

新型阻抗选相方法

陈朝晖¹, 黄少锋¹, 陶惠良², 杨奇逊¹

(1. 华北电力大学四方研究所, 北京市 102206; 2. 北京四方继保自动化股份有限公司, 北京市 100085)

摘要: 针对现有阻抗选相方法存在的误选相问题, 提出了一种适用于微机保护的新型阻抗选相方法。该方法利用了单相测量阻抗、相间测量阻抗以及故障前负荷阻抗负荷状态下阻抗继电器的测量阻抗的幅值大小关系以及 3 个单相测量阻抗的相位关系进行比较。仿真计算表明, 新的阻抗选相方法在高阻接地、弱馈等故障情况都有很好的选相能力, 适于作为线路保护稳态故障选相元件。

关键词: 线路保护; 选相元件; 测量阻抗

中图分类号: TM773

0 引言

现有的保护中, 故障选相通常由突变量选相和稳态量选相两部分组成。故障初期, 突变量选相结果灵敏度高且简单可靠。后期, 因为可能存在开关动作导致系统网络结构变化以及突变量的提取可能存在问题等原因, 导致突变量选相结果已经不可靠, 此时的选相结果以稳态量选相为准。现在广为应用的稳态量选相是反应正序故障分量电流(电压)和负序电流(电压)相位差、负序和零序电流(电压)相位差的序分量选相元件^[1,2]。序分量选相元件的关键在于区位的划分。文献[3]提出利用零、负序电流分区结果和正序电流突变量和负序电流分区结果相结合, 同时利用序分量电流的大小关系进行选相。文献[4]同样利用零、负序分区结果和正序电流突变量及负序电流分区结果, 对于区位的划分进行了模糊化处理。与原有的选相元件相比, 优点在于, 在相位重叠区内, 不必再进行阻抗确认。电流序分量选相的优点在于受过渡电阻影响小且不受负荷分量的影响。但其也存在缺陷, 对于正序故障分量电流和负序电流相位差选相, 其在同反向故障中可能会误选相。另外, 对于弱馈侧, 因为正序、负序电流分量很小, 此时基于其相位进行选相已经不可靠。对于长线路末端经高阻接地情况, 利用电流进行选相也可能存在问题。为了反应以上故障情况, 现有的稳态量选相实际上是几种选相元件多判据的综合, 利用不同的选相元件反应不同的故障。以上方法带来的问题在于, 整个稳态量选相比较复杂, 且如何进行多判据之间的切换也比较难确定。因此, 有必要对稳

态量选相方法进行深入研究。

1 传统阻抗选相方法^[5]

故障时, 通常情况下, 故障相电压降低、电流增大、测量阻抗减小。与以上电气量的变化规律相对应, 提出了利用电压、电流、阻抗进行选相的方法。就灵敏度而言, 因为测量阻抗的变化即反应电压降低又反应电流增大, 所以其灵敏度较高。传统的利用三相继电器进行阻抗选相的方法存在以下问题: 发生高阻接地尤其是长线路末端经高阻接地故障时, 故障相测量阻抗可能在其动作特性圆以外; 同时, 为了保证阻抗选相的灵敏度, 其阻抗整定值较大。文献[5]指出, 当整定阻抗比较大, 电流采用零序电流补偿时, 且继电器的动作特性采用偏移特性时, 健全相阻抗继电器可能会误动。针对这种情况, 文献[5]指出, 选相用的阻抗继电器中, 电流以选用相电流不加零序电流补偿更为合适。传统阻抗选相存在的上述问题影响了阻抗选相方法的应用。现有的稳态选相方法更侧重于利用序分量(电流、电压)进行分区选相, 而将阻抗测量结果作为以上选相方法的补充。

