

采用输电线路双端信号的故障精确定位系统

龚庆武, 雷庆生, 王志梅, 陈允平

(武汉水利电力大学电气工程学院, 湖北 武汉 430072)

【摘要】 介绍了一种新型的故障定位系统,该系统采用了输电线路双端电流电压信号进行故障定位,从而消除在对双侧电源线路进行故障定位时由过渡电阻所引起的误差。在文中,首先推导了这种新型故障定位算法的数学模型;然后介绍了其框图,系统中采用了全球卫星定位系统(GPS)作为本地和远端信号的同步信号;第三部分介绍其软硬件的流程图;最后部分是数字仿真结果和分析以及结论。数字仿真的结果表明本算法是一种高精度和高效率的方法。

【关键词】 双端信号; 精确; 故障定位; GPS; 同步采样; 硬件; 软件

1 引言

随着我国电力工业的飞速发展,电力系统的规模越来越大,输电线路的电压等级越来越高,长度也越来越长,经过的各种环境也纷繁复杂,因此,故障的次数也就不可避免会增加。现有的故障定位方法因只采用单侧的电流、电压信号,无法克服由于对侧助增电流和过渡阻抗所引起的测量误差,即使采用种种修正方法,也无法从根本上消除这种误差,获得精确的故障定位结果^{[1][2][3]}。精确的故障定位结果将极大地缩短找寻故障点的时间,提高供电可靠性。所以,为了解决双侧电源线路的故障定位精度问题,最根本的一条就是采用两侧的电流、电压信号。这样就能从理论上解决问题。本文详细阐述了这种新型算法的数学模型、硬件和数字仿真结果。

2 数学模型^{[4][5]}

现存的故障定位装置都只采用了本侧的电流、电压信号,定位算法大多采用代数方程。由戴维南定理可知,若只采用就地信号,因为两侧的电源电压幅值、相位和阻抗不同时知道,所以对两侧电源线路经过渡电阻发生的故障,采用传统的方法就无法得到精确的结果。正确的方法应是采用输电线路两侧的信号,对在主保护范围内的故障进行故障定位,需在 0.1s 以内完成,故需采用可以计及过渡过程的微分方程作为数学模型以求得精确的定位结果。这就是本文所介绍的新的故障定位方法的主要思想。此外,传统的方法使用的是正序、负序和零序电流、电压,而我们知道,这些序分量只适用于稳态量,并不适用于暂态量。因此,对于暂态故障的精确定位,本

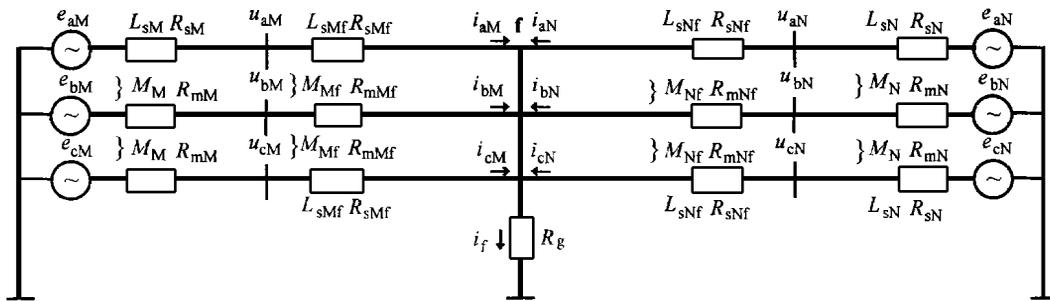


图 1 A 相接地故障系统图

Abstract In viewing the features and the development of the electricity market, this paper analyzes the requirements of the electricity market on the communication network with the emphasis on the functional requirements, the high reliabilities and the standards of the interfaces. Based on this, the importance of the low voltage distribution network based carrier communications is introduced. The main characteristics, the basic principles and the method of the realization of such kind of communication networks are discussed.

