

# 一种基于 PMU 的线路自适应故障测距算法

李胜芳, 范春菊, 郁惟镛

(上海交通大学电气工程系 上海 200030)

**摘要:** 提出一种新的基于相量测量单元(PMU)的输电线路故障测距的自适应算法。该算法利用 PMU 装置获得高压线路两端的电压和电流相量,在线计算线路参数,解决了线路实际参数与电力局所提供参数的不同、线路参数在运行过程中的不确定性等问题。采用前置带通滤波器与全波傅氏算法相结合的滤波算法,提取相当精确的突变量基频分量,用于输电线路故障测距。大量的 EMTP 仿真计算结果和实际系统参数验证结果表明,该测距算法不受系统的运行方式、故障点过渡电阻、故障类型、故障距离等因素的影响,具有很高的测距精度。

**关键词:** 故障测距; 相量测量单元(PMU); 线路参数

**中图分类号:** TM773 **文献标识码:** A **文章编号:** 1003-4897(2004)10-0006-04

## 0 引言

输电线路担负着传送电能的重要任务,其故障直接威胁到电力系统的安全运行。高压输电线路准确的故障测距,对于加速线路故障排除,尽快恢复供电具有重要的意义。从供电质量和经济的角度来看,输电线路的精确故障测距显得越来越重要。

国内外对于故障定位方法的研究已进行了几十年,提出了大量的故障测距原理和方法。根据采用的线路模型、测距原理、被测量与测量设备等的不同,现有的故障测距可以有多种分类方法。按照工作原理可以分为阻抗法、行波法和故障分析法。其中,阻抗法由于故障过渡电阻、线路不完全对称等因素影响,测距误差较大,不能满足电力生产要求;行波法存在出口短路有死区、硬件造价高等问题,实际应用还有待研究。故障分析法中的单端测距算法,由于信息量不足,测距精度始终要受系统运行方式和过渡电阻的影响,结果不甚理想。而双端测距算法充分利用故障信息,可以取得很高的测距精度。尤其是近年来,相量测量装置的研制和开发,为双端故障测距提供了新的工具<sup>[1]</sup>,基于 PMU (Phasor Measurement Unit) 的双端测距新算法,可以提高测距精度。

为了提高测距精度,本文提出了一种基于 PMU 的输电线路自适应故障测距算法,该算法基于 GPS (Global Positioning System) 的同步相量测量,以 GPS 提供的时间为基准,对电力系统不同节点的电压和电流的基波相量进行同步测量<sup>[1]</sup>。凭借此新技术可

以解决长距离输电线两端相量测量的同步问题,而且有高达 1 μs 的同步时间精度,满足实际电力系统的精度要求。本算法利用 PMU 获得线路两端的电压和电流相量,在线计算线路参数<sup>[2]</sup>,避免了由线路参数的不准确带来的测距误差。采用集中参数模型,利用线路两端故障前后的采样数据获取突变量,实时计算系统阻抗用于故障测距,因而算法不受系统运行方式的影响。大量 EMTP 仿真结果及实际数据验证表明,算法精度很高,满足实用要求。

## 1 PMU 简介

近年来,各种不同的数字信号处理技术被应用于电力系统。其中,PMU 作为一种实时测量系统受到了广泛的注意。PMU 由微处理器、GPS 接收器、信号变送模块及通信模块组成,其构成如图 1 所示。