阻抗选相存在上述问题的原因在于: 以往的阻抗选相因为实现手段的限制没有充分利用测量阻抗中所包含的故障信息。例如, 微机保护出现以前的保护无法测量短路点到保护安装处的阻抗值, 只能利用保护安装处的电流电压来判断阻抗继电器的动作方程满足与否来间接实现阻抗测量。同样原因, 传统保护中也无法进行 3 个单相测量阻抗幅值大小的比较, 只能利用故障相的阻抗继电器动作、健全相阻抗继电器不动作来选出故障相。微机保护中, 因为其强大的计算能力以及逻辑判断能力, 可以不局

限于传统的阻抗选相方法,为利用阻抗进行选相提供了新的可能。

新型阻抗选相的思路,主要考虑利用以下信息量:故障前负荷状态下继电器测量阻抗、故障后测量阻抗以及测量阻抗相对于负荷状态继电器测量阻抗的幅值变化量、3个单相测量阻抗之间的相位关系等。

2 新型阻抗选相方法

2.1 各种故障情况下阻抗表达式^[6]

三相故障如图 1 所示。

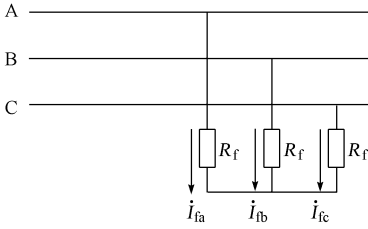


图 1 三相故障
Fig. 1 Three phase fault

$$Z = pZ_L + \frac{\dot{I}_f}{\dot{I}_M} R_f = pZ_L + \frac{1}{C} R_f$$

式中: Z 为阻抗继电器测量阻抗; p 为短路点到保护安装处占线路全长的百分比; Z_L 为线路阻抗; R_f 为过渡电阻; $C = I_M / I_f$ 为流过保护的电流与流过过渡电阻上的电流之比。

两相经过渡电阻短路,如图 2 所示。

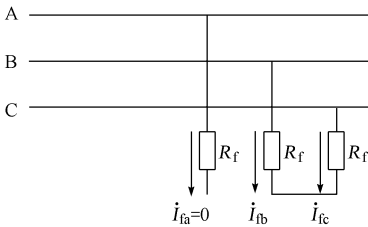


图 2 两相故障
Fig. 2 Phase-to-phase fault

$$Z_{JA} = \infty$$

$$Z_{JB} = pZ_L + \frac{1}{C_1 \sqrt{3}} (Z_{2\Sigma} \angle -90^\circ + 2R_f \angle -30^\circ)$$

$$Z_{JC} = pZ_L + \frac{1}{C_1 \sqrt{3}} (Z_{2\Sigma} \angle 90^\circ + 2R_f \angle 30^\circ)$$

$$Z_{JAB} = pZ_L + \frac{1}{C_1} (\sqrt{3}Z_{2\Sigma} \angle -90^\circ + 2R_f \angle -60^\circ)$$

$$Z_{JBC} = pZ_L + \frac{1}{C_1} R_f$$

$$Z_{JCA} = pZ_L + \frac{1}{C_1} (\sqrt{3}Z_{2\Sigma} \angle 90^\circ + 2R_f \angle 60^\circ)$$

式中: $Z_{2\Sigma}$ 为系统对故障点综合负序阻抗; C_1 为正序电流分配系数。

单相经过渡电阻短路,如图 3 所示。

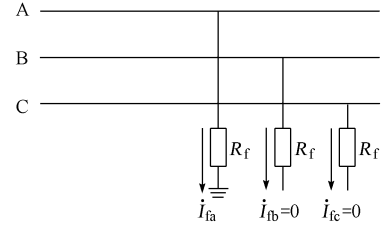


图 3 单相故障
Fig. 3 Phase-to-ground fault

$$Z_{JA} = pZ_L + \frac{3}{C} R_f$$

$$Z_{JB} = pZ_L + \frac{\sqrt{3}}{C} (Z_{2\Sigma} \angle -90^\circ + Z_{0\Sigma} \angle -150^\circ + \sqrt{3}R_f \angle -120^\circ)$$

