

DOI: 10.7667/PSPC171053

一种故障分量选相元件接地短路判据的修正

程志友^{1,2}, 李小静², 汤明金², 夏霜²

(1. 教育部电能质量工程研究中心, 安徽 合肥 230601; 2. 安徽大学电子信息工程学院, 安徽 合肥 230601)

摘要: 在详细分析故障分量选相原理的基础上, 对传统故障分量选相元件的接地短路故障判据进行了修正。修正后的判据仅利用负序故障分量电流相位和正序故障分量电流相位之间的相位差, 加入对零序电压分量的阈值判断来区分接地故障。克服了原判据由于零序电流分布因子与正、负序电流分布因子不相等而产生误判的缺点, 较好地解决了接地故障误判断问题, 同时简化了选相流程。仿真实验验证了该判据的正确性和稳定性。

关键词: 故障分量; 选相元件; 接地短路; 电流相位; 分布因子

A correction of ground short-circuit criterion of phase selection element based on faulty components

CHENG Zhiyou^{1,2}, LI Xiaojing², TANG Mingjin², XIA Shuang²

(1. Power Quality Engineering Research Center, Ministry of Education, Hefei 230601, China;

2. School of Electronics and Information Engineering, Anhui University, Hefei 230601, China)

Abstract: Based on the detailed analysis of fault component phase selection principle, the traditional ground short-circuit criterion of phase selection element based on faulty components is improved. The improved criterion only uses the phase difference between the negative sequence faulty components current phase and the positive sequence faulty components current phase and adds the threshold judgment of the zero sequence voltage component to distinguish the ground fault. It avoids the shortcomings of misjudgment since the zero sequence current distribution factor is not equal to its positive and negative ones in the traditional ground short-circuit criteria as well as simplifies the phase selection process. Simulation results show that the improved criterion is valid and stable.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 6172032).

Key words: faulty component; phase selection element; ground short-circuit; current phase; distribution factor

0 引言

故障选相作为继电保护中的一个主要环节, 对EHV/UHV电网的安全性和可靠性至关重要^[1]。在传统保护装置中, 选相元件主要作用于自动重合闸, 即单相接地短路时, 选出故障相来实现单相跳闸, 在两相和三相短路时实现三相跳闸。随着微机保护在电力系统中的应用, 选相元件不仅要选出单相接地的故障相, 而且在相间故障时, 还需要准确地判别出相间故障的相别^[2], 从而为继电保护^[3]提供必要的的数据支持。

长期以来, 国内外学者对故障选相问题进行了大量的理论和实验研究。文献[4]详细分析了相电流

差突变量选相的基本原理, 并对三相短路故障判据进行了改进, 解决了在三相短路故障时由于判据过于严格而造成的误判问题, 但改进后的三相短路判据阈值为经验值, 选相结果可信用度不高。Behnam Mahamedi 测量两端继电器各相的无功功率, 通过判断无功功率的正负实现故障选相^[5]。后又提出对无功功率各序分量的比值设置阈值以达到选相目的^[6], 但该方法需在故障发生1~2周期后才适用, 实时性不强。文献[7-9]提出基于暂态分量的选相方法, 通过小波变换提取暂态信号的能量, 以暂态信号为判据实现故障选相, 该方法实时性较强但易受外界干扰, 导致误选相^[10]。

故障分量选相^[11-13]具有可靠性高及耐过渡电阻能力强的优点, 是目前广泛采用的选相方法^[14]。本文在介绍故障分量选相的基础上, 指出由于零序电流分布因子与正、负序电流分布因子不相等而导致

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(6172032); 安徽省科技攻关项目(1604a0702016)

选相元件的接地短路判据可信度不高,可能造成接地短路故障误判断。修正后的判据避免了对零序故障分量数据的使用,而仅利用负序故障分量电流相位和正序故障分量电流相位之间的相位差,加入对零序电压分量的阈值判断来区分接地故障,较好地解决了接地故障的误判问题,为保护装置的正确动作提供了先决条件。

