

同杆并架双回线基于电流突变量的综合选相

刘千宽, 黄少锋, 王兴国

(华北电力大学电力系统保护与动态安全监控教育部重点实验室, 北京市 102206)

摘要: 相电流差突变量选相元件在单回线故障中具有良好的选相性能,但在同杆双回线跨线故障中可能误选相。利用六序故障分量的分析方法,分析了相电流突变量在同杆双回线跨线故障中的幅值和相位特征,给出了其相位比相方程。在此基础上,提出了一种运用测量阻抗和方向元件相结合的综合选相方法,并给出了选相流程图。仿真结果表明,在双回线简单故障和跨线故障时,基于单回线单端电气量的同杆并架双回线综合选相方法具有较理想的选相性能。

关键词: 同杆并架双回线; 选相; 六序故障分量; 跨线故障

中图分类号: TM773

0 引言

随着中国交流电网电压等级向 1 000 kV 特高压发展,为了节省用地、减少投资、提高经济效益,同杆并架双回线或多回线的输电结构将在中国超高压和特高压输电线路的建设中得到更多的应用。国家电网公司在“十一五”规划中也提出了同杆并架线路及其保护、重合闸方式的普及应用问题。因此,随着电网规模的扩大和同杆并架双回线路的日益普及,在同杆并架双回线或多回线上同时发生故障的概率将大大增加。

单相自动重合闸已广泛应用于高压系统中,性能良好的选相元件对保障供电的可靠性发挥了重要的作用,基于故障分量的选相元件由于不受负荷电流的影响而得到应用和深入研究^[1-3]。然而,同杆双回线共可能发生 120 种故障,其中跨线故障 98 种,包括接地与不接地故障;由于同杆跨线故障的复杂性和多样性,基于单端电气量的任何单一的选相元件包括阻抗选相元件^[4]都难以在跨线故障中准确选相。同杆并架双回线继电保护及重合闸技术导则明确提出:①对 220 kV 及以上系统的同杆并架双回线路继电保护装置应具有按故障相选相跳闸功能;②同杆并架双回线路的主保护应采用分相电流差动保护或具有分相命令的纵联保护。分相电流差动保护作为同杆双回线的首选保护具有天然的选相能力及其他一系列优点,可使同杆并架双回线保护的问题得到圆满解决。但当条件不具备装设分相电流差动保护而采用纵联距离保护时,跨线故障时的正确选相是其主要问题。文献[5]根据同杆双回线六序

故障分量的特征区分各种跨线故障,需要双回线的电气量,接线形式比较复杂。文献[6]通过对跨线故障特点的分析提出了基于单回线单端故障相电流相位比较区分跨线与非跨线故障的方法,但其相位比较判据在均匀线路近端故障时能获得理想的效果,适用于纵联保护的选相。

为满足后备保护选相的需要并保证单回线故障选相的可靠性,本文提出了基于相电流差突变量选相元件,利用测量阻抗和方向元件以及相电流突变量相位比较作为辅助判据构成同杆双回线故障的综合选相方法。利用六序故障分量,分析了同杆双回线发生跨线故障时相电流突变量的故障特征,给出了所提出的辅助选相方法的判据,并通过 RTDS 实时仿真系统进行了实验验证。

1 相电流突变量的故障特征分析

相电流差突变量选相元件的最大优点是不反应于负荷电流,目前在高压线路保护中得到了广泛应用。该选相元件通过相电流差突变量的幅值比较构成选相判据,在单回线故障中具有良好的选相性能,但在同杆双回线的跨线故障中遇到了困难。

1.1 跨线故障时相电流突变量的幅值特征

以双回线两异名相跨线故障为例进行简要分析。图 1 所示为双回线 I B II C 跨线接地故障网络图, K 为故障点, R 和 R_g 分别为相间和接地过渡电阻。

考察安装在 I 线 M 侧的保护。根据两异名相跨线故障时的边界条件,利用六序故障分量分析方法,得到故障支路零序电流同反序分量分别为:

$$\dot{I}_{K0T} = \frac{-\dot{U}_{KA|0|}}{2Z_{K0T} + Z_{K1T} + 3Z_{K1F} + 6R + 12R_g} \quad (1)$$

$$\dot{I}_{K0F} = \frac{-j\sqrt{3}\dot{U}_{KA|0|}}{2Z_{K0F} + 3Z_{K1T} + Z_{K1F} + 6R} \quad (2)$$