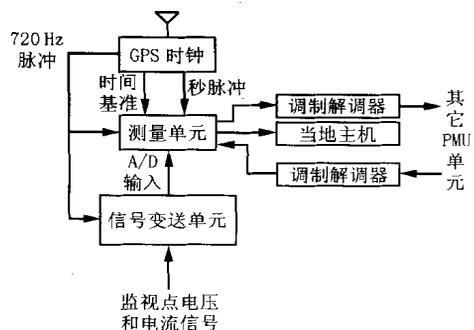


图 1 PMU 的构成

Fig. 1 Configuration of PMU

三相电压电流暂态量经由 PT、CT 输入信号变送单元,进行 A/D 转换、滤波后的高精度信号进入

测量单元,由微处理器计算相对于 GPS 同步参考时间的相量值,加上同步时间构成数据帧传送给通信模块。

相量测量可以采用过零检测法、快速傅里叶变换法(FFT)和离散傅里叶变换法(DFT)等。现已研制并投入使用的 PMU 一般采用离散傅里叶变换法计算相量。

全球卫星定位系统(GPS)具有高精度、全天候、连续实时等优点,基于 GPS 的同步相量测量单元使用进一步提高输电线路故障测距精度成为可能。

## 2 线路参数在线计算<sup>[2]</sup>

现有的测距算法,一般采用电力局提供的线路参数进行测距研究。事实上,电力局提供的参数,是非常理想化的,实际线路参数不仅会随着环境条件的变化而不同,而且与系统运行情况有关,存在着不确定性。而现有的测距算法几乎都没有考虑线路参数的不确定性,由于线路参数的不准确给测距结果带来较大误差。从我们的仿真结果(表 1)可以看出,线路参数 5%左右的误差就会导致故障测距的显著误差(在单相接地情况下可达 2.202%~5%,不能满足实际要求)。对于使用中的输电线,很难预计其线路参数的变化。但是,现在利用同步相量测量技术,我们可以得到相当精确的相量用以在线监测输电线路状态,从而计算线路实际参数。图 2 所示为两端电源系统。

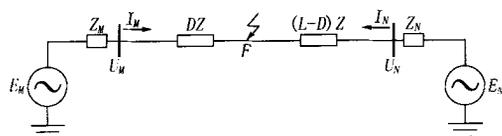


图 2 单回线等效网络

Fig. 2 Equivalent network of single-circuit line

在图示参考方向下,根据均匀传输线的长线方程,有下式成立:

$$\begin{aligned} U_M &= U_N \operatorname{ch}(l) - I_N Z_C \operatorname{sh}(l) \\ I_M &= -I_N \operatorname{ch}(l) + \frac{U_N}{Z_C} \operatorname{sh}(l) \end{aligned} \quad (1)$$

式中:  $Z_C$ 、 $\gamma$  分别为线路的特性阻抗和传播常数。

在系统装设 PMU 的情况下,线路两端电压电流相量  $U_M$ 、 $U_N$ 、 $I_M$ 、 $I_N$  为已知量,由方程(1)可求出  $Z_C$ 、 $\gamma$ ,可进一步算出线路单位长度阻抗  $Z$  和导纳  $Y$ :

$$\begin{aligned} Z &= Z_C \\ Y &= \gamma / Z_C \end{aligned} \quad (2)$$

值得注意的是,以上公式中各电压电流量可采用序分量或者模分量,求出的线路参数为对应的序分量或模分量参数。本文即通过 PMU 获得正常运行时线路两端的正序电压、电流值,由式(2)求得线路正序阻抗和导纳用于故障测距。

本文采用华东电网的实际数据对测距算法进行验证时,对于全长 139 km 的兰亭线路,在线计算出来的线路参数为  $Z_1 = 1.8626 + j38.92$ ,而电力局给定参数为  $Z_1 = 1.8 + j37.41$ ,二者模值相差 3.88%,由表 4 可以看到,相对于直接使用给定参数,采用在线计算参数后,测距精度提高了 0.2%左右。

## 3 故障测距的自适应滤波算法

在故障分析法中,除了解微分方程法使用瞬时电压和电流,多数算法均使用工频量(相量)测距。就测距而言,按照以时间换精度的原则,相量测距方法要比解微分方程法更有效和实用。电力系统发生故障后的最初瞬变过程中,电压和电流信号由于混有衰减直流分量和谐波成分而发生严重的畸变。所以,在基于工频分量的方法中,最重要的问题是滤波,滤波的精度直接影响到测距结果。

由于故障测距并无实时要求,所以这里采用全波傅氏算法来分离出 50 Hz 的基波分量。考虑到傅氏算法在滤除衰减非周期分量方面的局限性,采用在单一数据窗下对全波傅氏算法进行校正的方法,可以获取较高的滤波精度<sup>[3]</sup>,但是,对于非整次谐波,该算法具有一定的局限性。

