

特高压输电线分相电流相位差动保护的研究

徐松晓, 贺家李, 李永丽, 王艳, 李斌

(天津大学电气与自动化工程学院, 天津 300072)

摘要: 针对传统相位差动纵联保护反应各种故障的灵敏度不同的缺点以及特高压输电线路的分布电容较大等特点, 提出了基于贝瑞隆模型实现特高压输电线路分相相位差动纵联保护的新原理。介绍了利用贝瑞隆模型计算输电线路故障的方法, 推导了实现分相相位差动纵联保护的判据及闭锁角的整定原则, 综合分析各种故障状态下保护的動作情况, 解决了各种故障下的故障判别以及特高压线路上的大电容电流影响等问题。提出了用于故障后1~2个周波的基于电流故障分量的分相相位差动保护新原理, 大大提高了保护承受过渡电阻的能力和動作速度。用ATP和Matlab仿真证明了该原理的正确性和用于特高压输电线的优越性。

关键词: 分相相位差动; 贝瑞隆模型; 特高压输电; 故障分量; 继电保护

Research on segregated current phase differential protection for UHV transmission lines

XU Song-xiao, HE Jia-li, LI Yong-li, WANG Yan, LI Bin

(Tianjin University, Tianjin 300072, China)

Abstract: While it is applied on UHV transmission lines, the traditional current phase differential protection will seriously be affected by distributed capacitive current of transmission line. So a novel principle of phase segregated current phase differential protection for UHV transmission lines based on Bergeron model is proposed for the first time in this paper. It introduces the method of fault analysis of transmission lines based on Bergeron model and analysis of protection operation in case of every type of fault. The proposed principle will not be affected by distributed capacitive current and is more sensitive and reliable than traditional current phase differential protection. The paper also proposes another new principle of phase segregated current phase differential protection based on fault component used during 1~2 periods after fault inception to improve the ability of bearing transition resistance. Simulation results by ATP and MATLAB confirm that the principle is correct and has best performances when used on UHV transmission lines.

This project is supported by National Natural Science Foundation of China(No.50477037).

Key words: phase segregated current phase differential protection; Bergeron model; UHV transmission lines; fault component; relay protection

中图分类号: TM77

文献标识码: A

文章编号: 1003-4897(2007)03-0001-05

0 引言

传统的相位差动高频保护是将三相电流利用复合过滤器(例如 $I+KI_0$)合成一个电流进行相位比较, 这是由高频通道的经济和技术局限性决定的。其缺点是对不同短路类型的反应灵敏度不同, 对某些短路类型难以判别, 其次是不能判别故障相别, 在应用单相切除、单相自动重合闸时必须配有专门的选相元件。

随着微波通道的应用, 出现了分相相位差动微波保护。这种保护不但对各种短路类型具有相同的

判别能力, 而且有选相功能。在光纤通道广泛应用后, 应用数字光纤通道实现分相相差原理更为容易。这种原理只要求知道在工频周期内线路两端电流极性是否相同(同时流入线路或同时流出线路), 则每次采样时对每个被比较电流只需要一位数即可确定和传送极性, 对于三相电流和零序电流只需传送一个四位的二进制数, 对通道数据传输要求低, 便于实现高采样率和复杂而完善的检错纠错技术, 保证保护动作的正确性。因而光纤分相电流相位差动是一种非常优良的保护原理。

针对传统相位差动保护在特高压长线路中受电容电流影响很大的问题, 本文提出了基于输电线贝瑞隆法^[1]的特高压长线路分相电流相位差动保

护新原理。此原理完全消除了线路分布电容电流的影响，保护可靠性和灵敏度得以极大提高。

1 贝瑞隆模型^[2]的应用

由 Bergeron 提出的贝瑞隆模型是一种比较精确的输电线路模型，它反映了输电线路内部无故障时（包括稳态运行和区外故障）两端电压电流之间的关系，进而可以用贝瑞隆模型推导出线路上任一点两侧的电压电流相位关系，亦即保护不动作的条件。而线路内部故障时，相当于在故障点处增加了一个节点，这种关系被破坏，保护必然动作。本文提出利用这一差别区分线路内部和外部故障，构成一种新的相位差动保护原理。这种新的保护原理自动地考虑了电容电流的影响，不再需要进行电容电流补偿。