$$Z_{JC} = pZ_L + \frac{\sqrt{3}}{C} (Z_{2\Sigma} \angle 90^\circ + Z_{0\Sigma} \angle 150^\circ + \sqrt{3}R_f \angle 120^\circ)$$

$$Z_{JAB} = pZ_L + \frac{1}{C_1 \sqrt{3}} (Z_{2\Sigma} \angle 90^\circ + Z_{0\Sigma} \angle 30^\circ + 3R_f \angle 30^\circ)$$

$$Z_{JBC} = pZ_L + \infty$$

$$Z_{JCA} = pZ_L + \frac{1}{C_1 \sqrt{3}} (Z_{2\Sigma} \angle -90^\circ + Z_{0\Sigma} \angle -30^\circ + 3R_f \angle -30^\circ)$$

式中: $Z_{0\Sigma}$ 为系统对故障点综合零序阻抗; $C' = (1 + 3K)C_0 + 2C_1 = K'C_0 + 2C_1$; $C' = (1 + 3K)C_0 - C_1 = K'C_0 - C_1$; $K' = 1 + 3K = Z_0/Z_1$; C_0 为零序电流分配系数; K 为零序电流补偿系数。

两相经过渡电阻接地短路,如图 4 所示。

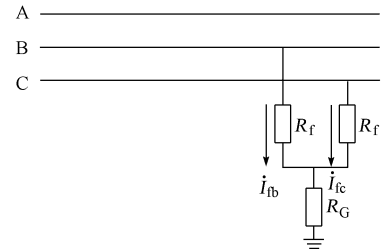


图 4 两相对地故障
Fig. 4 Double phase-to-ground fault

$$Z_{JA} = pZ_L + \frac{3(Z_{0\Sigma} + R_f + 2R_G)}{C'}$$

$$Z_{JB} = pZ_L + \frac{3R_G(a^2R_f - Z_{2\Sigma}) + (a^2 - a)R_fZ_{0\Sigma} + (a^2 - 1)R_fZ_{2\Sigma} + 3a^2R_f^2}{C_1[a^2(Z_{2\Sigma} + R_f) + (a^2 - a)(Z_{0\Sigma} + R_f + 3R_G)] - K'C_0(Z_{2\Sigma} + R_f)}$$

$$Z_{JC} = pZ_L + \frac{3R_G(a^2R_f - Z_{2\Sigma}) + (a - a^2)R_fZ_{0\Sigma} + (a - 1)R_fZ_{2\Sigma} + 3aR_f^2}{C_1[a(Z_{2\Sigma} + R_f) + (a - a^2)(Z_{0\Sigma} + R_f + 3R_G)] - K'C_0(Z_{2\Sigma} + R_f)}$$