在实际的高压输电线路中,由于分布电容的存在,当输电线路发生故障时,存在大量的非整次谐波,这些谐波的存在,直接影响到滤波的精度,从而影响到测距的精度。为此,我们设计了一个前置带通滤波器来削弱非整次谐波的影响。假设理想带通滤波器的下边带截止频率为  $f_1 = 45$  Hz,上边带截止频率  $f_h = 55$  Hz,选取海明窗作为窗口函数。

设带通时延为  $\tau$ ,理想带通滤波器频谱特性为

$$H_d(e^{j\omega}) = \begin{cases} e^{-j\omega\tau} & |1 - \omega| < \omega_h \\ 0 & \text{其他} \end{cases}$$

由  $h_d(n) = \frac{1}{2} \int_{-\omega_h}^{\omega_h} H_d(e^{j\omega}) e^{j\omega n} d\omega$  可以求得理想单位脉

冲响应为

$$h_d(n) = \frac{2}{(n-)} \cos[(n-)(f_h + f_l) T_s] \cdot \sin[(n-)(f_h - f_l) T_s]$$

取海明窗作为截取窗口,海明窗函数序列  $w(n)$  如下式:

$$w(n) = 0.54 - 0.46\cos(\frac{2n}{N-1}), 0 \leq n \leq N-1$$

所以,该 FIR 带通滤波器的单位脉冲响应为:

$$h(n) = h_d(n) w(n)$$

根据本文算法,首先将采样数据进行差分,消除直流分量的影响,然后与  $h(n)$  作卷积,即可得到滤波器输出。再将该输出进行全周傅氏滤波,并进行校正,就可以得到几乎接近于基波的电压、电流信号,用于故障测距,就可以提高算法的测距精度。

#### 4 测距算法<sup>[5]</sup>

如图 2 所示的两侧电源系统,若线路在  $F$  点发生故障后,可以根据对称分量和线性叠加原理,将故障态电力网络分解为故障前正常状态网络和故障后附加正序网、负序网和零序网(如图 3 示,  $i$  取 1、2、0 分别表示正、负、零序)。

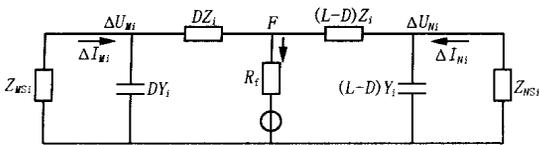


图 3 故障附加分量序网图

Fig. 3 Sequence network of additional fault components

利用线路两侧电压、电流突变量的序分量来求取线路两侧的等值的各序系统阻抗。再利用图 3 的电压、电流及故障距离的关系,分别从  $M$  侧和  $N$  侧开始计算故障点  $F$  处的电压  $U_F$ ,考虑到两侧数据的同步误差,取其模值相等,列出故障测距方程:

$$\left| \left( I_{Mi} - U_{Mi} D Y_i \right) \times \left[ \left( Z_{MSi} // \frac{1}{D Y_i} \right) + D Z_i \right] \right| = \left| \left[ I_{Ni} - U_{Ni} (L - D) Y_i \right] \times \left[ \left( Z_{NSi} // \frac{1}{(L - D) Y_i} \right) + (L - D) Z_i \right] \right| \quad (3)$$

其中  $D$  为  $M$  端到故障点的距离。

单回线故障可粗略地分为对称故障和非对称故障两种。本算法首先通过检测负序量来区分故障类型,若是非对称故障,则式(3)选用负序分量(受负荷电流的影响较小)计算故障距离;若是对称故障(即

三相短路),则式(3)中各量均选用正序分量进行求解。对于输电线路,由于  $Z_1 = Z_2$ ,因此利用 PMU 的正序量求得的线路正序阻抗和导纳完全可以作为负序参数用于非对称故障的测距。所以,按照上述方法求得式(3)中所需各量,然后解方程即可求出故障距离  $D$ ,测距结果与系统运行方式等无关。

#### 5 算法的验证

##### 5.1 EMTP 仿真

由于本算法是基于集中参数模型的,为了验证算法对分布参数长线路的适应性,仿真模型我们采用了分布参数模型,线路长 200 km。仿真模拟了单相接地、相间短路、两相接地和三相短路各种短路故障类型,将线路 10 等分来设置短路点。