输电线路各相之间存在耦合，线路电阻 R 、电容 C 、电感 L 参数矩阵(电导一般可忽略)中有非零非对角元素。无论是完全换位的平衡线路还是不平衡线路，都可以通过一定的转换矩阵使其参数矩阵完全对角化即转化为模分量，从而形成相互之间没有耦合的模分量对角矩阵 R_M 、 L_M 、 C_M ，线路的每一模分量都满足贝瑞隆模型^[1]。

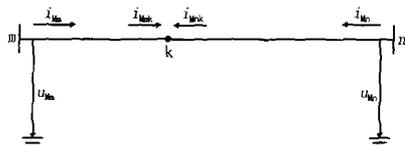


图1 三相线路对于一种模分量的等效电路

Fig.1 Equivalent circuit of one modal component for three-phase line

设 u_{Mm} 、 i_{Mm} 和 u_{Mn} 、 i_{Mn} 分别是线路两侧的电、电压、电流模量，电流正方向如图1所示。若 T 为传输矩阵，有如下关系^[3]：

$$[u_{Mm}(t) \quad i_{Mm}(t)]^T = T [u_{Mn}(t) \quad i_{Mn}(t)]^T$$

如上所述，贝瑞隆模型是在模量上成立的，所以在实际应用中，须首先将相量转换为模量。以 m 侧保护为例，计算过程为：首先将保护安装处的相电压 $u_{m\phi}$ 和相电流 $i_{m\phi}$ （下标 $\phi = a、b、c$ ）用 Karanbauer 变换矩阵转化为模量 u_{Mmi} 、 i_{Mmi} ，求得参考点 k 的 m 侧电流模量 i_{Mmki} ，再由变换矩阵变换为相量 $i_{mk\phi}$ 。同理 n 侧保护可以求出流入参考点 k 的电流相量 $i_{nk\phi}$ 。对此二电流进行半波傅氏滤波得 $I_{mk\phi}$ 和 $I_{nk\phi}$ 。并可通过通信通道互相传送到对侧保

护以实现各种保护原理。

2 分相电流相位差动保护新原理

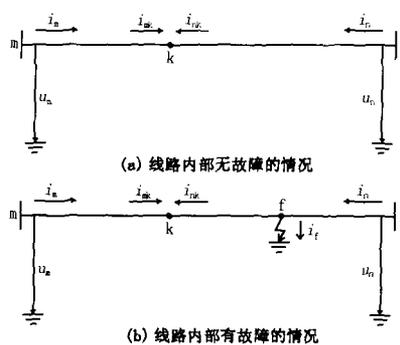


图2 输电线路故障模型

Fig.2 Fault model of electric transmission line

从上面分析可知，用贝瑞隆模型可以根据输电线路始端电压和电流计算线路上任一点的电压和电流。如果线路上没有故障或区外故障，则线路必然满足贝瑞隆模型。可以在输电线上选择一个参考点 k（选择参考点 k 是为了使本原理能够应用于有串补电容的线路上，一般可选为线路中点），应用贝瑞隆模型算出该点两侧电流后，对这个点判断其相位关系。当被保护线路无内部故障时，线路上某处由两侧母线流向线路的电流方向是相反的（电流方向以母线流入线路为正），满足基尔霍夫定律。这一说法对于瞬时值同样适用。工频下可直接转化为两侧相位的的关系。如图2(a)，m点到k点及n点到k点之间的线路都满足贝瑞隆模型， i_{mk} 和 i_{nk} 都可以计算得到，从而可求得其相角，具体如下：

