

基于同步相量测量的同杆双回路 继电保护方案的研究

蔡国伟,周国屏,李 凌

(东北电力大学 电气工程学院,吉林 吉林 132012)

摘要: 所提出的基于同步相量测量的同杆双回线路保护方案通过相模转换对同杆双回线进行解耦,消除了线间互感对保护的不利影响。并从分布参数线路的相关理论出发,推导出了模量形式的保护判据,从原理上消除了线路参数分布性对保护的影响。该方案通过在模域中检测故障来实现保护,可对同杆双回线路的各种故障作出正确、快速的反应,同时还能提供相应的故障测距信息。对保护动作特性的分析证明了所提出保护方案的可行性。EMTP 仿真结果表明该保护方案的可靠性和灵敏度较高、几乎不受过渡电阻的影响,且故障测距结果比较精确。

关键词: 同步相量测量; 同杆双回线路; 分布参数线路; 相模转换

中图分类号: TM 773

文献标识码: A

文章编号: 1006-6047(2007)06-0056-04

0 引言

随着电力系统的发展,同杆双回输电线路被越来越广泛地采用。由于同杆双回线路运行方式复杂、存在线间互感及跨线故障,所以在单回线上广泛应用的保护方式难以满足同杆双回线的要求^[1-3]。目前,针对同杆双回线路的保护方式主要有:纵联保护、横联保护、距离保护等。这些传统保护方案存在以下问题^[4-7]:

- 未考虑线路参数分布性对保护性能的影响;
- 存在相继动作且双回线发生同名相跨线短路时拒动;
- 距离保护受运行方式和网络参数的影响,在线路末端发生故障时,保护性能不太理想。

近年来随着同步相量测量装置开始应用于电力系统,作为一种控制辅助装置,它在继电保护和故障定位方面有很大的应用前景^[8-9]。在此提出的保护方案以分布参数电路的相关理论为依据,以线路两端电压和电流模分量的复合值为动作量,仿真结果表明了方法的有效性。

1 保护的動作方程

1.1 基本原理

计及线路参数的分布性,根据均匀传输线的长线方程:

$$\begin{aligned} U &= C_1 e^{\gamma x} + C_2 e^{-\gamma x} \\ I &= \frac{C_1}{Z_c} e^{\gamma x} - \frac{C_2}{Z_c} e^{-\gamma x} \end{aligned} \quad (1)$$

式中 C_1, C_2 为积分常数; γ 为传播常数; Z_c 为传输线的特性阻抗; x 为传输线上任意一点至末端的距离。

在已知首端或末端电压和电流的情况下,可以算出线路上任意一点的电压和电流。按照图 1 所示选取正方向,当线路上某一点 F 处发生故障时,由式(1)可得:

$$U_F = \frac{1}{2} (U_2 + Z_c I_2) e^{\gamma D l} + \frac{1}{2} (U_2 - Z_c I_2) e^{-\gamma D l} \quad (2)$$

$$U_F = \frac{1}{2} (U_1 + Z_c I_1) e^{-\gamma(1-D)l} + \frac{1}{2} (U_1 - Z_c I_1) e^{\gamma(1-D)l} \quad (3)$$

因为输电线路上的电压具有连续性,所以式(2)(3)计算出的 U_F 是相等的,联立两式并经化简可得测距公式(4):

$$D = \ln(N/M) / (2\gamma l) \quad (4)$$

$$N = (U_1 - Z_c I_1) e^{\gamma l} - (U_2 - Z_c I_2) \quad (5)$$

$$M = (U_2 + Z_c I_2) - (U_1 + Z_c I_1) e^{-\gamma l} \quad (6)$$

D 为故障点至线路末端距离与线路全长之比。

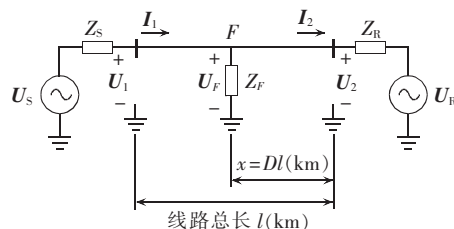


图 1 线路模型图

Fig.1 Model of line

1.2 動作方程

与文献^[10]方法相同,这里以式(4)中 N 或 M 的模值为动作量,相应的动作方程为

$$|N| \geq |N|_{\text{set}} \text{ 或 } |M| \geq |M|_{\text{set}}$$

此外,为了保证动作的选择性,以式(7)作为故障的方向判别式,即

$$\alpha = \left| \arg \left[\frac{(U_1 - Z_c I_1) e^{\gamma l}}{U_2 - Z_c I_2} \right] \right| \quad (7)$$