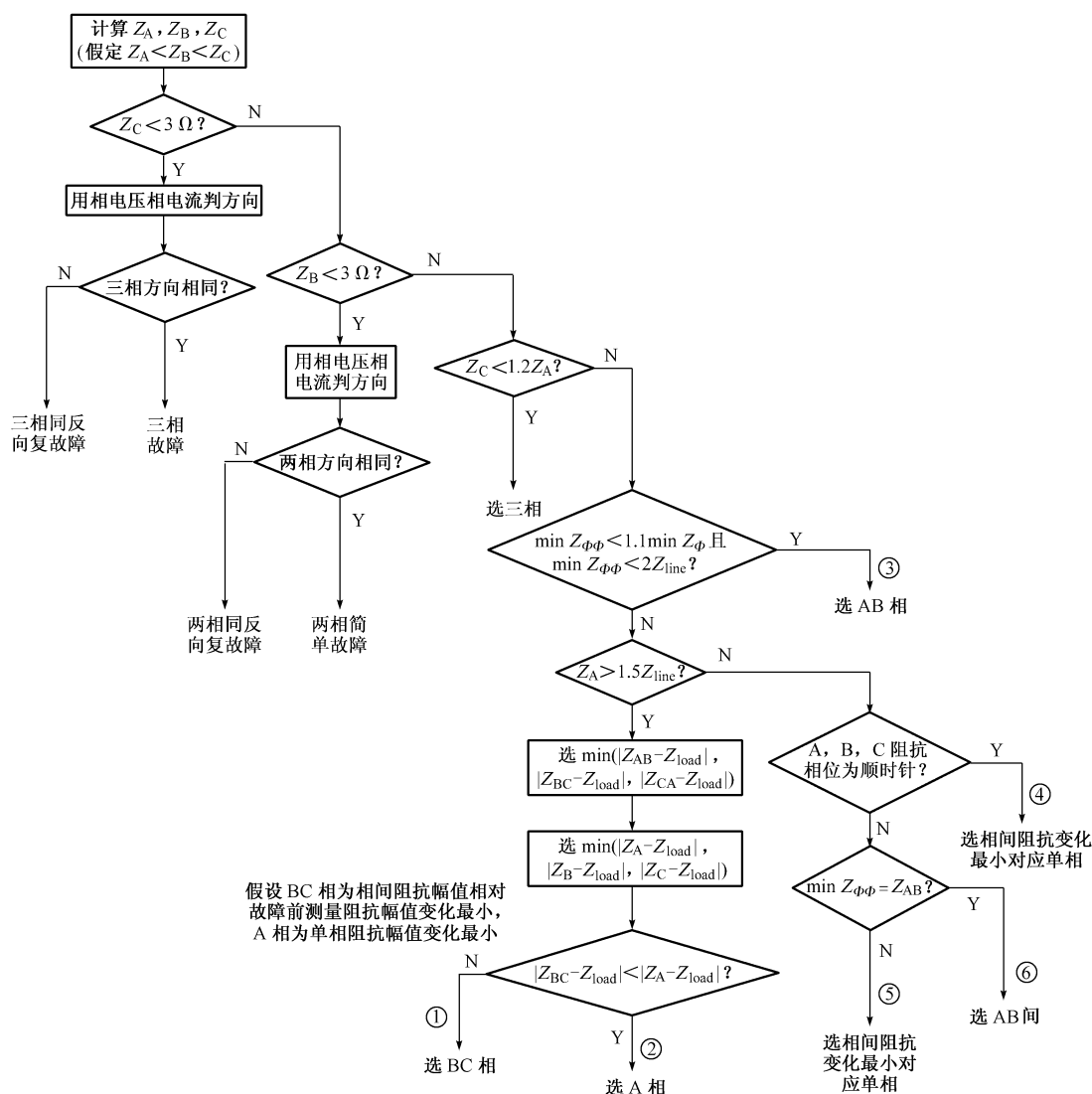
$$Z_{JAB} = pZ_L + \frac{3Z_{2\Sigma} + (1 - a^2)2R_f + 3R_G + R_f + Z_{0\Sigma} + (1 - a^2)(R_f + Z_{2\Sigma})R_f}{C_1[(a - a^2)(Z_{0\Sigma} + R_f + 3R_G) + (1 - a^2)(R_f + Z_{2\Sigma})]}$$

$$Z_{JBC} = pZ_L + \frac{R_f}{C_1}$$

$$Z_{JCA} = pZ_L + \frac{3Z_{2\Sigma} + (1 - a)2R_f + 3R_G + R_f + Z_{0\Sigma} + (1 - a)(R_f + Z_{2\Sigma})R_f}{C_1[(a^2 - a)(Z_{0\Sigma} + R_f + 3R_G) + (1 - a)(R_f + Z_{2\Sigma})]}$$