$$u_{Mm} = S^{-1}u_m$$

$$i_{Mm} = Q^{-1}i_m$$

$$[u_{Mmk}(t) \quad i_{Mmk}(t)]^T = T [u_{Mm}(t) \quad i_{Mm}(t)]^T$$

$$i_{nk}(t) = Q i_{Mmk}(t),$$

式中： S 、 Q 分别为电压、电流列相量变换矩阵，本文采用Karanbauer变换矩阵求模分量。

经半波傅氏滤波得 $I_{mk}(t)$ ，则对于任意时刻 t_0

$$I_{mk}(t_0) = |I_{mk}(t_0)| \angle \varphi_{I_{mk}}$$

同理可得

$$I_{nk}(t_0) = |I_{nk}(t_0)| \angle \varphi_{I_{nk}}$$

对于半波傅氏算法实际有效数据应该为故障后半周波之后，则理论上

$$|\varphi_{I_{mk}} - \varphi_{I_{nk}}| = 180^\circ$$

式中： $\varphi_{I_{mk}}$ 、 $\varphi_{I_{nk}}$ 为 I_{mk} 、 I_{nk} 的相角。

当线路发生内部故障时,以参考点右侧f点发生故障为例如图2(b)所示, n点到k点之间的线路不再满足贝瑞隆模型,则必然产生很大的动作量。因此这种方法可以区分保护区内、区外故障。因此整定一合适的闭锁角,虑及各种因素影响使 $|\varphi_{I_{mk}} - \varphi_{I_{nk}}|$ 在区外故障和稳态运行时均落在闭锁角范围内;内部故障时落在动作角范围内,便可以实现稳态运行或区外故障时不误动,内部故障不拒动。考虑闭锁角后保护动作判据为

$$|\varphi_{I_{mk}} - \varphi_{I_{nk}}| \leq 180^\circ - \varphi_b$$

或
$$|\varphi_{I_{mk}} - \varphi_{I_{nk}}| \geq 180^\circ + \varphi_b$$

经大量仿真证明区内故障时 $|\varphi_{I_{mk}} - \varphi_{I_{nk}}|$ 最大为 105° (N侧单相接地短路时最大),区外故障时 $|\varphi_{I_{mk}} - \varphi_{I_{nk}}|$ 在 $180^\circ \pm 5^\circ$ 范围内。再考虑双端通信延时,装置误差等因素,闭锁角 φ_b 可以整定为 45° 。由于本原理比较每一相的相角差,所以理论上发生任何类型的短路,保护都能正确判别故障相别和故障类型,并且正确动作。

3 基于故障分量的分相电流相位差动保护新原理

上文所述分相电流相位差动原理是一种性能优良的保护新原理,它能反映各种类型的内部故障并正确动作,且区外故障不会误动作。但仿真证明,当系统在恶劣的条件(系统摆开角为 70° ,且双端电源阻抗相差较大)下发生单相经过渡电阻接地故障时,保护灵敏性和可靠性不能保证,尤其是过渡电阻比较大(大于 100Ω)时,保护可能拒动。显然这对于保护来说是不允许的,因为单相经过渡电阻接地故障是一种发生率比较高的故障。

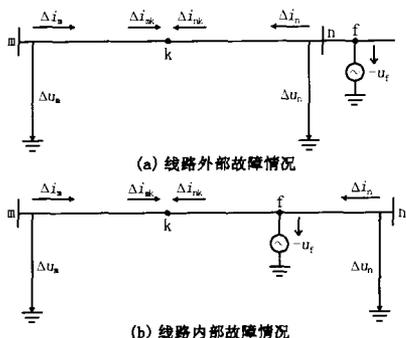


图3 线路故障后电流故障分量产生示意图

Fig.3 Simplified diagram of fault component generation after fault

电流故障分量是由从故障后电流中减去短路

前两个周波负荷电流分量或区外短路电流得到的,采用故障分量的特点就是完全消除了负荷电流或区外故障转区内故障电流的影响。如图3所示,故障分量与两侧电源无关,线路发生故障相当于去掉两侧电源并且在故障点增加一故障电源,电流故障分量只与此故障电源和故障点两侧线路阻抗有关。如果线路上没有故障或区外故障,则必然满足贝瑞隆模型。可以在输电线上选择一个参考点k,先求出线路两端的电流故障分量(稳态运行条件下故障分量为零,保护不会动作),应用贝瑞隆模型算出该点两侧电流故障分量后,对这个点判断其相位关系。当被保护线路无内部故障时,如图2(a),m点到k点及n点到k点之间的线路都满足贝瑞隆模型,两侧故障分量 ΔI_{mk} 和 ΔI_{nk} 可以计算得到,即可求得相角,计算过程与2类似:求得经半波傅氏滤波后的电流故障分量 $\Delta I_{mk}(t)$,则对于任意时刻 t_0

$$\Delta I_{mk}(t_0) = |\Delta I_{mk}(t_0)| \angle \varphi_{\Delta I_{mk}}$$

$$\Delta I_{nk}(t_0) = |\Delta I_{nk}(t_0)| \angle \varphi_{\Delta I_{nk}}$$

与上述分相电流相位差动原理不同,由于故障分量只是在故障后1~2周波之内才有效,又由于半波傅氏算法的影响,实际的有效数据为故障后半周波到故障后两个周波,在此时间内,理论上

$$|\varphi_{\Delta I_{mk}} - \varphi_{\Delta I_{nk}}| = 180^\circ$$

式中: $\varphi_{\Delta I_{mk}}$ 、 $\varphi_{\Delta I_{nk}}$ 为 ΔI_{mk} 、 ΔI_{nk} 的相角。