式中: Z_{K0T} , Z_{K0F} , Z_{K1T} 和 Z_{K1F} 是根据各序各分量网络归算到短路点的序阻抗; $\dot{U}_{KA|0|}$ 为正序同序分量网络故障点开路电压; 对 I B II C 跨线不接地故障, $\dot{I}_{K0T} = 0$ 。

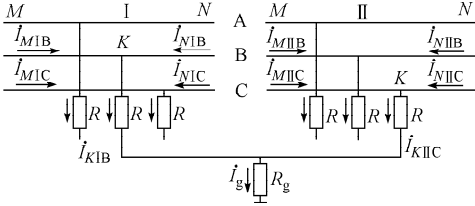


图1 K点 I B II C 故障

Fig. 1 Fault circuit for I B II C at point K

设 C_{0T} , C_{0F} , C_{1T} 和 C_{1F} 分别为零序和正序同反序网在 M 侧的电流分配系数, 则 I 线 M 侧保护安装处的各相电流突变量为:

$$\begin{cases} \Delta \dot{I}_{IA} = (C_{0T} - C_{1T})\dot{I}_{K0T} + (C_{0F} - C_{1F})\dot{I}_{K0F} \\ \Delta \dot{I}_{IB} = \left(C_{0T} + \frac{C_{1T}}{2} + \frac{3C_{1F}}{2}\right)\dot{I}_{K0T} + \\ \quad \left(C_{0F} + \frac{3C_{1T}}{2} + \frac{C_{1F}}{2}\right)\dot{I}_{K0F} \\ \Delta \dot{I}_{IC} = \left(C_{0T} + \frac{C_{1T}}{2} - \frac{3C_{1F}}{2}\right)\dot{I}_{K0T} + \\ \quad \left(C_{0F} - \frac{3C_{1T}}{2} + \frac{C_{1F}}{2}\right)\dot{I}_{K0F} \end{cases} \quad (3)$$

由式(3)不难得到本线两健全相电流突变量为:

$$\Delta \dot{I}_{ICA} = \frac{3}{2}(C_{1T} - C_{1F})(\dot{I}_{K0T} - \dot{I}_{K0F}) \quad (4)$$

由式(1)、式(2)可知, 零序反序分量超前同序分量约 90° , 则 $|\dot{I}_{K0T} - \dot{I}_{K0F}| = |\dot{I}_{K0T} + \dot{I}_{K0F}|$ 。通常, $C_{1T} \neq C_{1F}$, 因此本线两健全相电流突变量之差 $\Delta \dot{I}_{ICA}$ 的幅值由正序同反序网的电流分配系数即两侧系统阻抗、线路参数和故障点位置决定。由此可见, 本线两健全相电流突变量之差的幅值在一定条件下可出现较大的数值, 从而将本线单相故障误选为多相故障。

1.2 相电流突变量的相位特征

在同杆双回线跨线故障时, 故障相电流突变量的相位关系也呈现出与单回线多相故障不同的特征。本节对此进行简要分析, 并给出 RTDS 仿真试验结果予以验证。

1.2.1 单回线多相故障

根据单回线多相故障的边界条件可以得到各相电流突变量的相位关系, 如图 2 所示, 其中三相故障

未画出。分析可知, 单回线 BC 相间故障时两故障相电流突变量相位相反; BC 相间接地故障时两故障相电流突变量随着接地电阻的增加趋于反相, 而且 $\Delta \dot{I}_B - \dot{I}_0$ 与 $\Delta \dot{I}_C - \dot{I}_0$ 之间的相位差比 $\Delta \dot{I}_B$ 与 $\Delta \dot{I}_C$ 之间的相位差更大, 如图中虚线所示; 三相故障时由于仅有正序分量, 因此各相电流突变量相位相差 120° 。总之在单回线多相故障时故障相电流突变量的相位是超前相超前滞后相, 且大于 90° 。

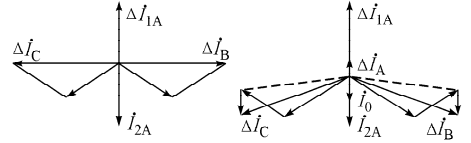


图2 单回线 BC 和 BCN 故障时相电流突变量相位关系

Fig. 2 Phasor diagram of fault component currents for BC and BCN on a single line