2.2 新型选相方案

新型选相方案流程图如图 5 所示,流程图中的阻抗均为阻抗幅值。



Z_ϕ ($\phi=A, B, C$) 为相测量阻抗幅值; $Z_{\phi\phi}$ ($\phi\phi=AB, BC, CA$) 为相间测量阻抗幅值; Z_{line} 为保护线路阻抗幅值; $Z_{load} = \dot{U}_{load} / \dot{I}_{load}$; Z_{load} 为故障前负荷状态下继电器测量阻抗幅值; U_{load} 为负荷状态下保护安装处电压; I_{load} 为负荷状态下保护安装处流过的负荷电流

图 5 选相流程
Fig. 5 Flow chart of the phase selector

新的阻抗选相方法中引入了故障前负荷状态下继电器测量阻抗。为了保证可靠性,此测量阻抗幅值只在系统正常运行时计算,启动元件动作后停止计算。

对于出口附近的三相故障、两相故障以及复故障的处理,因为同反向故障必然是近区故障,当3个相阻抗幅值最大者小于一定值时(此定值的确定根据电流互感器变比确定,确保近区故障在此范围之内,在图5中取为3Ω),认为系统发生三相故障,具体是三相同反向复故障还是三相简单故障,可以根据方向元件判别结果确定。当单相阻抗幅值中间者小于此定值时,认为发生两相故障,是否为两相复故障同样根据方向元件判别结果确定。

对于三相故障,理论上三相测量阻抗相等。为了可靠性考虑,取1.2倍的系数关系。

对于相间不接地故障,因为相间阻抗中必然有故障相相间阻抗最小,利用相间阻抗最小值和单相阻抗最小值可以进行区分。同样为了增加可靠性,附加了一个条件,利用线路全长的阻抗幅值与相间阻抗幅值大小进行比较。

以往的阻抗选相中,高阻接地故障始终是其难以解决的问题。究其原因在于,发生高阻抗接地时,故障相测量阻抗幅值变大,测量阻抗可能会位于阻抗动作特性圆以外。新型阻抗选相方法中,当单相测量阻抗最小相幅值大于一定值时,认为系统可能发生高阻接地故障,计算相间测量阻抗与故障前继电器测量阻抗幅值变化量,确定变化最小的相间测量阻抗。同时计算相测量阻抗与故障前继电器测量阻抗幅值变化量,确定变化最小的单相测量阻抗。高阻单相接地时,对应两健全相的相间测量阻抗变化很小,根据以上特点,可以实现故障选相。

对于单相故障,以AG故障为例,此时,对于BC相间阻抗,因为B,C两相电流突变量变化近似相等,所以相间阻抗变化相对于故障前的负荷阻抗很小。同时根据相位关系,可知当发生单相故障时,A,B,C相3个单相阻抗相位上在阻抗平面上通常为顺时针方向。而对于两相接地故障一般没有以上关系^[6]。

对于相间经过渡电阻接地故障,以BCG故障为例,因为过渡电阻的影响,使超前相故障电流大于滞后相故障电流,两故障相测量电流幅值差别会更大,分析表明,超前相电流幅值可能会接近滞后相电流幅值的2倍。可能会存在有 $Z_B < Z_{BC} < Z_C$,当 $Z_{BC} < 1.1Z_B$,由图5中③出口;否则,因为其三相阻抗相位不满足顺时针关系,由图5中⑥出口。

对于弱馈侧故障,因为弱馈侧系统正、负序等值

阻抗很大,弱馈侧流过的电流主要是零序电流。以往的基于电流相位关系的选相方法可能会误选相。利用阻抗选相,因为故障相电压要小于健全相电压,所以,此时利用阻抗选相仍然有较高的灵敏度。

需要说明的是,流程图中的判据是一个组合判据,单纯利用其中的一个判据,都不可能取得可靠的选相结果。例如,通常情况下,单相故障A,B,C三相阻抗相位上为顺时针方向,但经过渡电阻接地时,可能存在其中两相阻抗相位差很小的情况,考虑计算误差,有可能会误选相。所以,在利用此判据以前,先进行高阻接地的判别,使高阻接地从②出口。同时绝大多数相间及相间接地故障从③出口。