当线路发生内部故障时,以参考点右侧f点发生故障为例如图2(b)所示, n点到k点之间的线路不再满足贝瑞隆模型,则必然产生很大的动作量。与分相电流相位差动原理类似,可利用这种方法区分保护区内、区外故障。与2相似,考虑闭锁角的保护动作判据为

$$|\varphi_{\Delta I_{mk}} - \varphi_{\Delta I_{nk}}| \leq 180^\circ - \varphi_{\Delta b}$$

或
$$|\varphi_{\Delta I_{mk}} - \varphi_{\Delta I_{nk}}| \geq 180^\circ + \varphi_{\Delta b}$$

经大量仿真证明区内故障时 $|\varphi_{\Delta I_{mk}} - \varphi_{\Delta I_{nk}}|$ 最大为 54° (N侧单相经过渡电阻接地短路时最大),区外故障时 $|\varphi_{\Delta I_{mk}} - \varphi_{\Delta I_{nk}}|$ 在 $180^\circ \pm 70^\circ$ 范围内。故闭锁角 $\varphi_{\Delta b}$ 可以整定为 100° 。同样保护再发生任何类型的短路,都能正确判断,并正确动作。

基于故障分量的分相电流相位差动原理承受过渡电阻能力强,对各种内部故障均能正确判别、动作。并且相对于分相电流差动原理,其速动性要好很多:前者动作时间为故障后的半个周波到两个

周波,因故障分量只能存在1~2个周波,1~2个周波之后不能应用。因此在故障1~2个周波内先投入前者,然后切换为后者。一般情况下保护都可在1~2个周波内动作。

4 仿真验证

仿真选用长为600 km的1150 kV双端电源系统,系统参数如图4所示,忽略电导,n侧电源相角超前m侧电源相角70°,m侧和n侧电势分别为1.027和1.087倍额定电压,n侧所带负荷等效阻抗为 $225.0452 + j32.0672 \Omega$ 。图5~图8中的故障发生时刻为0.04 s;图9~图12中的故障发生时刻为0.06 s;每周波采样40点,接地过渡电阻为400 Ω ,相间过渡电阻为30 Ω 。仿真中对区外两个点(m侧反方向出口故障和n侧反方向出口故障),区内三个点(m侧正方向100 km处、线路中点、n侧正方向100 km处)进行了各种短路故障下的仿真分析。



$r_1=0.0049 \Omega/\text{km}$ $x_1=0.292137 \Omega/\text{km}$ $c_1=0.01764 \Omega/\text{km}$
 $r_0=0.2752 \Omega/\text{km}$ $x_0=0.934843 \Omega/\text{km}$ $c_0=0.0159 \Omega/\text{km}$

图4 仿真使用的1150 kV系统图

Fig.4 System sketch for simulation

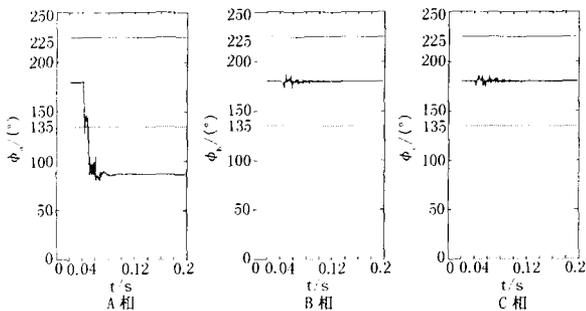


图5 线路中点A相接地短路时各相电流相位差变化曲线

Fig.5 Curve variation of phase differences of three phase current in case of single phase (a) to ground fault at mid-position of the line