为了验证线路参数对测距结果的影响,分别采用给定的线路参数及在线计算的线路参数进行测距,过渡电阻为 200  $\Omega$  时的测距结果如表 1。

表 1 采用不同线路参数时的测距结果

Tab. 1 Fault location results using different line parameters

故障类型	实际故障距离/km	给定参数测距结果/km	误差/(%)	在线计算参数时的测距结果/km	误差/(%)
单相接地	10	14.405 0	2.202 5	10.880 0	0.440 0
	30	33.240 0	1.620 0	30.170 0	0.085 0
	50	52.090 0	1.045 0	49.480 0	-0.260 0
	90	88.380 0	-0.810 0	90.080 0	0.040 0
相间短路	10	13.995 0	1.997 5	10.460 0	0.230 0
	30	32.875 0	1.437 5	29.800 0	-0.100 0
	90	88.205 0	-0.897 5	89.905 0	-0.047 5
两相接地短路	10	13.655 0	1.827 5	10.110 0	0.055 0
	50	51.555 0	0.777 5	48.930 0	-0.535 0
	90	88.170 0	-0.915 0	89.875 0	-0.062 5
三相短路	30	32.170 0	1.085 0	29.130 0	-0.435 0
	90	89.325 0	-0.337 5	89.625 0	-0.185 0
	150	147.505 0	-1.247 5	148.750 0	-0.625 0

根据 PMU 数据计算所得线路参数为  $Z_1 = Z_2 = 0.013 4 + j0.280 0 \Omega / \text{km}$ ,  $C_1 = 0.012 2 \mu\text{F} / \text{km}$ , 计算中使用的给定线路参数为  $Z_1 = Z_2 = 0.02 + j0.29 \Omega / \text{km}$ ,  $C_1 = 0.013 \mu\text{F} / \text{km}$ , 阻抗和电容的误差分别是 4.27% 和 6.56%, 而从上表可以看出,这会引起显著的测距误差,在单相接地时高达 2.202 5%。因此,本文利用 PMU 数据对线路参数进行在线计算,减小了参数的不确定性,从而大大提高了故障测距精度。

多数故障测距算法都是基于工频相量的,因此滤波方法对测距精度有很大影响。表 2 给出了仅用全波傅氏算法滤波和傅氏算法加前置带通滤波两种情况下的测距结果对比。

表 2 采用不同滤波算法时的测距结果

Tab. 2 Fault location results with different

filtering algorithms

故障类型	实际故障距离/km	傅氏滤波测距结果/km	误差/(%)	改进滤波后的测距结果/km	误差/(%)
单相接地短路	10	12.315	1.157 5	10.880 0	0.440 0
	30	31.115	0.557 5	30.170 0	0.085 0
	50	51.180	0.590 0	49.480 0	-0.260 0
	90	88.565	-0.717 5	90.080 0	0.040 0
相间短路	10	13.930	1.965 0	10.460 0	0.230 0
	30	31.245	0.622 5	29.800 0	-0.100 0
	90	88.495	-0.752 5	89.905 0	-0.047 5
相间接地短路	10	12.975	1.487 5	10.110 0	0.055 0
	50	51.825	0.912 5	48.930 0	-0.535 0
	90	88.525	-0.737 5	89.875 0	-0.062 5
三相短路	30	32.445	1.222 5	29.130 0	-0.435 0
	90	89.720	-0.140 0	89.625 0	-0.185 0
	150	147.750	-1.125 0	148.750 0	-0.625 0

由表 2 可以看出,若不加前置带通滤波器,则大多数故障情况下的测距结果误差较大,相间短路故障点靠近  $M$  侧时,误差几乎达到了 4 km,相应地改进滤波后测距误差仅 0.46 km。可见,对于采用工频量的测距算法,尽量提高滤波精度是至关重要的。