1.2.2 双回线两异名相跨线故障

首先考察双回线两异名相跨线不接地故障时两故障相电流突变量的相位特征。

I B II C 不接地故障, $\dot{I}_{K0T} = 0$, 由式(3)可得此时各相电流突变量仅存在与反序分量关联的量。当同杆双回线零序互感均匀时, 有 $C_{0F} = C_{1F} = 1 - \alpha$, 这里 α 为故障点距 M 侧保护安装处的距离与线路全长的百分比。设 Z_{S1m} , Z_{S1n} 和 Z_{1L} 分别为两侧系统和线路的正序阻抗, 考察 I 线 M 侧电流突变量发现:

1) 当 $C_{1T} < C_{1F}$ 即 $\alpha < Z_{S1m}/(Z_{S1m} + Z_{S1n})$ 时,

$\Delta \dot{I}_{IC}$ 与 $\Delta \dot{I}_{IB}$ 呈现同相特征;

2) 当 $C_{1T} > C_{1F}$ 即 $\alpha > Z_{S1m}/(Z_{S1m} + Z_{S1n})$ 时,

$\Delta \dot{I}_{IC}$ 与 $\Delta \dot{I}_{IB}$ 趋于反相。

当同杆双回线零序互感分布不均匀时, $C_{1F} \neq C_{0F}$ 。若 $2C_{0F} + C_{1F} > 3C_{1T}$, 两故障相电流突变量趋于同相; 反之则趋于反相。

对 I B II C 接地故障, 由于零序电流反序分量超前同序分量约 90° , 由式(3)进行定性分析可知, 在各序各分量电流分配系数满足一定条件时, $\Delta \dot{I}_{IC}$ 与 $\Delta \dot{I}_{IB}$ 趋于同相; 且在近端故障时滞后相的突变量 $\Delta \dot{I}_{IC}$ 甚至超前超前相的突变量 $\Delta \dot{I}_{IB}$, 超前的角度受过渡电阻的影响, 过渡电阻越大, 超前的角度越小。当过渡电阻为无穷大时, 基本同相。过渡电阻越小, 角度差越大, 但难以大于 90° 。

为了与单回线 BCN 故障的相位特征进行比较,

可对 I B II C 接地故障时 $\Delta \dot{I}_{IB} - \dot{I}_0$ 与 $\Delta \dot{I}_{IC} - \dot{I}_0$ 的相位关系进一步分析。

改写式(3)可得下式:

$$\begin{cases} \Delta \dot{I}_{IA} - \dot{I}_0 = -C_{1T} \dot{I}_{K0T} - C_{1F} \dot{I}_{K0F} \\ \Delta \dot{I}_{IB} - \dot{I}_0 = \frac{1}{2}(C_{1T} + 3C_{1F}) \dot{I}_{K0T} + \frac{1}{2}(3C_{1T} + C_{1F}) \dot{I}_{K0F} \\ \Delta \dot{I}_{IC} - \dot{I}_0 = \frac{1}{2}(C_{1T} - 3C_{1F}) \dot{I}_{K0T} + \frac{1}{2}(-3C_{1T} + C_{1F}) \dot{I}_{K0F} \end{cases} \quad (5)$$

根据正序同反序网 M 侧的电流分配系数和零序电流同反序分量的相位关系可知:当 $C_{1F} > 3C_{1T}$ 时, $\Delta \dot{I}_{IC} - \dot{I}_0$ 可超前 $\Delta \dot{I}_{IB} - \dot{I}_0$ 一定的角度。

综上所述,在双回线两异名相跨线故障时两故障相电流突变量在一定条件下趋于同相,甚至滞后相超前超前相,这一特征明显有别于单回线多相故障。

1.2.3 双回线多相跨线故障

根据文献[7]给出的其他故障类型六序复合序网和六序分量的相位关系,分析各跨线故障相电流突变量的相位关系,可以得到与上述类似的结论。表 1 示出了几种在 RTDS 仿真系统上试验 500 kV/240 km 同杆线路跨线故障时两端保护测量的相电流突变量相位差,仿真系统模型参见第 4 节。