图5~8为分相电流相位差动原理的仿真结果。图8可知当保护区外短路时保护具有良好的选择性,并且可以作为整定闭锁角的重要根据。图5~7列举了几种内部短路时保护的判别情况,再一次证明了分相电流相位差动原理对以上单相短路、相间短路、两相短路接地、三相短路都能正确判别并能使保护正确动作。但从仿真波形上也可以看出,故

障后将近一个周波之后的数据才趋于稳定。这是半波傅氏滤波算法的必然的结果,当然还受系统运行条件的影响。

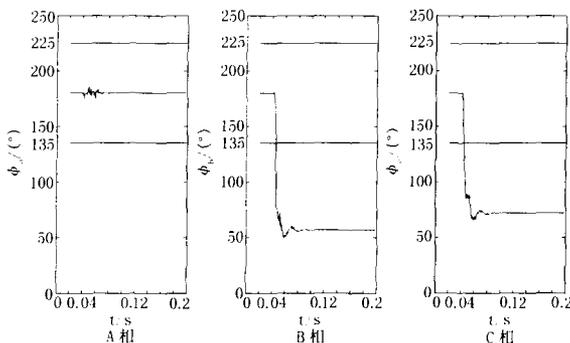


图6 线路中点BC相间经30 Ω 过渡电阻短路时各相电流相位差变化曲线

Fig.6 Curve variation of phase differences of three phase current in case of two phase (b,c) fault through transition resistance 30 Ω at mid-position of the line

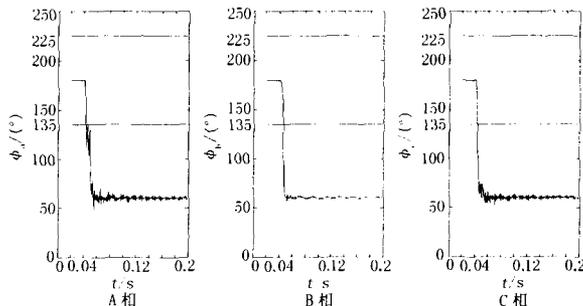


图7 线路中点三相短路时各相电流相位差变化曲线

Fig.7 Curve variation of phase differences for phase currents in case of three phase (a,b,c) fault at mid-position of the line

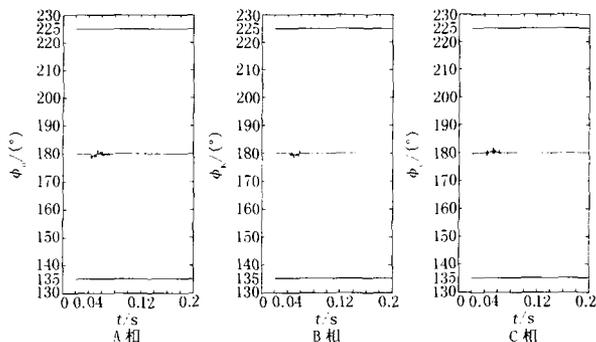


图8 m侧反向发生A相经过过渡电阻接地时各相电流相位差变化曲线

Fig.8 Curve variation of phase differences of three phase current in case of single phase (a) to ground fault through transition resistance 400 Ω at the back of m relay side

图9~12为基于故障分量的分相电流相位差动

的仿真结果。故障时刻为0.06 s时刻。由图12知此种原理在外部故障时能够保证不误动作, 具有良好的选择性。

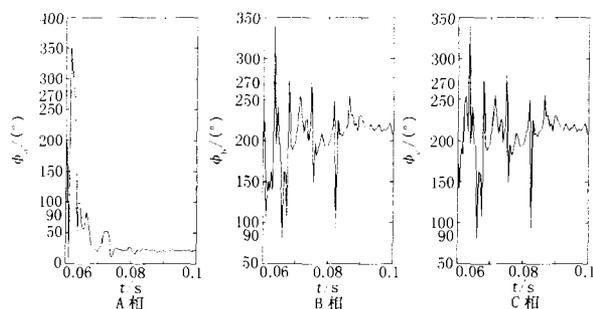


图9 距离n侧100 km处发生A相过渡电阻

接地短路时各相电流故障分量相位差变化曲线

Fig.9 Curve variation of phase differences of three phase fault component current in case of single phase (a) to ground fault through transition resistance 400Ω at 100 km from side n