Keywords electricity market; carrier communication

文从基本的电路定律出发,采用微分方程替代以往使用的代数方程。微分方程中采用的参数是输电线路的最基本物理量:“相地回路”的自电感、自电阻、互感和互电阻。

如图 1 所示的系统,假定在 f 点发生故障。图 1 给出的是 A 相接地故障。根据基尔霍夫定律,我们可写出下列统一的方程:

$$u_{aM} = L_{SMF} \frac{di_{aM}}{dt} + R_{SMF} i_{aM} + M_{MF} \frac{di_{bM}}{dt} + R_{mMF} i_{bM} + M_{MF} \frac{di_{cM}}{dt} + R_{mMF} i_{cM} + R_g i_f \quad (1)$$

$$u_{aN} = L_{SNF} \frac{di_{aN}}{dt} + R_{SNF} i_{aN} + M_{NF} \frac{di_{bN}}{dt} + R_{mNF} i_{bN} + M_{NF} \frac{di_{cN}}{dt} + R_{mNF} i_{cN} + R_g i_f \quad (2)$$

式中: U_{aM} 、 U_{bM} 、 U_{cM} 分别为 M 侧母线的各相电压的瞬时值;

i_{aM} 、 i_{bM} 、 i_{cM} 分别为线路上 M 侧的各相电流的瞬时值;

L_{SM} 、 R_{SM} 分别为 M 侧系统的自电感、自电阻;

M_M 、 R_{mM} 分别为 M 侧系统的互电感、互电阻;

L_{SMF} 、 R_{SMF} 分别为 M 侧到故障点的输电线路“相地回路”的自电感、自电阻;

M_{MF} 、 R_{mMF} 分别为 M 侧到故障点的输电线路“相地回路”的互电感、互电阻;

U_{aN} 、 U_{bN} 、 U_{cN} 分别为 N 侧母线的各相电压的瞬时值;

i_{aN} 、 i_{bN} 、 i_{cN} 分别为线路上 N 侧的各相电流的瞬时值;

L_{SN} 、 R_{SN} 分别为 N 侧系统的自电感、自电阻;

M_N 、 R_{mN} 分别为 N 侧系统的互电感、互电阻;

L_{SNF} 、 R_{SNF} 分别为 N 侧到故障点的输电线路“相地回路”的自电感、自电阻;

M_{NF} 、 R_{mNF} 分别为 N 侧到故障点的输电线路“相地回路”的互电感、互电阻;

R_g 为接地故障时过渡电阻;

式(1)减去式(2),可得:

$$u_{aMN} = L_{SMF} \frac{di_{aM}}{dt} + R_{SMF} i_{aM} + M_{MF} \frac{d(i_{bM} + i_{cM})}{dt} + R_{mMF} (i_{bM} + i_{cM}) - L_{SNF} \frac{di_{aN}}{dt} - R_{SNF} i_{aN} - M_{NF} \frac{d(i_{bN} + i_{cN})}{dt} - R_{mNF} (i_{bN} + i_{cN}) \quad (3)$$

至此,故障定位问题已经转化为参数辨识问题。为简化算式,令

$$= \frac{R_s}{L_s}, \quad = \frac{M}{L_s}, \quad = \frac{R_{mM}}{L_s} \quad (4)$$

将(3)式离散化,并考虑到(4)式,可得:

$$u_{aMN}(k) = P \cdot L_s \cdot D_{aM}(k) - (1 - P) \cdot L_s \cdot D_{aN}(k) \quad (5)$$

式中,

$$D_{aM}(k) = \frac{i_{aM}(k+1) + [i_{bM}(k+1) + i_{cM}(k+1)]}{2T_s} - \frac{i_{aM}(k-1) + [i_{bM}(k-1) + i_{cM}(k-1)]}{2T_s} + \cdot i_{aM}(k) + [i_{bM}(k) + i_{cM}(k)]$$

$$D_{aN}(k) = \frac{i_{aN}(k+1) + [i_{bN}(k+1) + i_{cN}(k+1)]}{2T_s} - \frac{i_{aN}(k-1) + [i_{bN}(k-1) + i_{cN}(k-1)]}{2T_s} + \cdot i_{aN}(k) + [i_{bN}(k) + i_{cN}(k)]$$

由式(5)可得

$$P(k) = \frac{u_{aMN}(k) + L_s \cdot D_{aN}(k)}{L_s [D_{aM}(k) + D_{aN}(k)]} \quad (6)$$

这样就可以得到输电线路全长的百分数表示的定位结果。显而易见,过渡电阻对故障定位精度的影响消掉了。在任意时刻都消去了过渡电阻的影响是十分有意义的:由于过渡电阻一般是电弧,电弧的电阻是非线性和时变的。消除了过渡电阻对故障定位的影响后就使故障定位成了线性定常(线路的自感、互感等)的辨识问题。线性定常系统的参数辨识已有成熟的方法可以利用。