本算法不受过渡电阻影响,对于过渡电阻较高的故障情况同样可以取得很高的精度,部分仿真结果见表 3。

表 3 不同过渡电阻情况下的测距结果

Tab. 3 Fault location results under different

transition resistances

故障类型	实际故障距离/km	过渡电阻 /	测距结果 /km	误差 / (%)
单相接地短路	10	100	10.920 0	0.460 0
		200	10.880 0	0.440 0
	50	100	49.520 0	-0.240 0
		200	49.480 0	-0.260 0
相间短路	10	100	90.100 0	0.050 0
		200	90.080 0	0.040 0
	30	5	10.460 0	0.230 0
		5	29.800 0	-0.100 0
90	5	89.905 0	-0.047 5	
	100	10.315 0	0.157 5	
两相接地短路	10	200	10.390 0	0.195 0
		100	49.180 0	-0.410 0
	50	200	49.230 0	-0.385 0
		100	89.840 0	0.080 0
三相短路	90	200	89.875 0	0.062 5
		2	29.130 0	-0.435 0
	30	2	89.625 0	-0.185 0
		2	148.750 0	-0.625 0

由表 3 可见,即使是在高阻接地的情况下,测距仍然能够得到比较精确的结果。

## 5.2 实际数据验证

为了说明本算法的实用性,采用华东电管局实际故障数据对算法进行了验证,结果见表 4。

表 4 实际数据测距结果

Tab. 4 Real fault location results

故障线路	武南 - 瓶窑	兰亭 - 双龙	双龙 - 瓯海
故障时间	01/4/29	01/7/7	01/8/24
故障类型	A0	B0	A0
线路全长/km	143	139	173.158 0
巡线结果/km	16.046	30.600 0	53.984 0
给定参数测距结果/km	15.020	31.275 0	55.410 6
误差/(%)	-0.513	0.337 5	0.713 3
在线计算参数测距结果/km	16.520	30.400 0	52.600 0
误差/(%)	0.237	-0.100 0	-0.690 0

从表 4 可以看到,实际测距结果精度很好,误差都在 1% 以下。并且,采用 PMU 在线计算参数后的实际测距结果较直接使用电管局给定参数测距的精度有所提高,再次说明将 PMU 用于线路故障测距不仅可以取得良好的仿真结果,而且可投入实际应用。

## 6 结论

本算法利用线路两端故障前后的 PMU 数据,在线计算线路参数及系统阻抗,消除了线路参数的不确定性及系统运行方式对测距精度的影响,是一种自适应的故障测距算法。原理上不受过渡电阻、故障距离等的影响,EMTP 仿真结果及实际数据的验证均获得了良好的精度,具有实用价值。

## 参考文献:

- [1] 傅周兴,郭颖娜,何文林 (FU Zhou-xing, GUO Ying-na, HE Wen-lin). 基于 GPS 同步时钟的相量测量在电力系统中的应用研究 (Study on Application of Synchronous Clock's Phasor Measurements Based on GPS in Power System) [J]. 继电器 (Relay), 2001, 29(7): 31-34.
- [2] JIANG J A, YANG J Z, LIN J Z, et al. An Adaptive PMU Based Fault Detection/Location Technique for Transmission Lines—Part I: Theory and Algorithms [J]. IEEE Trans on Power Delivery, 2000, 15(2): 486-493.
- [3] 李孟秋,王耀南,王辉 (LI Meng-qiu, WANG Yao-nan, WANG Hui). 基于全周波富氏算法滤除衰减直流分量新方法 (A New Algorithm for Filtering Decaying DC Component Based on Holocycle Fourier Algorithm) [J]. 湖南大学学报 (自然科学版) (Journal of Hunan University, Natural Science Edition), 2001, 28(1): 59-63.
- [4] 董新洲,葛耀中 (DONG Xin-zhou, GE Yao-zhong). 一种使用两端电气量的高压输电线路故障测距算法 (Algorithm for High Voltage Transmission Line Fault Location Using One Terminal Voltage and Two Terminal Current) [J]. 电力系统自动化 (Automation of Electric Power Systems), 1995, 19(8): 47-53.