1 故障分量选相原理分析

1.1 基本原理

故障分量选相元件是通过将故障分量的相位进行比较,从而选出故障相^[15]。以A相为基准相进行说明, I_{A1} 、 I_{A2} 、 I_{A0} 分别表示A相在保护安装处的正序故障分量电流、负序故障分量电流及零序故障分量电流。故障点F处的故障电流正序分量为 $C_1 I_{F1}$, 负序分量为 $C_2 I_{F2}$, 其中 C_1 、 C_2 分别为正序和负序电流分布因子, 由于通常情况下 $C_1 = C_2$ ^[16], 故障点处的正序故障分量电流与负序电流的相位关系可认为与保护安装处一样。根据文献[2]中的分析可得到表1—表3中不同故障情况下 I_{A1} 、 I_{A2} 、 I_{A0} 之间的相位关系。

表1 两相相间短路电流相位差

故障相	BC	CA	AB
$\arg(I_{A2}/I_{A1})$	-180°	-60°	+60°

表2 两相相间接地短路电流相位差

故障相	BC-G	CA-G	AB-G
$\arg(I_{A2}/I_{A0})$	0°	-120°	+120°
$\arg(I_{A2}/I_{A1})$	-180°	-60°	+60°

表3 单相接地短路电流相位差

故障相	A-G	B-G	C-G
$\arg(I_{A2}/I_{A0})$	0°	-120°	+120°
$\arg(I_{A2}/I_{A1})$	0°	+120°	-120°

由以上表格分析可以得到关于电流故障分量 I_{A1} 、 I_{A2} 、 I_{A0} 的故障选相原理, 记:

$$\alpha = \arg(I_{A2}/I_{A0})、\beta = \arg(I_{A2}/I_{A1})$$

(1) 三相短路: 根据三相短路的特征式 $I_{A0} = 0$, $I_{A2} = 0$ 可以判断出三相短路故障。

(2) 两相相间短路: 根据两相相间短路的特征式 $I_{A0} = 0$, $I_{A2} > 0$ 可以判断出两相相间短路故障, 再通过 β 确定故障相。

(3) 单相接地和两相接地短路: 从表2、表3中

可以看出, 对于单相接地和两相接地短路来说, 对应的 α 值相同, 且相差 120°, 按照 α 的相位将 360° 的平面分成三个区域(见图1)。

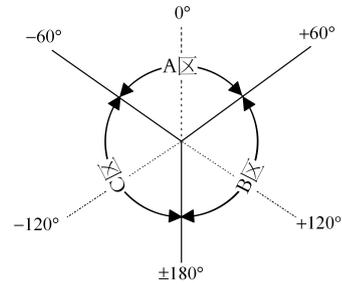


图1 根据 α 对接地故障的分区

Fig. 1 Partition of the ground fault based on α

A区的范围为(-60°, +60°), 包括A-G和BC-G; B区的范围为(+60°, +180°), 包括C-G和AB-G; C区的范围为(-180°, -60°), 包括B-G和CA-G;

上述每个区域中均包括某单相接地故障和另外两相相间接地故障, 区分这两种故障可利用表2、表3中的 β 值。综上所述, 对于单相接地短路和两相接地短路首先根据 α 的相位判断故障A区、B区、C区, 然后利用 β 的相位判断具体故障相。

1.2 接地短路判据分析

当线路中出现零序分量时即可判断发生接地故障, 理想情况下, 需要先根据负序故障分量和零序分量的电流相位差判断出故障所在区域, 然后再根据负序故障分量与正序分量的电流相位差确定故障所属相位。事实上, 由于零序电流分布因子与正序、负序不同, 当线路中发生接地故障时, 保护安装处负序故障分量电流与零序故障分量电流之间的相位关系并不一定与故障点处的相位关系相同, 即保护安装处的 α 值并不一定等于故障点处的 α 值, 从而可能出现选相误判的情况, 使得保护装置发生错误动作不能及时进行故障处理, 影响系统的正常运行。

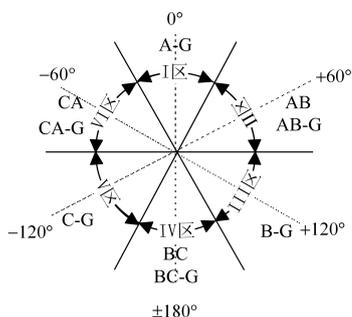
2 接地短路判据修正

由于零序电流分布因子与正、负序并不相等, 可将零序故障分量忽略而仅利用正序故障分量与负序故障分量的相位关系进行故障选相。结合表1—表3, 可得到如表4。

从表4中可以看出, 单相接地短路和两相相间短路的 β 值不同, 且相差间隔为 60°, 可以通过计算 β 值来区分出故障类型及判断故障相。根据表4按照 β 值进一步将 360° 的平面分成六个区域, 区域间隔为 60°(见图2)。