当 $\alpha \geq \alpha_{\text{set}}$ 时,故障位于被保护线路内部,反之则为外部故障。

1.3 解耦操作

以上讨论全都是基于单导线线路的,而同杆双回路由六相线路组成,线路间存在相互耦合的影响。为了将这一理论用于多相系统,必须对各相输电线进行解耦操作。解耦可通过 Clarke 变换或 Karrenbauer 变换实现,此处用如下的 Clarke 矩阵进行解耦操作^[11]:

$$T = \frac{1}{\sqrt{6}} \begin{bmatrix} 1 & 1 & \sqrt{3} & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & -\sqrt{3} & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 0 & -2 & 0 & 0 \\ 1 & -1 & 0 & 0 & \sqrt{3} & 1 \\ 1 & -1 & 0 & 0 & -\sqrt{3} & 1 \\ 1 & -1 & 0 & 0 & 0 & -2 \end{bmatrix} \quad (8)$$

因篇幅所限,这里仅讨论平衡的同杆双回线路,故有 $T_u = T_i = T$ (若线路为非平衡系统,则 $T_u \neq T_i$,需用相-模转换理论分别求出 T_u 和 T_i ^[12-13])。

对同杆双回线路两端的电压和电流相量进行如下变换:

$$\begin{bmatrix} U_1 \\ U_2 \\ U_3 \\ U_4 \\ U_5 \\ U_6 \end{bmatrix} = T^{-1} \begin{bmatrix} U_{1a} \\ U_{1b} \\ U_{1c} \\ U_{2a} \\ U_{2b} \\ U_{2c} \end{bmatrix}, \quad \begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \\ I_3 \\ I_4 \\ I_5 \\ I_6 \end{bmatrix} = T^{-1} \begin{bmatrix} I_{1a} \\ I_{1b} \\ I_{1c} \\ I_{2a} \\ I_{2b} \\ I_{2c} \end{bmatrix}$$

$U_{1a} \sim U_{1c}, I_{1a} \sim I_{1c}$ 为第一回线 A、B、C 相的电压、电流; $U_{2a} \sim U_{2c}, I_{2a} \sim I_{2c}$ 为第二回线 A、B、C 相的电压、电流; $U_1 \sim U_6, I_1 \sim I_6$ 分别表示电压和电流的 6 个模分量。

经过相模变换后双回线实现解耦,各模分量彼此独立,可以按均匀传输线的长线方程求相应变量。式(5)(6)(7)变为如下各式:

$$N_m(i) = [U_{1m}(i) - Z_{cm}(i)I_{1m}(i)] \exp[\Gamma_m(i)l] - [U_{2m}(i) - Z_{cm}(i)I_{2m}(i)] \quad (9)$$

$$M_m(i) = -[U_{1m}(i) + Z_{cm}(i)I_{1m}(i)] \exp[\Gamma_m(i)l] + [U_{2m}(i) + Z_{cm}(i)I_{2m}(i)] \quad (10)$$

$$\alpha_m(i) = \left| \arg \frac{[U_{1m}(i) - Z_{cm}(i)I_{1m}(i)] \exp(\Gamma_m(i)l)}{U_{2m}(i) - Z_{cm}(i)I_{2m}(i)} \right| \quad (11)$$

式中 下标 m 表示各相量为转化后的模分量; $i=1, 2, 3, 4, 5, 6$ 依次表示地模分量、线间模分量和 4 个线模分量; Z_{cm} 为特征阻抗的模量; Γ_m 为传播常数的模量。

为了使测距结果更准确,采用文献[14]提出的方法,利用线路两端同步电压和电流相量在线计算线路的特征阻抗和传播常数。

$$Z_{cm}(i) = \left[\frac{U_{1m}^2(i) - U_{2m}^2(i)}{I_{1m}^2(i) - I_{2m}^2(i)} \right]^{1/2} \quad (12)$$

$$\Gamma_m(i) = \operatorname{arcosh} \left[\frac{U_{1m}(i)I_{1m}(i) + U_{2m}(i)I_{2m}(i)}{U_{1m}(i)I_{2m}(i) + U_{2m}(i)I_{1m}(i)} \right] / l \quad (13)$$