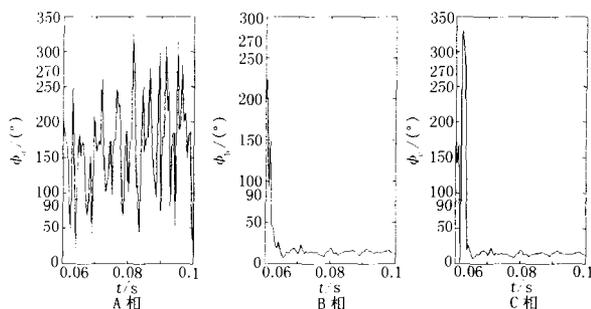


图10 距离n侧100 km处发生BC相间经过渡电阻

短路时各相电流故障分量相位差变化曲线

Fig.10 Curve variation of phase differences of three phase fault component current in case of two phases(b,c) fault through transition resistance 30Ω at 100 km from side n

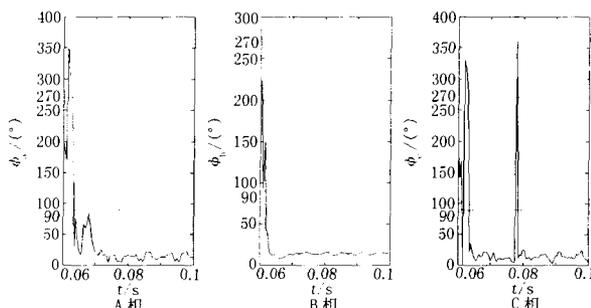


图 11 距离 n 侧 100 km 处三相短路故障时

各相电流故障分量相位差变化曲线

Fig.11 Curve variation of phase differences for phase fault component current in case of three phases(a,b,c) fault at 100 km from side n

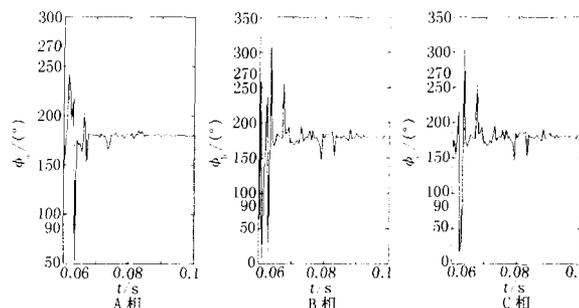


图12 n 侧反相发生A相过渡电阻接地时各相电流故障分量相位差变化曲线

Fig.12 Curve variation of phase differences of three phase fault component current in case of single phase (a) to ground fault through transition resistance 400Ω at the back of n relay side

由图 9 可知, 在此原理下, 保护承受过渡电阻能力大大提高了。表 1 为图 9 所对应的数据 (只列出了故障后半周波到一个周波时间段内的数据), 不难看出, 将闭锁角整定为 100°, 还是略显保守, 实际中应结合灵敏性和可靠性来整定。同样由于故障分量本身的特点, 波形中出现的个别超出整定值之外的峰值可在保护软件设计时将其抛弃 (如表 1 的 150 号数据), 不会影响保护的整性能。

表 1 图 9 所对应的故障数据

Tab.1 Phase difference of fault component current

序号	相角差/(°)		
	$\varphi_{\Delta A}$	$\varphi_{\Delta B}$	$\varphi_{\Delta C}$
141	25.491 3	220.306 5	220.302 7
142	29.082 3	238.788 6	238.785 0
143	46.222 7	255.693 2	255.691 5
144	51.988 0	224.099 5	224.099 4
145	51.786 2	208.910 1	208.909 4
146	51.469 0	224.760 9	224.758 4
147	38.295 9	225.997 2	225.994 4
148	10.559 3	197.652 2	197.652 0
149	11.606 4	219.409 1	219.408 0
150	23.515 6	280.414 2	280.402 2
151	24.714 8	149.141 3	149.140 6
152	23.949 7	196.729 3	196.729 8
153	22.411 1	181.810 5	181.810 4
154	22.533 1	188.929 5	188.929 5
155	20.325 6	197.290 5	197.290 7
156	20.456 2	208.697 7	208.698 2
157	21.102 1	204.131 7	204.130 6
158	20.796 4	193.191 5	193.191 2
159	25.529 1	192.077 7	192.077 4
160	25.181 4	192.077 7	193.843 4

(下转第 24 页 continued on page 24)