表 4 不同故障类型对应的 β Table 4 β of different fault types

相位关系	单相接地短路			两相相间短路			两相接地短路		
	A-G	B-G	C-G	AB	BC	CA	AB-G	BC-G	CA-G
$\beta = \arg(I_{A2} / I_{A1})$	0°	$+120^\circ$	-120°	$+60^\circ$	-180°	-60°	$+60^\circ$	-180°	-60°

图 2 不同故障类型对应的 β 区域图Fig. 2 Corresponding area of β for different fault types

I 区的范围为 $(-30^\circ, +30^\circ)$: A-G;

II 区的范围为 $(+30^\circ, +90^\circ)$: AB 或 AB-G;

III 区的范围为 $(+90^\circ, +150^\circ)$: B-G;

IV 区的范围为 $(+150^\circ, +210^\circ)$: BC 或 BC-G;

V 区的范围为 $(-150^\circ, -90^\circ)$: C-G;

VI 区的范围为 $(-90^\circ, -30^\circ)$: CA 或 CA-G。

I、III、V 区均为单相接地短路，而 II、IV、VI 区为重叠区域，区内包含两相相间短路和两相接地短路，区分二者最简便的方法是检查是否有零序分量存在，考虑到实际工程中在发生相间短路时由于电流互感器暂态过程的影响也可能出现零序电流，故可选用零序电压进行判别以提高选相的准确性。

图 3 为上述选相方法的综合选相流程图，其中 U_{A0} 为保护安装处的 A 相零序故障分量电压。首先计算 β 值，通过判断 β 所在的区域确定故障相，对于重叠区域则利用零序电压进行区分，若系统中存在零序电压即为相间接地短路，反之为两相相间短路，若 β 不落在平面中的任何区域则判断为三相故障。

3 实验验证

图 4 为 50 Hz、400 kV 的仿真系统，传输线路长度为 200 km，短路点位置为 50%，接地电阻为 100Ω ， δ_s 与 δ_r 分别设置为 20° 和 5° ，故障开始时间为 0.1 s，一个周期 20 ms 后达到稳定状态，其他参数见表 5。

图 5 为 A 相接地故障时测量的电流故障分量相位。从图中可以看出，电流的各分量相位相等，即 β 为 0° ，满足选相条件落在 I 区内，因此检测出 A 相接地故障。同样，在图 6 和图 7 中， β 的值分别

