要的数据, 该仿真模型的主要
参数如下:

系统概况: 单一电源供电, 额定电压等级 110
kV, 线路电阻为 16 Ω , 电感为 0.089 H, 负荷电阻 200
 Ω , 负荷电感 0.4 H, 系统正常运行 0.105 s 后发生三
相短路, 短路持续时间 0.2 s;

信号采样: 每周波对电压和电流分别进行 12
点、20 点和 30 点的信号采样;

短路地点: 分别取短路发生地点在线路末端、线
路全长 50% 和线路全长 10% 处。

利用公式(8)进行短路电感仿真计算的结果如
表 1 所示, 参与估计的样本数据窗口长度为每周波
采样点数。而利用公式(9)进行的短路电阻仿真计
算结果由于误差较大(达 30% ~ 50%), 因此没有专
门列出结果。

通过表 1 的仿真结果, 可以看出: 应用公式(8)
进行的电感参数估计时, 所获得结果的误差与每周
波采样点数存在一定关系, 每周波采样点数越多, 估

计值与理想值之间的误差就越小, 同样地, 所获得的
结果的误差也与发生短路点的位置有关系, 近端短
路电感估计误差比远端短路估计误差大。在短路点
与保护测量位置达到 50% 线路长度以上后, 如果每
周波采样点数达到 30 点, 电感参数的估计值计算误
差将不大于 1%, 而在近端短路时, 如短路点距离馈
出线出口为 10% 线路全长时, 估计误差将会比较
大, 这与近端短路时母线残压较低有关, 对于这种情
况, 由于测量阻抗模值比保护动作值小许多, 只要保
护的测量阻抗角没有大的误差, 近端短路时电感估
计误差将不会影响到保护动作的正确性。

表 1 基于微分方程的测量电感参数估计仿真结果

Tab. 1 Simulation results of parametrical estimation of
sensed inductance based on differential equation

短路点(线路长 度的百分比)/ % (每周波)	采样点数	测量电感估计值 (H, 期望值)	测量电感 理论值(H)	相对误差/ %
100	30	0.089 4	0.089	0.45
	20	0.090 2	0.089	1.35
	12	0.092 8	0.089	4.27
50	30	0.044 9	0.044 5	0.90
	20	0.045 3	0.044 5	1.80
	12	0.046 6	0.044 5	4.72
10	30	0.009 16	0.008 9	2.93
	20	0.009 25	0.008 9	3.93
	12	0.009 52	0.008 9	6.97

3 测量电阻在线估计改进算法

从上面的仿真结果中, 不难看出: 测量电感的估
计值与实际值之间的误差较小, 可以应用于距离保
护中, 而测量电阻的估计值与实际值相比, 则存在较
大的误差, 难以应用于距离保护中, 造成这一现象
的原因在于只有电压和电流信号发生变化时, 电感的
影响才会表现出来, 而电感的存在, 将使电压和电
流出现相位差, 该相位差的存在, 对测量电阻的参数
估计造成误差, 这一点可以通过在仿真模型中令电
感元件参数为零得到验证。为减小测量电阻参数估
计误差, 本文提出了一种基于瞬时功率消耗概念的
测量电阻参数估计模型。

在测量电阻上消耗的瞬时功率为(严格上说, 施
加在电阻上的电压只是母线电压的一部分, 而施加
在电阻上的真实电压是无法测量的):

$$p_k = v_k i_k = R i_k^2 \quad (10)$$

因此可得, 基于瞬时功率消耗的最小二乘测量
电阻估计值 \hat{R} 为:

$$\hat{R} = \frac{\sum_{k=1}^N v_k i_k^3}{\sum_{k=1}^N i_k^4} \quad (11)$$

对该测量电阻参数估计,应用前面所提到的系统模型进行仿真计算,仿真结果如表 2 所示,根据表 2 不难发现:测量电阻的估计误差也是随着每周波采样点数的增加而减小,但是,与测量电感估计误差与短路点位置关系不同,测量电阻的估计误差将随短路距离的增加而增加。

表 2 基于瞬时功率消耗的测量电阻参数估计仿真结果

Tab. 2 Simulation results of parametrical estimation of sensed resistance based on instantaneous power consumption.