(下转第 23 页 continued on page 23)

- System Theory) [J]. 中国电机工程学报 (Proceedings of the CSEE), 2003, 23(1): 20-25.
- [3] 韩景红, 秦世引, 宋永华 (HAN Jing-hong, QIAN Shi-yin, SONG Yong-hua). 基于学习自动机的混杂电力系统紧急频率控制 (The Frequency Control in Emergency of Hybrid Power System Based on Learning Automata) [J]. 电力系统自动化 (Automation of Electric Power Systems), 2000, 24(18): 8-12.
- [4] 张元鹏, 黄要桂 (ZHANG Yuan-peng, HUANG Yao-gui). 静态电压稳定分析中的动态元件模型及其实现 (The Model of Dynamical Composition and Its Realization of Study on Static Voltage Stability Analysis) [J]. 中国电机工程学报 (Proceedings of the CSEE), 2000, 20(3): 66-70.
- [5] Hill D.J. Nonlinear Dynamical Load Models with Recovery for Voltage Stability Studies [J]. IEEE Trans on Power System, 1993, 8(1): 166-176.
- [6] Popovic D, Hiskens I A, Hill D. Investigation of Loadtap Changer Interaction [J]. Electrical Power & Energy System, 1996, 18(2): 81-97.

收稿日期: 2003-07-28; 修回日期: 2003-10-10

作者简介:

杨昆(1979-), 男, 硕士研究生, 研究方向为电力系统混杂平台建模分析与控制;

赵洪山(1965-), 男, 博士研究生, 研究方向为混杂电力系统动态分析与控制以及电力系统离散事件动态特性分析;

米增强(1960-), 男, 教授, 研究方向为混杂电力系统自动化与混杂电力系统动态分析与控制。

### Application of hybrid theory in OLTC modeling

YANG Kun, MI Zeng-qiang, ZHAO Hong-shan, WANG Xiao-dong  
(North China Electric Power University, Baoding 071003, China)

**Abstract:** Since the dynamic behaviors of power system represent the characteristic of hybrid system, it is difficult to research the voltage control on the load side. The paper describes the basic thoughts of hybrid theory and programmable timed Petri nets (PTPN). Based on hybrid theory, the hybrid model of regulation for OLTC's taps is built by the way of PTPN. Finally the model is simulated in a simple single generator system, and the changing curves of bus voltage and its discrete variable are obtained. The result shows that the model is reasonable, and it can take positive effect on postponing the voltage collapse.

**Key words:** OLTC; hybrid system; programmable timed Petri nets; modelling

(上接第9页 continued from page 9)

- [5] 蔡华嵘, 范春菊, 郁惟镛 (CAI Hua-rong, FAN Chun-ju, YU Wei-yong). 一种实用的高压输电线路双端电气量故障测距新算法 (A New Practical Double-terminal Fault Location Algorithm for HV Transmission Line) [J]. 中国电力 (Electric Power), 2003, 36(7): 31-34.

作者简介:

李胜芳(1979-), 女, 硕士研究生, 研究方向为电力系统继电保护及综合自动化;

范春菊(1967-), 女, 副教授, 在职博士生, 长期从事人工智能在继电保护及综合自动化的研究及教学工作;

郁惟镛(1940-), 男, 教授, 博士生导师, 长期从事人工智能在继电保护及综合自动化的研究及教学工作。

收稿日期: 2003-09-05; 修回日期: 2003-09-27

### An adaptive fault location algorithm based on PMU for transmission line

LI Sheng-fang, FAN Chun-ju, YU Wei-yong  
(School of Electrical Engineering, Shanghai University, Shanghai 200030, China)

**Abstract:** A new adaptive fault location algorithm based on phasor measurement unit (PMU) for transmission line is presented in this paper. Voltage and current phasors of both ends of the transmission line are obtained through PMU. The online parameter estimation algorithm is adopted to solve the problems such as practical parameters being different from parameters provided by electric power company, and the uncertainty of line parameters in the process of operation. The DFT based filter combined with a bandpass filter help to extract extremely accurate fundamental frequency components for calculation of fault location. Extensive EMTP simulations as well as practical system data test results have shown that the proposed algorithm allows for accurate estimation in fault location, and is immune from the operation mode, transition resistance at fault point, fault types and fault distance.

**Key words:** fault location; phasor measurement unit (PMU); line parameter