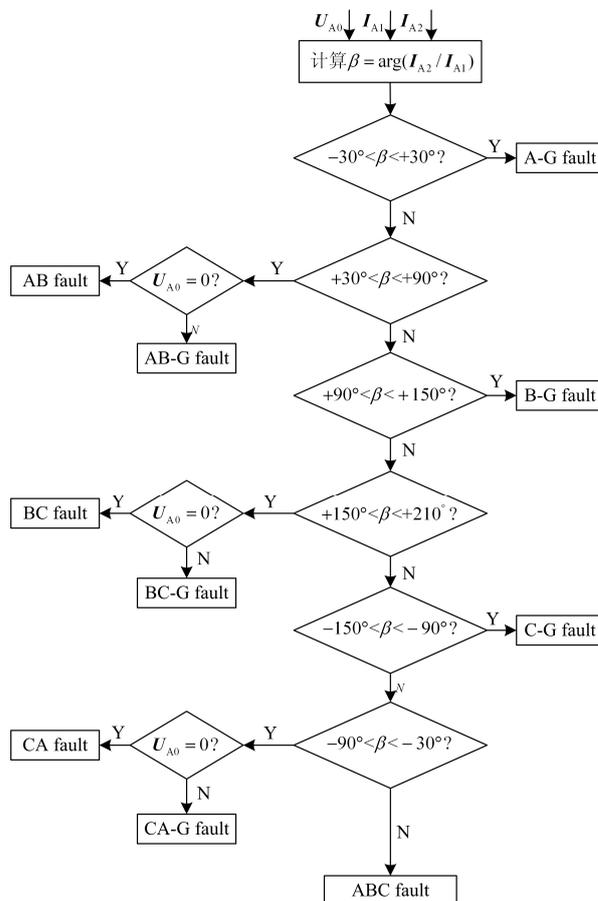


图 3 综合选相流程图

Fig. 3 Comprehensive fault phase selection procedure

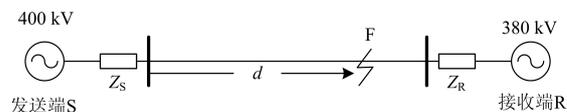


图 4 仿真系统

Fig. 4 Simulated system

为 $+120^\circ$ 和 -120° ，落在相应的 III 区、V 区，可检测出 B 相接地故障和 C 相接地故障。

表 5 仿真参数表

Table 5 Parameter table of simulation

电源参数	线路参数
$Z_{1S}=Z_{2S}=0.32+j6.5 \Omega$	$Z_{1L}=Z_{2L}=0.021+j0.27 \Omega/\text{km}$
$Z_{0S}=1.76+j9.28 \Omega$	$Z_{0L}=0.302+j0.905 \Omega/\text{km}$
$Z_{1R}=Z_{2R}=0.48+j8.8 \Omega$	$C_{1L}=13.170 \text{ Nf/km}$
$Z_{0R}=1.76+j11.68 \Omega$	$C_{0L}=8.396 \text{ Nf/km}$

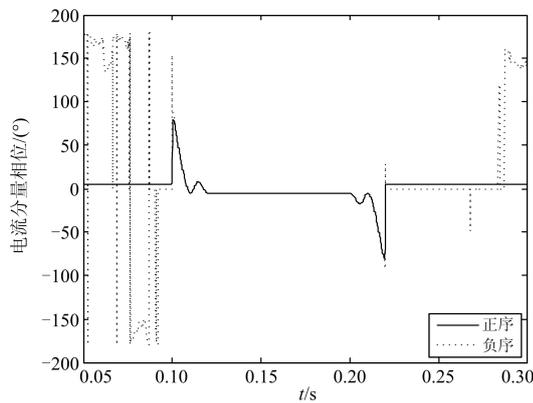


图 5 A 相接地故障时电流分量相位

Fig. 5 Phase of current components when phase A earth fault

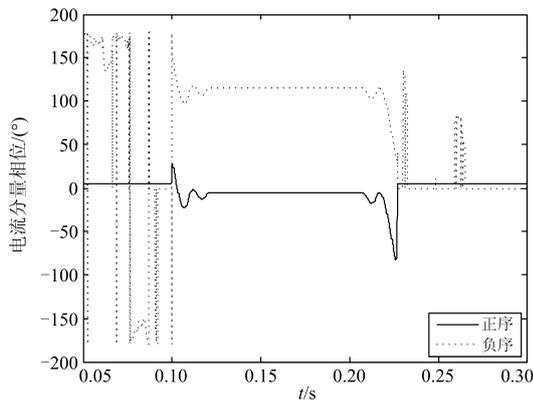


图 6 B 相接地故障时电流分量相位

Fig. 6 Phase of current components when phase B earth fault

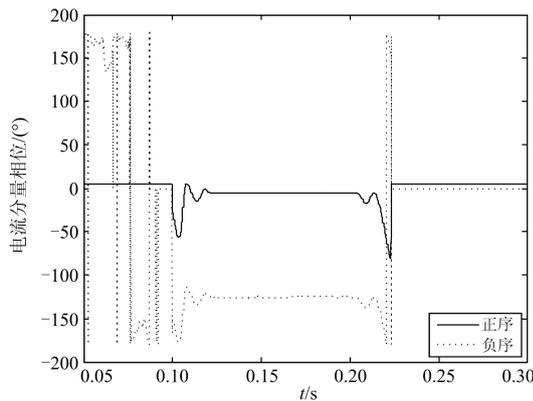


图 7 C 相接地故障时电流分量相位

Fig. 7 Phase of current components when phase C earth fault

图 8 为 AB 相间短路时测量的电流故障分量相位。如图所示，电流负序分量相位超前正序分量相位 60° ，即 β 为 $+60^\circ$ ，满足选相条件落在 II 区，又由于系统中无电压的零序分量存在，即 $U_{A0} = 0$ ，因此，可检测出 AB 相间短路故障。同理，在图 9 和图 10 中可以看出， β 分别为 $+180^\circ$ 、 -60° ，且同样无零序