3 仿真实验

3.1 仿真模型及结果

仿真系统模型如图6所示。保护位于S侧。

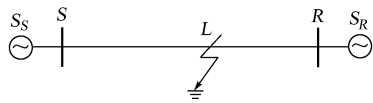


图6 仿真系统模型
Fig. 6 Simulated system model

对于稳态量选相,因为不考虑短路过程中的暂态过程,输电线路模型采用集中参数。线路参数如下: $Z_0 = (0.353 + j0.92)\Omega/\text{km}$, $Z_1 = (0.025 + j0.276)\Omega/\text{km}$;仿真中考虑了不同的系统阻抗、过渡电阻、故障点位置、两端系统相位差、线路长度。部分系统参数及计算阻抗如表1所示。

表1 系统等值阻抗
Table 1 Source impedance of system

系统	Z_{S1}/Ω	Z_{S0}/Ω	Z_{R1}/Ω	Z_{R0}/Ω	L/km
1	$1.8 + j23.6$	$11.68 + j40.27$	$1.8 + j23.6$	$11.68 + j40.27$	400
2	$1.8 + j23.6$	$11.68 + j40.27$	$0.18 + j2.36$	$1.168 + j4.027$	400
3	$18 + j236.0$	$116.8 + j402.70$	$0.18 + j2.36$	$1.168 + j4.027$	400

注: Z_{S1} , Z_{S0} , Z_{R1} , Z_{R0} 分别为S侧正序、零序系统等值阻抗和R侧正序、零序系统等值阻抗。

对于系统1,两端系统容量相当。系统2对侧系统相当于大系统。系统3本侧为小系统,对侧为大系统,相当于比较极端的情况。为了进行对比,选用了广为应用的零负序分区选相进行对比^[3]。应该指出,对于绝大多数系统故障,两种选相方法都有很好的选相能力,因此表2中只列出一些比较极端的在线路末端经高阻接地的故障情况。

3.2 仿真结果分析

由表2仿真结果可以看出,对于线路末端经高阻接地故障,零序电流分量很小,远小于故障前负荷电流,此时考虑三相电流互感器传变特性不一致、系

统不完全对称等影响。当零、负序电流幅值很小时,其相位计算结果已经不可靠。长线路末端高阻接地故障时,不仅本端测量的零、负序电流很小,本端电流、电压变化也很小,三相阻抗可能比较接近,相对比较没有意义。但此时利用新的阻抗选相方法,因为健全相(相间)的测量阻抗与故障前测量阻抗相比较,变化量总是最小,可以利用此特征进行选相,因为选相的目的是为了阻抗测量、选跳故障相,对于这

种故障,本端保护只有零序后备段保护能够反应。距离保护对于末端高阻接地本身灵敏度已经很低。此时可以依靠对端系统跳开后,对侧分流作用消失,本端保护纵续选相跳闸动作。高阻接地本身对系统稳定影响比较小,此时故障切除依靠保护纵续动作应该可以接受。比较零、负序分区选相而言,利用阻抗的幅值变化进行选相灵敏度还是有所提高。