同理,我们可得到在其他故障条件下的故障定位数学方程式。因篇幅所限,在此不再赘述。

3 总体框图

由于本系统是一套采用双端信号的输电线路故障精确定位装置,因此,本系统需在与输电线路相关的双端母线处采集电流、电压信号,并且这些信号必须是同时同步采集到的。本系统采用了基于 GPS 的同步采样。GPS 的特点是,可以为全球各地随时提供一个高精度的时钟,并能保证各地间的时间误差在 1μs 以内。这样输电线路各侧信号的采集就有了一个高精度的统一时钟,从而也就保证了各端信号的同步。另外,使用调制解调器(MODEM)通过通信通道,就实现输电线路各侧信号的交换^{[5][6]}。图 2 是采用输电线路双端信号故障定位的原理图。

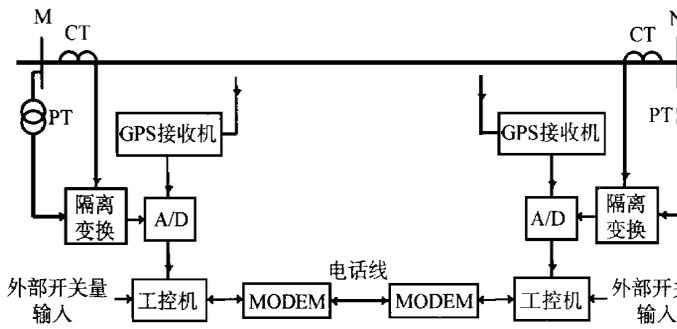


图 2 采用三端信号的输电线路故障精确定位系统

民用型 GPS 接收机由接收模块和天线组成。接收机在任意时刻能同时接收其 4~8 颗卫星,其内部硬件电路和处理软件通过对接收到的信号进行解码和处理,能从中提取并输出两种时间信号:一是间隔为 1s 的脉冲信号,即 1PPS,其脉冲前沿与国际标准时间(格林尼治时间)的同步误差不超过 1 μ s;二是经 RS-232 串行口输出的与 1PPS 脉冲前沿相对应的国际标准时间和日期代码(年-月-日,时:分:秒)。图 3 为此接收机的接收和输出示意图。

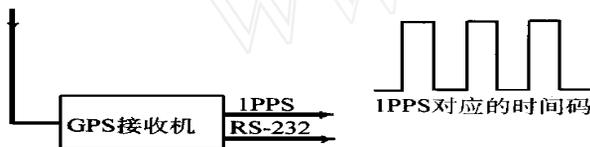


图 3 GPS 时间信息的接收和输出示意图

基于 GPS 的同步采样原理是这样的:由高精度晶振构成的振荡器经过分频能产生满足采样率要求的时钟信号,它每隔 1s 被 GPS 的 1PPS 信号同步一次,保证振荡器输出的脉冲信号的前沿与 GPS 时间同步。线路三侧都以振荡器输出的经过同步的时钟信号作为采样脉冲出控制各自的数据采集,因此采样是同步的。GPS 接收机经标准串口将时间码送给工控机,用于给采样数据以“时间标签”,并用于数据传送和处理。

下面以输电线路一侧的装置对硬件设计进行说明。

3.1 硬件框图及其实现^{[4][5][6][7]}

本装置的硬件框图为图 4。

在图 4 中,PCL-1800 是研华公司出产的 8 路模拟量高速数据采集卡,采样率为 330kHz,主要用于模拟量的采样和模数变换,同时还可用于数字量的输入和输出。PCL-1800 需插在工控机的扩展槽内,直接与工控的总线相连。PCLD-782 是 16 路光电耦

合板,外部开关量经 PCLD-782 上的光电耦合器变换成数字量后,再经 PCL-1800 输入工控机。PCLD-785 是 16 路出口继电器板,工控机需要输出的数字量,经 PCL-1800 输出到 PCLD-785,使得 PCLD-785 上的出口继电器动作,从而发出信号,呼唤值班人员。GPS-OEM 为 GPS 接收模块,它对接收到的卫星信号进行解码和处理,再输出从中提取的信号:1PPS 和与 1PPS 脉冲前沿相对应的国际标准时间(UCT)和日期代码(年-月-日,时:分:秒)。GPS 信号变换板的作用:一是将 1PPS 由正脉冲转换为负脉冲,然后