电压分量，根据图 3 可检测出 BC 相间短路故障及 CA 相间短路故障。

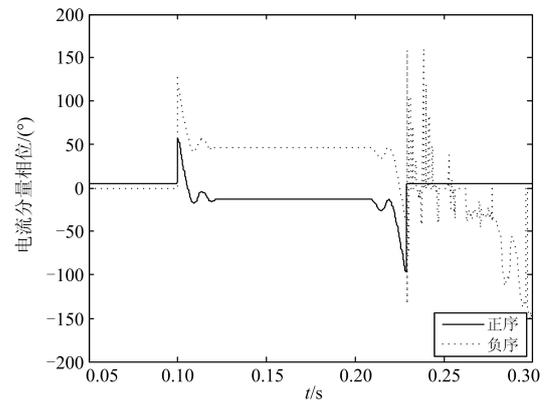


图 8 AB 相间短路故障时电流分量相位

Fig. 8 Phase of current components when phase A to phase B fault

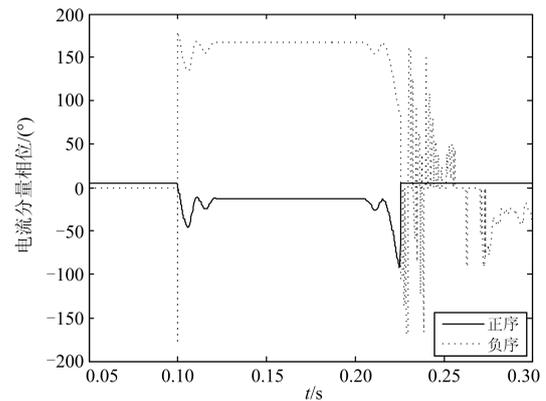


图 9 BC 相间短路故障时电流分量相位

Fig. 9 Phase of current components when phase B to phase C fault

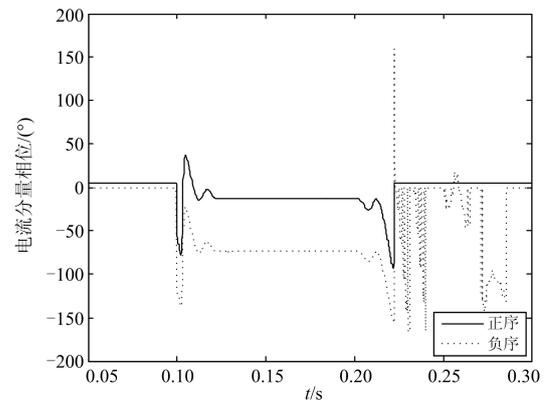


图 10 CA 相间短路故障时电流分量相位

Fig. 10 Phase of current components when phase C to phase A fault

图 11 为 AB 接地短路时测量的电流故障分量相位。如图所示, 电流负序分量相位超前正序故障分量电流相位 60° , 即 β 为 $+60^\circ$, 满足选相条件落在 II 区, 又由于系统中有电压零序分量存在, 即 $U_{A0} \neq 0$, 因此, 可检测出 AB 接地短路故障。同理,