表 2 故障选相元件的动作情况
Table 2 Results of phase selection

系统	故障类型	过渡电阻/ Ω	角度/ $(^\circ)$	Z_A/Ω	Z_B/Ω	Z_C/Ω	Z_{load}/Ω	I_0/A	I_{2A}/A	$\arg(\dot{I}_0/\dot{I}_{2A})$	阻抗选相	零负序选相
1	AG	300	-30	443	296.0	271.0	300	51.40	66.4	/	AG	/
1	AG	300	30	229	291.0	342.0	301	51.40	66.4	/	AG	/
1	BCG	300	-30	284	151.0	100.0	300	25.90	1 140.0	/	BCG	/
1	BCG	300	30	315	92.3	170.0	301	25.80	1 139.0	/	BCG	/
2	AG	300	-30	306	255.0	245.0	259	30.80	30.5	/	AG	/
2	AG	300	30	227	255.0	279.0	259	30.80	30.5	/	AG	/
2	BCG	300	-30	250	163.0	94.8	259	15.40	1 154.0	/	BCG	/
2	BCG	300	30	267	90.7	175.0	259	15.40	1 154.0	/	BCG	/
3	AG	300	-30	805	644.0	598.0	655	16.70	12.0	/	AG	/
3	AG	300	30	555	645.0	732.0	657	16.70	12.0	/	AG	/
3	BCG	300	-30	623	311.0	146.0	655	8.37	426.0	/	BCG	/
3	BCG	300	30	688	135.0	343.0	657	8.37	426.0	/	BCG	/

注:表中数据大小均为系统一次侧值; I_0 为保护安装处零序电流幅值; I_{2A} 为保护安装处以A相为参考相的负序电流幅值;角度为S侧系统等值电源相位超前R侧等值系统等值电源相位;表中“/”处是因为零序(或/与)负序电流太小,相位计算结果不可靠,因此相位比较结果没有意义,没有选相结果。

4 结语

针对传统阻抗选相中存在的问题,本文指出其最根本原因在于没有充分利用阻抗中所包含的故障信息。本文提出了一种新的基于测量阻抗幅值和相位关系的新型选相方法。在新的选相方法中,引入了故障前继电器测量阻抗以及故障后三相单相测量阻抗相位关系。仿真结果表明,新型阻抗选相方法原理简单、选相准确可靠,对于高阻接地、弱馈侧故障等故障情况均有比较好的选相能力,与以往选相方法相比在灵敏度上也有一定程度的提高。

参考文献

[1] 葛耀中. 新型继电保护与故障测距原理与技术. 西安:西安交通大学出版社,1996.
GE Yao-zhong. Theory and Techniques of New Type of Protective Relaying and Fault Location. Xi'an: Xi'an Jiaotong University Press, 1996.

[2] 徐振宇,杨奇逊,刘万顺,等. 一种序分量高压线路保护选相元件. 中国电机工程学报,1997,17(3):214—215.
XU Zhen-yu, YANG Qi-xun, LIU Wan-shun et al. A Phase Selector Based on Sequence Components in HV Transmission Line Protection. Proceedings of the CSEE, 1997, 17(3): 214—215.

[3] 许庆强,索南加乐,宋国兵,等. 一种电流故障分量高压线路保护选相元件. 电力系统自动化,2003,27(7):50—54.
XU Qing-qiang, SUONAN Jia-le, SONG Guo-bing et al. A Fault Phase Selector for Transmission Line Protective Relaying Using Current Fault Components. Automation of Electric Power Systems, 2003, 27(7): 50—54.

[4] 郑涛,刘万顺,杨奇逊,等. 一种基于模糊逻辑的新型故障序分量选相元件. 电力系统自动化,2003,27(12):41—44,74.
ZHENG Tao, LIU Wan-shun, YANG Qi-xun et al. A New Phase Selector Based on Fault Sequence Components and Fuzzy Logic Theory. Automation of Electric Power Systems, 2003, 27(12): 41—44, 74.

[5] 朱声石. 高压电网继电保护原理与技术. 第2版. 北京:中国电力出版社,1995.
ZHU Sheng-shi. Principle and Technology of High Voltage Networks Protection. 2nd ed. Beijing: China Electric Power Press, 1995.

[6] 高中德. 超高压电网继电保护专题分析. 北京:中国电力出版社,1990.
GAO Zhong-de. Special Topic Analysis About the Protective Relay for UHV Power System. Beijing: China Electric Power Press, 1990.

陈朝晖(1979—),男,博士研究生,研究方向为电力系统微机保护。E-mail: chenzh@sf-auto.com

Key words: line protection; phase selection; impedance measurement