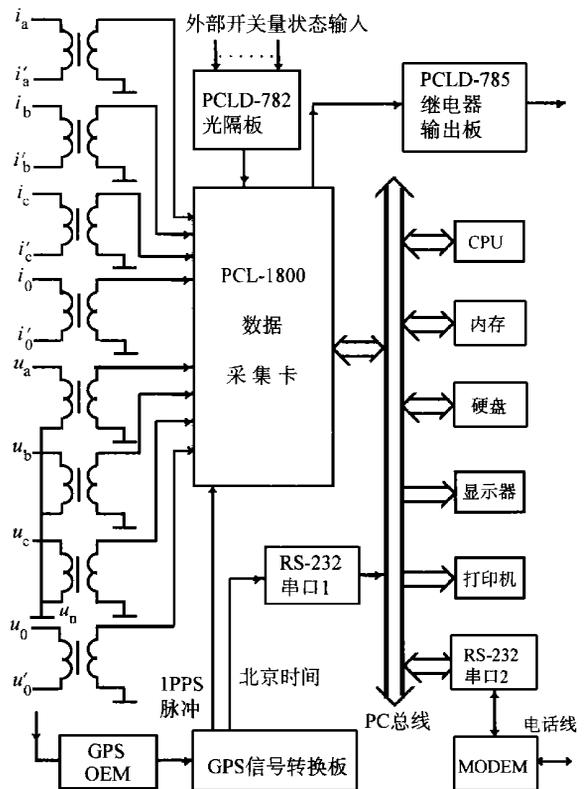


图 4 故障定位系统的总体框图

输入 PCL-1800;二是将国际标准时间转换成北京时间,再由串口 1 输入工控机,实现工控机时钟与 GPS 时钟的整点对时。再采用调制解调器(MODEM)经由电话线交换两侧的采样数据。

3.2 软件总体框图^[6]

图 5 是本系统的软件总体框图,图中最上面是程序的入口。程序入口的第一个模块是初始化。经过初始化后,是正点对时模块,在正点时 PC 机内的时钟将按 GPS 时钟进行校准。对时后,数据采集系统将开始工作。由 1PPS 脉冲控制的 PCL-1800 的定时器将按照规定的采样间隔 T_s (本装置的 $T_s = 3\mu$ s)

不断发出采样脉冲,实现对电压、电流的同步采样。模数转换器将各模拟量的采样值转换成数字量后,再存入 PCL-1800 上的 RAM 循环存区(FIFO)。FIFO 存满后,再通过 PC 总线将 FIFO 中的数据传送到 PC 机的内存。然后进行自检,例如检查三相电流之和是否与零序电流相近等。如果电力系统正常运行,启动元件不启动,主程序将一直在上述程序中循环。