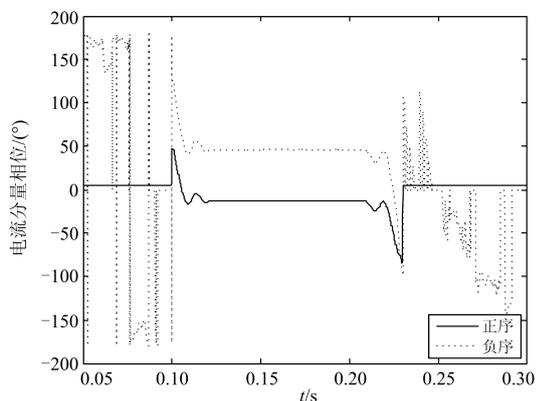


图 11 AB 接地短路故障时电流分量相位

Fig. 11 Phase of current components when phase A to phase B earth fault

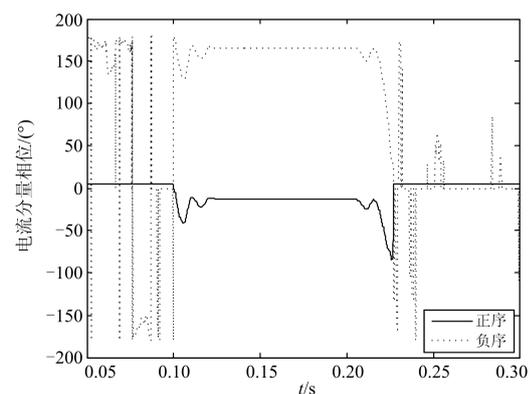


图 12 BC 接地短路故障时电流分量相位

Fig. 12 Phase of current components when phase B to phase C earth fault

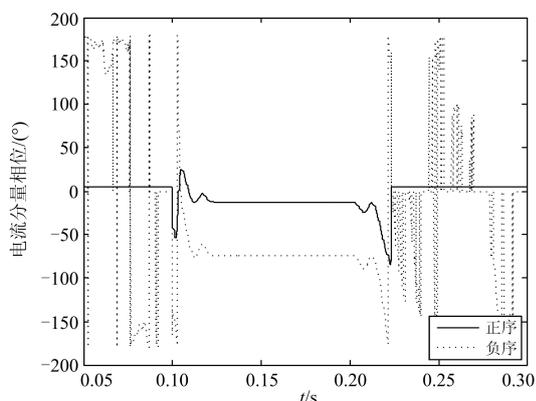


图 13 CA 接地短路故障时电流分量相位

Fig. 13 Phase of current components when phase C to phase A earth fault

在图 12 和图 13 中可以看出, β 分别为 $+180^\circ$ 、 -60° , 又 U_{A0} 不为 0, 因此可检测出 BC 接地短路故障及 CA 接地短路故障。

4 实验对比分析

通过实验发现, 本文方法与传统方法相比, 一般情况下均能有效地判断出故障相, 而当将 δ_S 与 δ_R 分别设置为 0° 和 10° , 接地电阻为 0Ω , 其余参数不变时, 发现传统方法虽然能根据 α 进行故障分区, 但在选出具体故障相位时失效。实验仿真波形如图 14 所示。

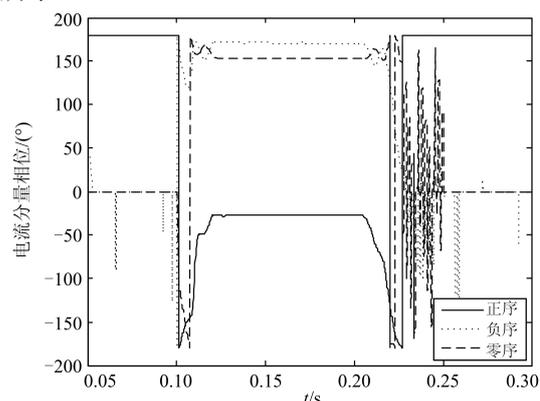


图 14 BC 接地短路故障时实验对比相位图

Fig. 14 Phase diagram of experimental contrast when phase B to phase C earth fault

从图 14 中可以看出, 当接地电阻为 0Ω 时, 保护安装处的电流负序分量相位与零序分量相位的相位差为 20° , 即 α 为 20° , 则根据图 1 中传统方法的分析可判断出故障区域为 A 区, 故障类型为 A-G 或 BC-G, 又由于电流负序分量相位超前正序分量相位 200° , 即 β 为 $+200^\circ$, 比较表 2、表 3 发现利用传统方法无法判断出具体故障相。而根据图 2 可以判断出故障为 BC 或 BC-G, 又由于零序电压分量 U_{A0} 不为 0, 则利用本文方法可以检测出发生的故障类型为 BC-G, 由此可以看出本文方法较传统方法而言更具稳定性。

5 结论

本文在介绍故障分量选相的基础上, 指出了由于零序电流分布因子与正、负序电流分布因子不相等可能造成接地故障的误判断。改进后的判据解决了接地故障可能存在的误判断问题, 同时简化了选相流程, 具有简单、灵敏的优点。仿真实验验证了该判据的正确性和稳定性。

参考文献

[1] 何谋超. 高压输电线路故障选相方法研究[D]. 杭州:

- 浙江大学, 2008.
- HE Mouchao. Study on the method of fault phase selection for UHV transmission line[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2008.
- [2] 葛耀中. 新型继电保护和故障测距的原理与技术[M]. 2版. 西安: 西安交通大学出版社, 2007.
- [3] IZYKOWSKI J, ROSOŁOWSKI E, SAHA M M. Post-fault analysis of operation of protective relays of power transmission lines[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2007, 22(1): 74-81.
- [4] 胡婷, 游大海, 金明亮. 一种电流突变量选相元件三相短路判据的探讨[J]. 电力自动化设备, 2006, 26(10): 107-109.
- HU Ting, YOU Dahai, JIN Mingliang. Discussion of three-phase short-circuit criterion of phase selection relay based on delta variable element of phase current differential[J]. Electric Power Automation Equipment, 2006, 26(10): 107-109.
- [5] MAHAMED B. A novel setting-free method for fault classification and faulty phase selection by using a pilot scheme[C] // 2011 2nd International Conference on Electric Power and Energy Conversion Systems (EPECS), November 15-17, 2011, Sharjah, United Arab Emirates: 1-6.
- [6] MAHAMED B, ZHU J G. Fault classification and fault phase selection based on the symmetrical components of reactive power for single-circuit transmission lines[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2013, 28(4): 2326-2332.
- [7] 陈亚, 李梦诗. 基于瞬时能量比的输电线路故障选相方案[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(1): 56-64.
- CHEN Ya, LI Mengshi. A faulted phase selection scheme for transmission lines based on instantaneous energy ratio[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(1): 56-64.
- [8] 张俊峰, 高亮, 沈奕菲, 等. 适用于双馈机组风电场的故障电压序分量选相元件[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(10): 136-143.
- ZHANG Junfeng, GAO Liang, SHEN Yifei, et al. Fault-sequence element of voltage phase selection applied to DFIG-based wind farm[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(10): 136-143.
- [9] 朱忆洋, 都洪基, 赵青春. 不对称参数同杆双回路选相方法研究[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(15): 133-139.
- ZHU Yiyang, DU Hongji, ZHAO Qingchun. Research on phase selection for double-circuit lines on the same tower with asymmetrical parameters[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(15): 133-139.
- [10] 肖文龙, 王维博, 刘勇, 等. 基于小波分析理论的特高压输电线路故障选相方案研究[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(17): 90-96.
- XIAO Wenlong, WANG Weibo, LIU Yong, et al. Research of fault phase selection on UHV transmission lines based on wavelet analysis[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(17): 90-96.
- [11] HUANG Shaofeng, LUO Lan, CAO Kai. A novel method of ground fault phase selection in week-infeed side[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2014, 29(5): 2215-2222.
- [12] XU Z Y, YAN X Q, RAN L, et al. Fault phase selection scheme of EHV/UHV transmission line protection for high-resistance faults[J]. IET Generation, Transmission & Distribution, 2012, 6(11): 1180-1187.
- [13] 刘凯, 索南加乐. 基于故障支路电流序分量相位关系的选相元件[J]. 电力自动化设备, 2013, 33(3): 77-83.
- LIU Kai, SUONAN Jiale. Phase selection element based on phase relationship between sequence components of faulty branch current[J]. Electric Power Automation Equipment, 2013, 33(3): 77-83.
- [14] 黄涛, 陆于平, 凌启程, 等. 适应于双馈风电场的改进故障序分量选相方法[J]. 电力自动化设备, 2016, 36(4): 123-128.
- HUANG Tao, LU Yuping, LING Qicheng, et al. Improved fault-sequence component phase selector applied to DFIG-based wind farm[J]. Electric Power Automation Equipment, 2016, 36(4): 123-128.
- [15] 朱声石. 高压电网继电保护原理与技术[M]. 3版. 北京: 中国电力出版社, 2005.
- [16] SAHA M M, IZYKOWSKI J, ROSOŁOWSKI E. Fault location on power networks (power systems)[M]. Germany: Springer Publishing Company, 2010.

收稿日期: 2017-07-15; 修回日期: 2017-08-13

作者简介:

程志友(1972—), 男, 博士, 教授, 主要研究方向为电能质量分析、检测和评估; E-mail: czy@ahu.edu.cn

李小静(1993—), 女, 通信作者, 硕士研究生, 研究方向为电能质量分析与控制。E-mail: lixiaojing0007@126.com

(编辑 葛艳娜)