- 态估计算法[J]. 电力系统自动化, 1999, 23(8): 32-34.
- LI Bi-jun, XUE Yu-sheng, GU Jin-wen, et al. Weight Function Based Power System State Estimation Algorithm[J]. Automation of Electric Power Systems, 1999, 23(8):32-34.
- [6] 黄彦全, 肖建, 李云飞, 等. 支持向量机在电力系统状态估计中的应用[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(5): 256-260.
- HUANG Yan-quan, XIAO Jian, LI Yun-fei, et al. A State Estimation for Power System Using Support Vector Regression[J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(5): 256-260.
- [7] 杜正春, 牛振勇, 方万良. 基于分块 QR 分解的一种状态估计算法[J]. 中国电机工程学报, 2003, 23(8): 50-55.
- DU Zheng-chun, NIU Zhen-yong, FANG Wan-liang. A Block QR Based Power System State Estimation Algorithm[J]. Proceedings of the CSEE, 2003, 23(8): 50-55.
- [8] 杨元喜. 抗差估计理论及其应用[M]. 北京: 八一出版社, 1993.

收稿日期: 2006-09-07

作者简介:

卢志刚(1963-), 男, 教授, 博士生导师, 从事电力系统经济运行及分析研究;

张宗伟(1981-), 男, 硕士研究生, 从事电力系统状态估计和理论线损计算研究; E-mail: zzw330331@163.com

杨斌(1981-), 男, 硕士研究生, 从事电力系统无功优化和状态估计研究。

(上接第 5 页 continued from page 5)

通过观察仿真波形可知使用基于故障分量的分相电流相位差动原理判别、动作要比前者快。由于故障分量不受两侧系统电势相角差等运行条件的影响, 故半个周波之后的数据已趋于稳定, 故此原理能够在 1 到 2 个周波之内可靠判别故障并正确动作。

5 结论

1) 本文提出的用贝瑞隆法实现的分相电流相位差动新原理和基于故障分量的分相相位差动新原理不受线路分布电容的影响, 解决了分布电容影响电流相位差动纵联保护的难题。

2) 本文提出的新原理解决了传统的相差高频保护判别所有故障类型的灵敏度不同, 无选相功能等问题。

3) 仿真计算证明此新原理是正确、可靠的, 同时具有很高的灵敏度。证明了分相相位差动这种卓越的保护原理尤其适用于超高压和特高压的长距离输电线路。

4) 本文提出的两个新原理需要的数据通信量大大减少, 为提高通信速率和采样率创造了有利条件。

5) 电流互感器饱和会影响测得线路二次侧电流精确度, 对任何保护都有影响, 这是一个专门的问题。由于篇幅所限本文未对电流互感器的影响加

以阐述。

参考文献

- [1] 郭征. 特高压长线路分相电流差动保护新原理(博士学位论文)[D]. 天津: 天津大学, 2004.
- GUO Zheng. New Principle of Phase Segregated Current Differential Protection for UHV Long Transmission Lines, Doctoral Dissertation[D]. Tianjin: Tianjin University, 2004.
- [2] 贺家李, 宋从矩. 电力系统继电保护原理(增订版)[M]. 北京: 中国电力出版社, 2004. 171-201.
- HE Jia-li, SONG Cong-ju. Principles of Protective Relaying in Electric Power Systems[M]. Beijing: China Electric Power Press, 2004. 171-201.
- [3] 束洪春, 司大军, 陈学允. 基于分布参数模型的串补线路故障测距方法研究[J]. 中国电机工程学报, 2002, 22(4): 72-76.
- SHU Hong-chun, SI Da-jun, CHEN Xue-yun. Study on Locating Faults on Series Compensated Lines Based on Distributed Parameter Line Model[J]. Proceedings of the CSEE, 2002, 22(4): 72-76.

收稿日期: 2006-08-02; 修回日期: 2006-10-24

作者简介:

徐松晓(1981-), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为电力系统继电保护; E-mail: beyondyesterday@163.com

贺家李(1925-), 男, 教授, 中国电机工程学会名誉理事, IEEE 高级会员, 俄罗斯工程院外籍院士, 主要研究方向为电力系统故障分析与继电保护;

李永丽(1963-), 女, 教授, 主要研究方向为电力系统继电保护和变电站综合自动化。