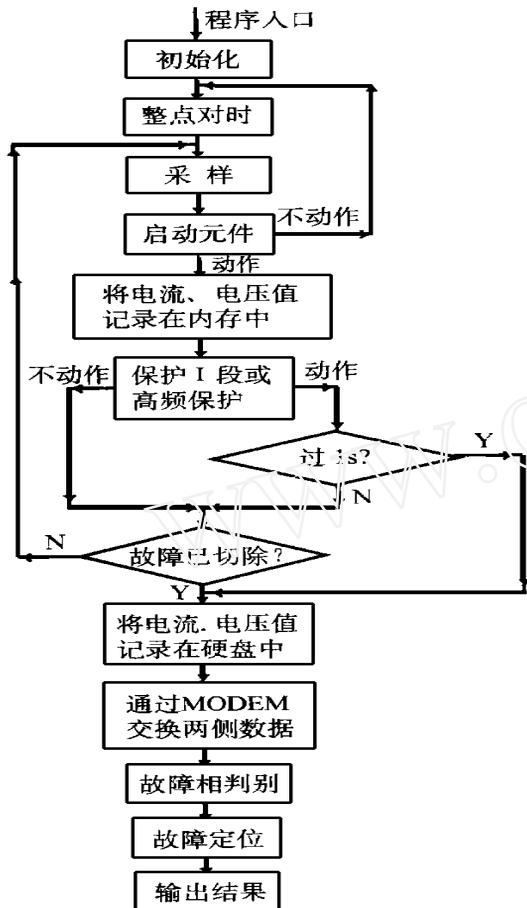


图5 软件总体框图

如果电力系统中有故障,启动元件会启动。主程序将跳转到故障处理部分。在故障处理时,数据采集部分仍然会如常工作,但不再进行对时和自检。此时,装置将不断对断路器辅助接点和保护动作信号等外部开关量进行监视。如果外部开关量显示故障已切除,主程序将跳转到故障定位部分。首先,装置将保存本侧的电流、电压值;然后,再通过 MODEM 经由电话线与对侧交换数据;最后,进行故障相判断,再得到故障定位结果。

4 数字仿真

为了验证算法的正确性,我们进行了数字仿真

试验,试验结果表明:在不同故障类型和高阻值的过渡电阻条件下,本算法的误差都小于 1%。

4.1 数字仿真模型^[8]

数字仿真模型如图 6 所示。仿真的数据由电力系统电磁暂态计算程序(EMTP)所产生。

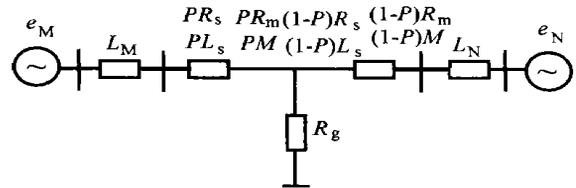


图6 数字仿真系统图

仿真模型的参数:

输电线路“相地回路”的自电阻、自电感分别为:

$$R_s = 0.0226 / \text{km}, L_s = 0.001663 \text{H/km}$$

输电线路“相地回路”的互电阻、互电感分别为:

$$R_m = 0.007 / \text{km}, M = 6.672 \times 10^{-4} \text{H/km}$$

输电线路长度:MN = 100km

母线电压:

$$e_M = 428 \sin t \text{ kV}, e_N = 388 \sin(t + 30^\circ) \text{ kV}$$

弧光电阻模型为:

$$R_{\text{arc}} = 1500 l / I$$

式中,弧长 $l = l_0 + 40t$ m; l_0 为弧长初值,对 500kV 线路单相接地为 4.5m,相间短路时为 12.5m; t 为折合时间, s, $0 \leq t \leq 0.02$,折合方法按下式计算:

$$t = [\text{mod}(t/0.02)] \times 0.02$$

式中, $\text{mod}(t/0.02)$ 是取 $(t/0.02)$ 的余值。

按上式算得的弧长和弧光电阻阻值呈周期性变化。

表1 故障定位结果

输电线路长度 = 100km 过渡电阻 = 100

故障类型	实际的故障距		误差 (%)
	离占线路全长的百分数	计算的故障距 离占线路全长的百分数	
单相接地	10	10.0339	0.0339
	50	49.8285	- 0.1715
	90	89.6166	- 0.3834
两相接地	10	9.940	- 0.060
	50	50.4636	0.4636
	90	89.9710	- 0.0290
两相接地短路	10	9.60	- 0.40
	50	49.866	- 0.134
	90	89.706	- 0.294
三相短路	10	9.6904	- 0.3096
	50	50.0459	0.0459
	90	89.89	- 0.11

4.2 数字仿真结果

在数字仿真中,模拟了各种类型的短路,并输出了电流、电压波形。在所有的试验中,故障定位的误差都小于1%。表1中列出了若干仿真计算的典型结果。

对于故障定位误差和过渡电阻的关系,我们进行了分析。其关系图如图7所示。由图10,我们可以得到以下结论:故障定位的误差与过渡电阻没有关系。这就证明了:本算法可以完全消除过渡电阻对故障定位精度的影响。