表 1 多相跨线故障相电流突变量相位差
Table 1 Degree between fault phases for cross-country faults

故障类型	测量点	$\theta_{BA}/(^{\circ})$	$\theta_{AC}/(^{\circ})$
K_2 I A II BC	G	71.2	53.4
	S	-120.9	-116.7
K_3 I A II BC	G	46.0	
	S	-106.2	-110.3
K_4 I AN II ABCN	G	-115.1	-123.6
	S	92.5	53.5

注:测量点 G 和 S 分别为两侧保护安装处; K_2, K_3 和 K_4 分别为设置在 G 侧出口、线路中点和 S 侧出口的故障; θ_{BA} 和 θ_{AC} 分别为下标所示两相电流突变量相位差。

可见,跨线故障时近故障端滞后相电流突变量可超前超前相电流突变量一定的角度。

2 同杆双回线综合选相判据

采用单一选相元件不能在跨线故障时得到理想的选相性能,因此,同杆双回线利用单端电气量进行的选相考虑在跨线故障特征的基础上利用多个元件综合选相。

2.1 相电流突变量相位比较判据

与单回线多相故障明显不同的是,发生跨线故障时,跨线故障相电流突变量的相位关系呈同相特

征或滞后相超前超前相,若满足该特征则一定是跨线故障。但是,两相电流突变量趋于同相的特征仅仅是判别发生跨线故障的充分条件,并不能明确本线一定是单相故障;同样,若趋于反相,并不能断言本线一定是相间故障。这里,以 I AN 故障为例进行简要分析。由 I AN 故障的边界条件可知,故障支路的六序故障分量相等,则不难得到保护安装处的各相电流故障分量为:

$$\begin{cases} \Delta \dot{I}_{IA} = (C_{0T} + 2C_{1T} + C_{0F} + 2C_{1F}) \dot{I}_{K0T} \\ \Delta \dot{I}_{IB} = \Delta \dot{I}_{IC} = (C_{0T} - C_{1T} + C_{0F} - C_{1F}) \dot{I}_{K0T} \end{cases} \quad (6)$$

可见,无论双回线零序互感是否均匀,在一定参数下,非故障相电流可能产生较大的突变量,并与故障相反相。图 3 示出 K_2 I BN II BN 和 K_3 I B II C 故障时系统侧各电气量的相量图。

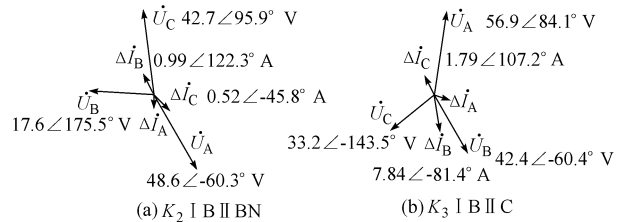


图 3 2 种跨线故障时系统侧电气量相量图
Fig. 3 Phasor diagrams of terminal S for K_2 I B II BN and K_3 I B II C

由图 3 看出, I 线非故障相 C 相均有较大的电流变化量,并与故障相几乎反相。相反,本线为相间故障的跨线故障,可能出现两故障相的电流变化量趋于同相,如 K_2 I ABN II BN 故障时 G 侧 AB 两相电流突变量相位差为 86.9° , K_4 I BCN II CN 故障时 S 侧 BC 两相相位差为 40.4° 。因此单纯地依赖相位比较并不能完全区分跨线故障类型。

综上所述,本文提出的滞后相与超前相电流突变量相位比相方程如下:

$$-90^{\circ} < \arg(\Delta \dot{I}_{A,B,C} / \Delta \dot{I}_{C,A,B}) < 120^{\circ} \quad (7)$$

$$-90^{\circ} < \arg((\Delta \dot{I}_{A,B,C} - \dot{I}_0) / (\Delta \dot{I}_{C,A,B} - \dot{I}_0)) < 120^{\circ} \quad (8)$$

计算式(7)、式(8)的基本条件是 $\Delta I_{\phi} > 0.1I_N$ 和两相电压低,并且式(8)在有零序电压即判为接地故障时才投入判别。

2.2 阻抗选相元件

综合选相采用测量阻抗作为跨线故障时的辅助选相元件。考虑到近端故障时因电压较低测量阻抗可能落入偏移区而失去方向性,因此阻抗选相在电压低于 15% 额定电压时采用按相计算的突变量方