由以上分析可知,如果利用同步相量测量装置获得某一线路两端电压和电流的同步相量数据,就可以判断被保护线路是否发生了故障,而用式(4)则可以测出故障点的距离。

2 保护动作分析

2.1 正常运行

式(9)(11)可以简写为 $N_m = A_m - B_m$ 和 $\alpha_m = |\arg(A_m/B_m)|$ 。把线路首、末端的电压和电流的各模分量值代入式(9)并结合均匀传输线的长线方程可以推导出 A_m 与 B_m 相等,所以正常运行时各模分量下的 $|N_m|$ 和 α_m 在理论上均为零。当然,在实际情况下由于存在各种误差, $|N_m|$ 和 α_m 不可能为 0,一般是一个很小的数值。

2.2 发生故障

当被保护线路内部发生故障时,线路两端电流方向相反,经推导可知此时 A_m 与 B_m 不等, $|N_m|$ 的某些模分量值在故障发生后迅速增大并趋于稳定, α_m 的值也发生相同变化。故障后 $|N_m|$ 和 α_m 的各模分量的变化情况因故障类型而定。

被保护线路以外发生故障时,受故障后的暂态过程的影响, $|N_m|$ 的某些模分量值在故障发生后也会迅速增大,但在一段时间后会衰减为一个很小的值。 α_m 变化趋势与 $|N_m|$ 相同,但其增大的幅度非常小,就仿真结果而言,在故障后一段时间内其所有模分量的值不超过 0.1(见图 3(b))。而发生内部故障情况下 α_m 的某些模分量值很快超过 1(见图 4(b)),通过合理设置门槛值可以很容易地区分内部故障和外部故障。

3 数字仿真

3.1 仿真线路模型

为了验证本保护方案的可靠性,对图 2 所示 500 kV 系统进行了 EMTF 仿真。图中 CA、BD 为单回线路,用来验证保护方案的选择性; AB 为长 300 km 的同杆双回线路,同步相量测量装置设在 A、B 两处。

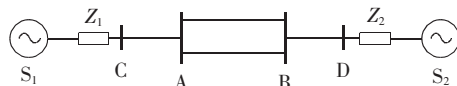


图 2 仿真系统

Fig.2 Simulation system

系统电源用集中参数表示,线路两端电源相角差为 35° 。

C 端的系统参数为

正序阻抗 $Z_1 = 2.53 + j120.46 \Omega$

零序阻抗 $Z_0 = 1.12 + j40.23 \Omega$

D 端的系统参数为

正序阻抗 $Z_1 = 1.39 + j72.53 \Omega$

零序阻抗 $Z_0 = 1.12 + j38.91 \Omega$

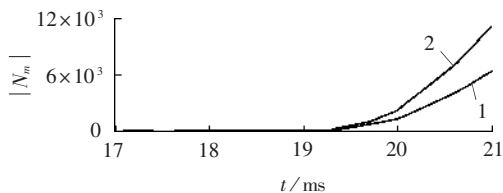
线路参数全部由 EMTF 生成;系统采样率为 1 600 Hz(每周采样 32 点);得到仿真数据后,用 Matlab 处理数据以验证保护方案的可靠性和故障测距的精度。

3.2 仿真结果

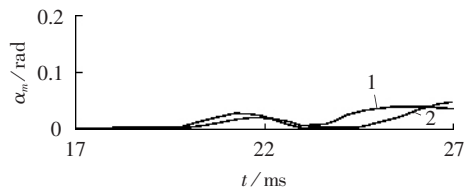
3.2.1 保护方案可靠性验证

在仿真过程中分别在线路 CA 段和 AB 段设置故障(故障发生时刻均设定在 17.5 ms),以验证保护能否针对不同情况作出正确反应。

图 3、4 是发生内、外部故障后 $|N_m|$ 和 α_m 值的变化情况。图 3 中,曲线 1 为模 3、5,曲线 2 为模 4、6;图 4 中,曲线 1~5 分别为模 2~6。由图 3、4 可见, $|N_m|$ 和 α_m 值的变化情况与理论分析一致,可以准确判断区内外故障, $|N_m|$ 的 6 个模量均需计算, α_m 只需计算 4 个模量(模 3~6)。