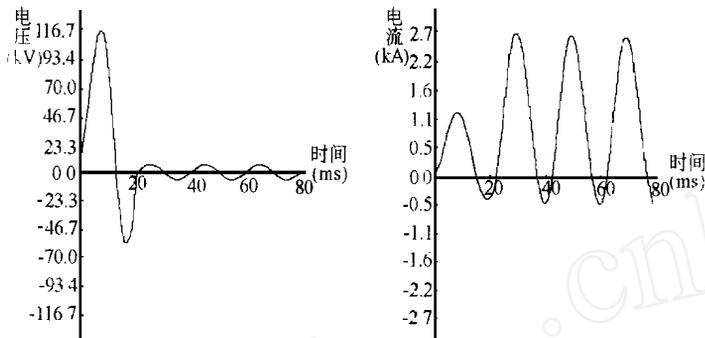


图7 在靠M侧10%处金属性短路时的电压、电流波形图

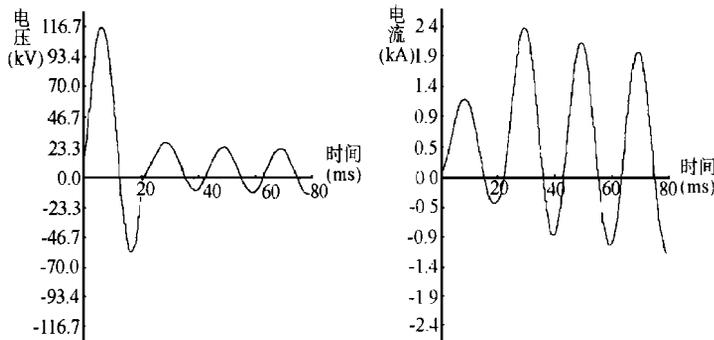


图8 在靠M侧10%处经线性小电阻故障时的电压、电流波形图

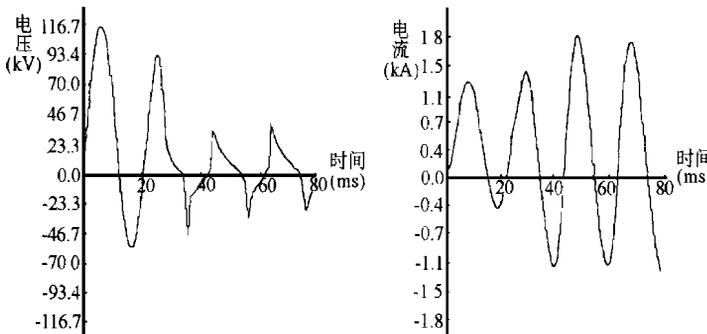


图9 在靠M侧10%处经弧电阻故障时的电压、电流波形图

同时,我们还分析了故障暂态过程对故障定位

精度影响的程度。当输电线路采用上述模型时,即使在靠近某一侧出口处故障,短路电流中含有很大的非周期分量的情况下,暂态过程都对故障定位精度没有影响。这与理论上的分析是一致的,由于本方法采用了微分方程,而暂态过程中的非周期分量是符合微分方程的,因此,非周期分量对本算法而言不再是造成误差的因素。

此外,我们对经不同过渡电阻短路的情况进行了大量的仿真计算。过渡电阻分为:小阻值的线性电阻、非线性高阻值弧光电阻和时变电阻。在不同类型故障时的典型电压、电流波形图如图7~9所示。由图7~9,我们可以看出:短路电流中的非周期分量很大,在经弧光电阻短路时,电压的畸变十分明显。而在所有的试验中,故障定位的误差都小于1%。这也证明了本算法在暂态过程中具有很高的精度。

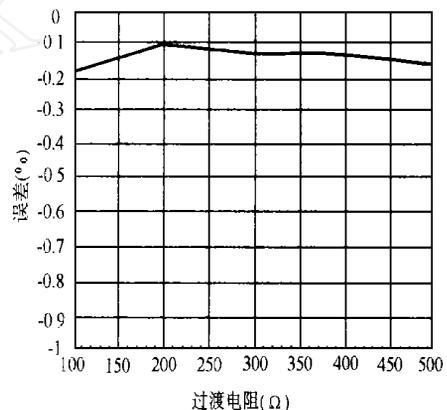


图10 故障定位误差与过渡电阻的关系图

注:图10是在线路50%处单相接地故障的情况下得到的。在图10中,过渡电阻只引起负误差,这与表1中在线路50%处经100Ω过渡电阻单相接地故障的结果是吻合的。

5 结论

由理论推导和数字仿真,我们可以得到以下结果:

1) 本文所述的故障定位方法因采用了就地 and 远方的电流、电压,完全消除了过渡电阻对故障定位就地的影响,因而其精度足以满足工程上的要求。

2) 直接采用abc三相电流电压的微分方程作为数学模型,对于暂态故障和稳态故障,都能确保精度。

3) 数字仿真结果表明这种故障定位方法具有很高的精度并可应用于电力工业中。

4) 基于 GPS 的同步采样既可以满足采用双端信号的输电线路精确故障定位系统对信号同时性的要求,也可以满足保护、控制、监测等的要求。本文所提出硬件设计完全可以实现基于 GPS 同步采样的功能,从而确保故障定位的高精度。经进一步扩展后,本装置还可以实现故障录波、事件顺序记录等功能。

[参考文献]

- [1] Johns A T et al. Accurate Fault Location Technique for Power System Lines. IEE Proc ,1990 ,137(pt. c).
- [2] Erikson L et al. An Accurate Fault Locator with Compensation for Apparent Reactance in Fault Resulting from Remote-End Infeed. IEEE Trans on PAS,1985 ,PAS-104(2).
- [3] Takagi T et al. Development of a New Type Fault Locator Using the one-Terminal Voltage and Current Data. IEEE Trans on PAS,1982 ,PAS-101(8).
- [4] 陈允平. 自适应保护系统和同步相量测量技术. 水利电力科技,1994 ,10.
- [5] Chen Yunping, Gong Qingwu. An Accurate Fault Location for Transmission Line Using Local and Remote Signals. Proceeding of IPEC 97 ,vol. 2. Singapore ,1997 :605 ~ 609.
- [6] 杨奇逊. 微型机继电保护基础. 北京:水利电力出版社,1988.
- [7] 刘乐善等. 微型计算机接口技术及应用. 武汉:华中理工大学出版社,1993.
- [8] Dommel. H. W 著,李永庄等译. 电力系统电磁暂态计算理论. 北京:水利电力出版社,1991.

收稿日期:1998—11—11 改回日期:1999—04—16

基金项目:国家自然科学基金资助项目(59437100)

作者简介:龚庆武(1967-),男,博士,讲师,主要从事电力系统继电保护和自动化研究;雷庆生(1972-),男,博士,讲师,主要从事电力系统稳定与 FACTS 研究。

AN ACCURATE FAULT LOCATION SYSTEM FOR TRANSMISSION LINE USING TWO-TERMINAL SIGNALS

GONG Qing-wu, LEI Qing-sheng, WANG Zhi-mei, CHEN Yun-ping

(Wuhan University of Hydraulic & Electric Engineering, Wuhan Hubei 430072, China)

Abstract A new fault location system using two terminal currents and voltages is presented in the paper, which can remove the error caused by fault resistance. The mathematical model of the new fault location algorithm is explained in the first part of the paper, then the numerical scheme is given in the second part, as GPS (Global Positioning System) is used as synchronization signal of the local and remote signals, the structure and functions of GPS is also briefly explained in the part. After that the hardware structure and software flow chart are presented in the third part. Then the numerical simulation results and some analysis are presented, from the simulation results we can see the accuracy and effectiveness of the new method. Some conclusions are drawn in the final part in the paper.

Keywords two-terminal signal; accurate fault location system; GPS

(上接第 13 页)

[参考文献]

- [1] 宋建成,谢恒坤,杨同敏,李安平. 基于零序电流方向的选择性漏电保护系统的研究. 电网技术,1998,9.
- [2] 胡天禄. 矿井电网的漏电保护. 煤炭工业出版社.
- [3] 郝鸿安. 常用模拟集成电路应用手册. 人民邮电出版社.

收稿日期:1998—12—28

作者简介:孟润泉(1968-),男,硕士研究生,研究方向为微型计算机在煤矿供电系统中的应用。

A WAY TO IMPROVE THE RELIABILITY OF PHASE COMPARISON AND ITS REALIZATION

MENG Run-quan, LIANG Yi-long, SONG Jian-cheng

(Taiyuan University of Science & Technology, Taiyuan 030024, China)

Abstract The phase comparison error is the primary factor leading to mistaken action in the selective leakage protective system of underground LV networks based on zero sequence current direction. On the basis of analyzing the reasons of the error, a way to improve the capacity of error tolerance of phase comparison is presented in this paper, which combines the active phase shifter with the sine/rectangle transformation circuit. The structure and principle of the circuits are emphatically discussed. Additionally, the testing results and the application of the method are described.

Keywords zero sequence current direction; phase comparison error; shift phase waveform transformation