短路点(线路长 度的百分比)/ %	采样点数 (每周波)	测量电阻估计值 (期望值)	测量电阻 理论值()	相对误差/ 差/ %
100	30	15.42	16.00	3.63
	20	15.26	16.00	4.63
	12	14.80	16.00	8.75
50	30	7.80	8.00	2.50
	20	7.75	8.00	3.13
	12	7.57	8.00	5.40
10	30	1.61	1.60	0.63
	20	1.595	1.60	0.31
	12	1.58	1.60	1.25

将表 1 和表 2 所示的估计参数估计值换算为测量阻抗的模值和阻抗角,可以得到表 3 所示的结果。

表 3 应用最小二乘法估计阻抗仿真结果

Tab. 3 Simulation results of parametrical estimation of sensed impedance based on least squares algorithm

短路点(线路长 度的百分比)/ %	采样点数 (每周波)	测量电感估计值 (期望值)	测量电抗 理论值()	阻抗模值 误差/ %	阻抗角 差/ (°)
100	30	32.027 61°	32.25 60°	0.69	1°
	20	32.165 62°	32.25 60°	0.26	2°
	12	32.68 63°	32.25 60°	1.32	3°
50	30	16.11 61°	16.125 60°	0.09	1°
	20	16.20 61.5°	16.125 60°	0.47	1.5°
	12	16.47 62.5°	16.125 60°	2.14	2.5°
10	30	3.30 61.5°	3.225 60°	2.32	1°
	20	3.31 61.5°	3.225 60°	2.63	1.5°
	12	3.38 62.5°	3.225 60°	4.80	2.5°

表 3 清楚地表明了:只要每周波采样点达到 20 点,通过最小二乘法估计获得的测量阻抗模值和测量阻抗角误差都在可以接受的误差范围内,线路近端短路的测量阻抗模值虽然误差较大,但测量阻抗角误差仍然是可以接受的,因此不会影响到保护动作的正确性。

速动性是继电保护的基本要求之一,如果采用一个周波采样数据作为参数估计的样本数据,同时应用式(8)和式(11)所示的最小二乘法估计算法,则保护的最小动作时间大于 20 ms。如果参与参数估计计算的样本数据只有半个周波采样数据或 1/4 周波的采样数据,而同时又能达到要求的估计精度,将会有效地

提高保护的速动性。

估计精度和参与估计的样本数据窗口长度有关,过多地增加每周波采样点数,会增加微机保护硬件资源和软件的负担。我们选择每周波采样点数为 30 点,分别对估计样本数据长度为 8 和 15 两种情况进行仿真计算,结果如表 4 所示。

表 4 半波和 1/4 周波采样数据应用于最小二乘估计阻抗仿真结果

Tab. 4 Simulation results of sensed impedance using the sample data of half and a quarter period wave

短路点(线路长 度的百分比)/ %	采样点数 (每周波)	测量电感估计值 (期望值)	测量电抗 理论值()	阻抗模值 误差/ %	阻抗角 差/ (°)
100	8	-	32.25 60°	-	-
	15	32.01 61°	32.25 60°	0.75	1°
50	8	-	16.125 60°	-	-
	15	16.02 61°	16.125 60°	0.65	1°

如果样本数据为每周波采样数据的 1/4,由于 1/4 周波的有功功率计算没有意义,所以进行的测量电阻值将大幅度波动。这时的测量阻抗估计值也是没有意义的。从表 4 的数据中可以看出:当每周波采样点数为 30 点时,采用半个周波的采样数据进行测量阻抗的估计,即可满足保护对测量阻抗计算误差的要求,这意味着阻抗保护的最小动作时间接近 10 ms。

从理论上说,基于微分方程的电感、电阻参数估计不受短路过程中电压、电流的非周期分量的影响。表 5 是对短路故障中电压、电流分别经过数字低通滤波器和没有低通滤波器的计算结果,滤波器为 3 阶 Butterworth 低通滤波器,通带截止频率(归一化)为 0.5 Hz。

表 5 低通滤波器对计算结果的影响

Tab. 5 Results influenced by the low-pass filter

	有滤波器		无滤波器		实际参数	
	电阻/	电感/ H	电阻/	电感/ H	电阻/	电感/ H
非故障	211.80	0.492 8	213.20	0.493 2	211.00	0.489 0
有故障	8.08	0.044 9	7.80	0.044 9	8.00	0.445 0

4 结束语

通过前面的分析和仿真结果,可以看出:

通过利用参数估计方法计算线路测量电阻和电感,进而计算出阻抗保护的测量阻抗,是一种技术上可行的途径,这种方法不受短路过程的非周期分量和高次谐波分量的影响;

利用参数估计方法计算阻抗保护的测量阻抗,保护的最小动作时间接近于 10 ms,是保护速动性的有效保证之一。

基于瞬时有功功率概念的测量电阻参数估计,

可以有效地确保测量阻抗模值和阻抗角的精度。

当然,本文所进行的研究还仅是对参数估计方法在阻抗保护中应用的一个初步探讨,所应用的也是最基本的最小二乘算法,仍然有许多技术细节需要进一步研究,如参数估计的递推算法对测量精度和响应时间的影响、测量噪声对测量精度的影响、运算电流和运算电压对测量精度的影响等。这些问题将在今后的工作中进一步探讨。

参考文献:

- [1] Alfuhaid A S, El-Sayed M A. A Recursive Least-squares Digital Distance Relaying Algorithm[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 1999,14(4):1257-1262.
- [2] Isaksson A. Digital Protective Relaying through Recursive Least-squares Identification [J]. IEE Proceedings, 1988,135(5):441-449.
- [3] Trinidad S, Pierre B, Mathieu G, et al. Fundamental Basis for Distance Relaying with Parametrical Estimation [J]. IEEE Trans on Power Delivery, 2001,16(1):99-

104.

- [4] 张哲,陈德树(ZHANG Zhe, CHEN De-shu). 递推最小二乘法在微机距离保护中的应用研究(Application of Recursive Least Square Algorithm in Distance Relaying) [J]. 电力系统自动化(Automation of Electric Power System). 1991,15(4):31-40.
- [5] 贺家李,宋从矩(HE Jia-li, SONG Cong-ju). 电力系统继电保护原理(The Principle of Relay in Power Systems) [M]. 北京:中国电力出版社(Beijing: China Electric Power Press), 1994.

收稿日期: 2003-09-02; 修回日期: 2003-11-25

作者简介:

黄彦全(1961-),男,副教授,主要从事综合自动化和微机保护方面的研究;

肖建(1950-),男,教授,博士生导师,主要从事自动控制理论和应用研究;

李晋(1962-),男,高级工程师,从事电气化铁路方面研究。

Primary research of implementing least squares in digital distance relaying

HUANG Yan-quan¹, XIAO Jian¹, LI Jin², TANG Lei¹

(1. Institute of Electrical Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China;

2. Electrification Department, First Survey & Design Institute of Railway, Lanzhou 730000, China)

Abstract: Sensed impedance of distance relay may be distorted by the non-periodic and harmonic value of the sensed voltage and current. To ensure the operating correctness of distance relay, the fundamental voltage and current for impedance calculation must be obtained. The popular principle of parametrical estimation is the least squares algorithm. The least squares algorithm is applied to the distance relay in this paper. The system model based on the differential equation is constructed. Since the MSE(Mean Square Error) of estimating resistance based on the model of differential equation is unacceptable, a new model of instant power consumption for estimating resistance is suggested. Both the model based on the differential equation and that based on the instant power consumption are validated by simulation. The result of analysis and simulation shows that the sensed impedance for distance relay can be gotten by individually estimating inductance and resistance.

Key words: distance relay; least squares algorithm; sensed inductance; sensed resistance

浙江决定投资 500 亿元建电厂电网

浙江省电力公司消息:为在 2007 年前完全解决“电荒”问题,浙江省决定投资 500 亿元加快电厂和电网建设。同时,简化地方审批事项,促进地方电厂建设的速度。目前,已审批地方电厂项目 77 项,总装机容量达 1283 MW。

据悉,从 2004 年至 2007 年,浙江省用电量将存在较大缺口,预计 2004 年全省社会用电量需求达 1530 亿 kWh 以上,电量供应缺口达 200 亿 kWh 左右。面对日益趋紧的用电形势,省委、省政府在要求清理耗电耗能项目的基础上,决定加快电厂和电网建设,投入 500 亿元,确保“三个一千二百万”计划(建成发电、在建和拟建各 12000 MW 的电厂项目)和加快电网项目建设,逐步形成以大型电厂为支撑,500 kV 环网为主网架的安全可靠、绿色环保的电力保障体系。