向元件选跨线区内故障相,否则采用如图 4 所示的四边形特性的阻抗元件选相。

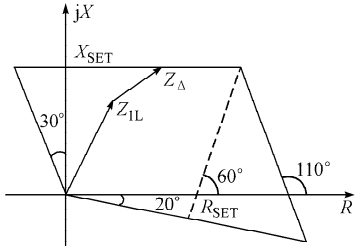


图 4 阻抗选相元件动作特性
Fig. 4 Operation characteristic of impedance based selector

该特性是考虑到跨线故障具有较大的测量附加阻抗 Z_{Δ} ^[8],将传统四边形 R 特性(图中虚线所示)改成过其端点倾角为 110° 得到的,其整定项仍为 R_{SET} 和 X_{SET} 。 X_{SET} 按下式整定:

$$X_{SET} = X_{1L} + 0.5 X_{0L} \quad (9)$$

相阻抗测量在接地和不接地故障中采用不同的计算式,且选相元件阻抗的计算不考虑零序电流补偿。对接地故障: $Z_{\phi} = \dot{U}_{\phi} / \dot{I}_{\phi}$; 对不接地故障: $Z_{\phi} = \dot{U}_{\phi\phi} / (2\dot{I}_{\phi})$ 。

3 选相流程

图 5 示出了综合选相流程示意图。

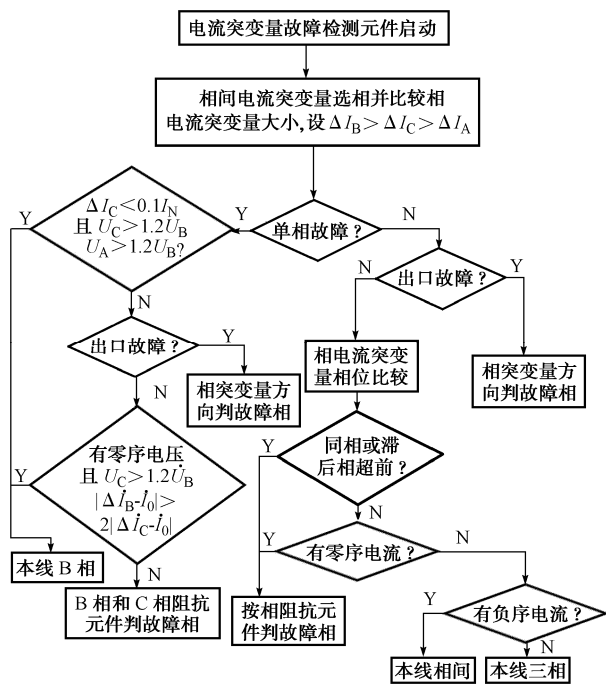


图 5 同杆双回线综合选相流程
Fig. 5 Flow chart of phase selector for cross-country faults

跨线故障通常产生零序电流是其重要的故障特征,只不过跨线不接地故障中的零序电流仅有反序分量,同序分量为 0,因此双回线的选相由零序电压区分接地与不接地故障。

为避免反向故障时得不到选相结果,因此在综合选相判为反向故障无选相结果时,取电流突变量的选相结果作为故障相。

4 RTDS 仿真验证

将相电流差突变量选相作为方案 1,本文提出的综合选相作为方案 2,在 RTDS 实时仿真系统上进行比较和验证试验。仿真系统模型分别为 220 kV/30 km,220 kV/120 km 和 500 kV/240 km 的同杆双回线路,本文以 500 kV 系统为例给出其试验系统模型如图 6 所示。M 侧和 N 侧分别为等效发电机(装机容量为 2 100 MW)和等值系统(短路容量为 4 500 MVA);保护安装在 I 线,分别在线路两侧和中点设置故障点。K₃ 为线路中点,其他各点分设在线路两侧背后和出口处。

线路参数为: $Z_{1L} = (0.032\ 3 + j0.283)\ \Omega/\text{km}$, $Z_{0L} = (0.280\ 5 + j0.912)\ \Omega/\text{km}$, $Z_{0M} = (0.045 + j0.183\ 7)\ \Omega/\text{km}$ 。电流互感器采用 1 A 规格,变比分别为 M 侧 2 500,N 侧 1 250。