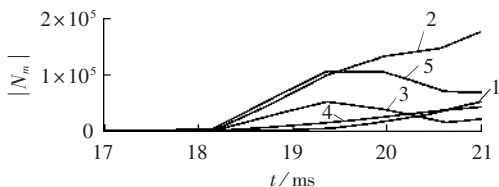
(a) $|N_m|$ 的值



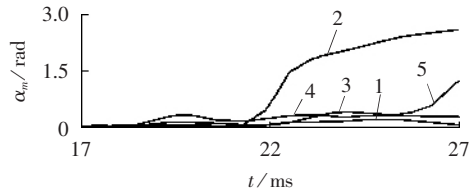
(b) α_m 的值

图 3 外部故障时保护的响应

Fig.3 Response of protection to an external fault



(a) $|N_m|$ 的值



(b) α_m 的值

图 4 内部故障时保护的响应

Fig.4 Response of protection to an internal fault

表 1 记录了双回线路不同位置发生含同名相跨线故障(I A II ABS)时的保护动作情况。其中, $|N_m|$ 和 α_m 均取故障后 5 ms 时模分量 5 的值(阈值值设为 $|N|_{\text{set}} = 10000, \alpha_{\text{set}} = 0.2 \text{ rad}$)。

由表 1 可见,在保护范围内发生故障时保护均能可靠动作,无拒动现象。

图 5 所示为不同故障类型的情况下过渡电阻对保护的影响(横轴为过渡电阻,纵轴为动作时间;曲线 1 为 ICG,曲线 2 为 IAB II BCS)。由图可见,本保护方案受过渡电阻的影响很小,在过渡电阻达 300 Ω 时仍能可靠动作。

表 1 不同位置故障时的仿真结果

Tab.1 Simulation results of different fault locations

$p/\%$	$ N_m $	α_m/rad	保护动作情况
5	2.78×10^5	1.13	动作
10	2.96×10^5	1.22	动作
20	2.63×10^5	1.18	动作
50	2.57×10^5	1.25	动作
80	2.75×10^5	1.35	动作
90	2.54×10^5	1.24	动作
95	2.53×10^5	1.06	动作

注: p 为故障点距母线 A 的位置。

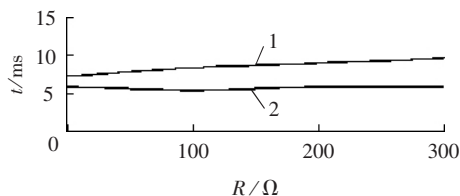


图 5 过渡电阻对保护的影响

Fig.5 Effect of fault-path resistance on protection

3.2.2 测距结果

利用线路两端电压、电流的模量实现故障测距。在进行测距计算前,先对仿真数据进行滤波处理,然后用文献[15]所提出的改进 DFT 算法计算工频电压、电流的相量,以消除高次谐波、非整次谐波和衰减非周期分量对测距结果的影响。测距结果如表 2 所示。

表 2 测距结果

Tab.2 Results of fault locating

故障类型	d_1/km	R/Ω	d_2/km	$\varepsilon/\%$
I CG	50	0	49.20	0.267
		100	49.49	0.170
	150	0	150.19	0.063
		100	149.90	0.033
	280	0	280.34	0.113
		100	281.01	0.337
II BCS	50	0	50.29	0.097
		100	50.32	0.107
	150	0	150.27	0.090
		100	150.22	0.073
	280	0	279.87	0.043
		100	279.90	0.033

注: d_1 为实际故障距离; R 为过渡电阻; d_2 为测距结果; ε 为测距误差。

从仿真结果可见,测距结果不受过渡电阻的影响,所得的测距结果都比较准确,满足了超高压同杆双回线路对故障测距精度的要求。

4 结论

a. 所提出的同杆双回路保护方案以线路的分布参数模型为基础,适用于高电压、远距离输电线路。

b. 经仿真研究表明该保护方案可靠性较高,几乎不受过渡电阻的影响,在各种故障情况下都能正确动作。

c. 该保护方案可提供故障测距信息,既可用于单回线故障测距,也可用于跨线故障测距。测距结

果不受过渡电阻的影响,精度较高,并且原理简单,易于实现。

参考文献:

- [1] 康小宁,梁振锋. 同杆平行双回线路保护及自动重合闸综述[J]. 继电器,2004,32(23):72-76.
KANG Xiao-ning,LIANG Zhen-feng. Survey on the protective relaying and autoreclosure for double-circuit lines on the same pole[J]. Relay,2004,32(23):72-76.
- [2] 张嘉旻,葛荣良. 同塔多回输电技术特点及其应用分析[J]. 华东电力,2005,33(7):23-26.
ZHANG Jia-min,GE Rong-liang. Features and application of power transmission technology of multi-circuit lines on the same tower[J]. East China Electric Power,2005,33(7):23-26.
- [3] 邓妍,邵能灵. 适用于平行双回线路的零序距离继电器研究[J]. 华东电力,2006,34(2):1-4.
DENG Yan,TAI Neng-ling. Study of the double lines distance relay based on zero sequence components[J]. East China Electric Power,2006,34(2):1-4.
- [4] 孙英凯,李永丽,李铁男. 神经网络用于同杆并架双回线故障诊断的方法[J]. 电力系统及其自动化学报,1999,11(3):51-56.
SUN Ying-kai,LI Yong-li,LI Tie-nan. A fault detective method of double-circuit lines with neural network[J]. Proceedings of the EPSA,1999,11(3):51-56.
- [5] 徐磊,胡俊侯,翁子文. 长距离同杆架设双回路保护特点的研究[J]. 电力自动化设备,1999,19(4):14-16.
XU Lei,HU Jun-hou,WENG Zi-wen. Research on protection characteristic for long distance double-line with the same tower[J]. Electric Power Automation Equipment,1999,19(4):14-16.
- [6] 张举,李志雷,周强强,等. 基于故障暂态电流分量的双回线保护原理[J]. 华北电力大学学报,2006,33(2):50-53.
ZHANG Ju,LI Zhi-lei,ZHOU Qiang-qiang,et al. New principle for double-circuit transmission line protection based on transient faulted current component[J]. Journal of North China Electric Power University,2006,33(2):50-53.
- [7] 张延,雷雨田,吴云. 同杆双回线路继电保护方案研究[J]. 继电器,2004,32(13):40-42.
ZHANG Yan,LEI Yu-tian,WU Yun. Relay protection for double-circuit lines on the same tower[J]. Relay,2004,32(13):40-42.
- [8] 常乃超,兰洲,甘德强,等. 广域测量系统在电力系统分析及控制中的应用综述[J]. 电网技术,2005,29(10):46-52.
CHANG Nai-chao,LAN Zhou,GAN De-qiang,et al. A survey on applications of wide-area measurement system in power system analysis and control[J]. Power System Technology,2005,29(10):46-52.
- [9] JIANG Joe-air,YANG Jun-zhe,LIN Ying-hong,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.
- [10] JIANG Joe-air,CHEN Ching-shan,LIU Chih-wen. A new protection scheme for fault detection,direction discrimination,classification,and location in transmission lines[J]. IEEE Trans on Power Delivery,2003,18(1):34-42.
- [11] DOMMEL H W. 电力系统电磁暂态计算理论 [M]. 李永庄,林集明,曾昭华,译. 北京:水利电力出版社,1991.
- [12] 贺家李,葛耀中. 超高压输电线路故障分析与继电保护[M]. 北京:科学出版社,1987.
- [13] 施围. 电力系统过电压计算[M]. 西安:西安交通大学出版社,1988.
- [14] 安艳秋,高厚磊. 基于同步相量测量的线路参数在线计算[J]. 电力自动化设备,2002,22(9):21-23.
AN Yan-qi,GAO Hou-lei. On-line calculation of transmission line parameters using synchronized phasor measurement [J]. Electric Power Automation Equipment,2002,22(9):21-23.
- [15] 周大敏. 递推富氏算法中衰减非周期分量的消除方法[J]. 继电器,1998,26(5):5-11.
ZHOU Da-min. The accurate algorithm to eliminate decaying DC component from recursive Fourier algorithm [J]. Relay,1998,26(5):5-11.

(责任编辑:李玲)

作者简介:

蔡国伟(1968-),男,吉林吉林人,教授,博士,从事电力系统分析与控制方面的教学和科研工作;

周国屏(1979-),男,甘肃天水人,硕士研究生,研究方向为电力系统继电保护(E-mail:jlzhouguoping@sina.com);

李凌(1981-),男,黑龙江齐齐哈尔人,硕士研究生,研究方向为电力系统分析与控制。

Protection scheme for double-line with same pole based on synchronized phasor measurement

CAI Guo-wei,ZHOU Guo-ping,LI Ling

(Electrical Engineering Institute,Northeast Dianli University,Jilin 132012,China)

Abstract: A protection scheme for DLSP(Double-Line on Same Pole) based on the synchronized phasor measurement is provided,in which the effect of mutual inductance between two lines on protection is eliminated by decoupling using phase-mode transformation. The criterion of protection is deduced in mode-domain using the theory of line with distributed parameters to eliminate the effect of line parameter distribution on protection. Different faults of DLSP can be detected exactly and rapidly by fault detection in mode-domain,and the fault location information is provided as well. The operating characteristic analysis indicates this protection scheme is feasible. Simulation with EMTP shows its high reliability and sensitivity. It is nearly impervious to fault path resistance and has better fault locating accuracy.

Key words: synchronized phasor measurement; double-line on same pole; line with distributed parameters; phase-mode transformation