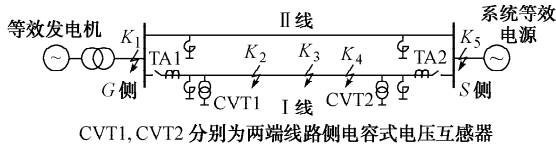


图 6 仿真系统模型
Fig. 6 Simulated system model

试验项目包括区外各种故障、区内单回线简单故障和双回线跨线故障。仿真试验显示在双回线单线故障时 2 种选相方法均能正确选相,而在跨线故障时综合选相方法具有更好的选相性能,能够满足单回线简单故障和双回线跨线故障的选相要求。

5 结语

尽管同杆双回线跨线故障种类繁多,但国内外双回线运行统计数据表明,单回线故障占绝大多数,因此,同杆双回线故障选相应确保单回线故障的选相性能。相电流差突变量选相元件在单回线简单故障和多数跨线故障中能正确选相,基于其选相结果,本文提出的同杆双回线综合选相方法能不影响单回线简单故障选相性能的前提下对双回线跨线故障也具有较理想的选相性能,满足主保护和后备保护的选相要求。

参考文献

- [1] 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):214-216.
XU Zhenyu, YANG Qixun, LIU Wanshun, et al. A sequence fault phase selector for transmission line protective relay. Proceedings of the CSEE, 1997, 17(3): 214-216.
- [2] 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 Qingqiang, SUONAN Jiale, SONG Guobing, 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.
- [3] 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.
ZHENG Tao, LIU Wanshun, YANG Qixun, 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.
- [4] 陈朝晖,黄少锋,陶惠良,等.新型阻抗选相方法.电力系统自动化,2005,29(3):51-56.
CHEN Zhaohui, HUANG Shaofeng, TAO Huiliang, et al. Research on the new phase selector based on impedance measurement. Automation of Electric Power Systems, 2005, 29(3): 51-56.
- [5] 索南加乐,葛耀中,陶惠良,等.同杆双回线的六序选相原理.中国电机工程学报,1991,11(6):1-9.

- SUONAN Jiale, GE Yaozhong, TAO Huiliang, et al. Phase selection of six-phase transmission system in double circuit lines. Proceedings of the CSEE, 1991, 11(6): 1-9.
- [6] 俞波,杨奇逊,李营,等.同杆并架双回线保护选相元件研究.中国电机工程学报,2003,23(4):38-42.
YU Bo, YANG Qixun, LI Ying, et al. Research on fault phase selector of protective relay for double circuit lines on the same tower. Proceedings of the CSEE, 2003, 23(4): 38-42.
- [7] 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 Yaozhong. Theory and techniques of new type of protective relaying and fault location. Xi'an: Xi'an Jiaotong University Press, 1996.
- [8] 朱晓彤,郑玉平,张俊洪,等.同杆并架双回线跨线不接地故障的距离保护.电力系统自动化,2003,27(19):61-64.
ZHU Xiaotong, ZHENG Yuping, ZHANG Junhong, et al. Distance protection of double circuit line on the same pole when phase-to-phase fault occurs. Automation of Electric Power Systems, 2003, 27(19): 61-64.

刘千宽(1967—),男,博士研究生,研究方向为电力系统微机保护。E-mail: liuqiankuan@sina.com

黄少锋(1958—),男,教授,博士生导师,研究方向为电力系统微机保护。

王兴国(1981—),男,博士研究生,主要从事电力系统暂态保护的研究。

Phase Selector Based on Fault Component Current for Double-circuit Transmission Lines on Single Tower

LIU Qiankuan, HUANG Shaofeng, WANG Xingguo

(Key Laboratory of Power System Protection and Dynamic Security Monitoring and Control Under Ministry of Education, North China Electric Power University, Beijing 102206, China)

Abstract: Although fault component current phase selector has excellent performance for single transmission lines, it may select unwanted phase for cross-country faults in double-circuit lines on a same tower. By using the six-sequence fault component, this paper investigates the amplitude and phasor characteristics of fault component current for cross faults of double lines with their phasor comparison equations presented. Based on the results of fault component current phase selector, a kind of synthesis selection scheme, which takes impedance measurement and directional component as supplementary method, is put forward and its flow chart for phase selection is given. Dynamic simulation results by using RTDS show that the synthesis phase selection scheme based on the quantities of single lines at one terminal has better performance for simple faults and cross-country faults of double-circuit lines.

Key words: double-circuit transmission lines; phase selector; six-sequence fault component; cross-country fault

立足行业 鼓励创新 面向应用
促进电力工业科技进步