

反应全类型故障的改进零序方向元件

申志成¹, 张慧媛¹, 龚仁敏², 周庆捷²

(1. 华北电力大学, 北京 102206; 2. 北京市中恒博瑞数字电力科技有限公司, 北京 100085)

摘要: 纵联零序方向保护已成功应用于特高压输电线路的继电保护中。零序方向元件作为纵联零序方向保护的核心器件, 其基本原理决定了其只能反应接地故障而不能反应相间故障和对称故障, 针对这一问题提出了改进方法。改进的零序方向元件是利用数据窗的延迟和三选二的逻辑配合来实现对相间故障和对称故障的正确判断。改进后的零序方向元件, 不仅能正确反应接地故障, 而且对于三相故障和相间故障也可以很好地反应。理论分析和大量仿真对改进的零序方向元件的工作正确性进行了验证, 证明了其可以在特高压输电电路上很好地应用, 满足特高压交流输电继电保护的要求。

关键词: 继电保护; 零序方向; 相间故障; 三相对称故障; 特高压输电线路

An improved zero-sequence directional component to response all kinds of fault

SHEN Zhicheng¹, ZHANG Huiyuan¹, GONG Renmin², ZHOU Qingjie²

(1. North China Electric Power University, Beijing 102206, China;

2. Beijing Joinbright Digital Power Technology Co., Ltd., Beijing 100085, China)

Abstract: Pilot zero-sequence directional protection has been applied successfully to the relay protection in UHV transmission line. The basic principle of zero-sequence directional element determines that it can only react to the grounding fault but can't react phase to phase fault and symmetrical fault, this paper takes out a way to solve this question. Zero-sequence directional element improvement is that using the data window delay and logic choice together to give the correct judgment of the phase to phase fault and symmetrical fault. The improved zero-sequence directional element not only can correctly reflect the grounding fault, but also can take a very good reaction for the three phase fault and phase to phase fault. And a lot of theoretical analysis and simulation on the improved zero-sequence direction element proved that it can work correctly and its application in UHV transmission lines is very good.

Key words: relay protection; zero-sequence directional protection; phase to phase fault; three phase symmetrical fault; UHV transmission line

中图分类号: TM77

文章编号: 1674-3415(2015)20-0102-05

0 引言

特高压交流输电一般是指1 000 kV及以上电压等级的交流输电, 其特点是输送容量大、距离远、损耗低、占地省等, 可见这是一种资源节约型和环境友好型的先进输电技术。与此同时, 我国的能源资源与能源消费呈逆向分布, 特别是西南的水电、三北的(西北、东北、华北北部)风电和太阳能的大规模开发, 都决定了需要实施以电力为重点的能源大范围调控。经过多年努力, 我国建成并投运了多条1 000 kV的输电线路, 其中包括晋东南到荆门的输电线路, 皖南到上海的输电线路等^[1]。

纵联零序方向保护的优点是原理简单、过渡电

阻耐受能力强、算法实现容易、灵敏度高以及不易受系统震荡和正常负荷变化等因素影响, 从而广泛配置在超高压线路保护中。在特高压输电线路的继电保护中, 其也发挥着重要的作用^[2-4]。但在实际应用中, 纵联零序方向保护存在着一些问题^[5-9]。对于可能出现的极端误动情况, 文献[3]提出了利用突变量启动信号强制出发串补电容火花间隙的保护改进方案, 消除了零序电流的畸变。针对总纵联零序方向保护零压不够而保护拒动的情况, 文献[4]提出了基于负序分量补偿的补充判据。在高阻接地故障的情况下零压不足的问题, 现行的零序方向保护都采用了各种补偿方法^[10-11]。

本文通过大量研究, 对于零序方向元件不能反

应相间故障和对称故障的问题提出了改进方案。改进后的零序方向元件可以适用于特高压输电线路, 来反应全类型故障。文中介绍了改进方法并对改进后的零序方向元件进行了理论分析和仿真验证。

1 零序方向元件保护判据

零序方向元件作为零序方向纵联保护的核心元件, 理论上, 理想情况裕度角为 90° ^[12]。因此其正向动作区为

$$90^\circ + \varphi_0 \leq \arg \frac{\dot{U}_0}{\dot{I}_0} < 270^\circ + \varphi_0 \quad (1)$$

其中, φ_0 为零序阻抗角。

反向动作区为

$$-90^\circ + \varphi_0 \leq \arg \frac{\dot{U}_0}{\dot{I}_0} < 90^\circ + \varphi_0 \quad (2)$$

但是, 在实际应用中需要根据实际情况对最大灵敏角进行调整^[13]。

2 改进方法

零序方向元件能够可靠地反应接地故障, 对于两相相间故障, 由于没有零序电流通路而不存在零序分量, 三相对称故障时不存在不对称分量。因此, 零序方向元件对这两种故障不能正确地反应。如果要使得零序方向元件能够反应相间短路, 则需要提供一个零序通路; 如果要使得零序方向元件能够反应三相对称故障, 则需要使故障后三相数据不对称且存在零序通路。经研究发现, 当采用单相数据窗延迟时, 该相与其他任一相发生相间短路时, 可以人为地创造一个零序分量。假设 A 相数据进行延迟, 延迟时间 t 为周期的整数倍, 本文取 $t=0.04$ s。发生 AB 两相短路时, 由于 A 相数据延迟, 则 $\dot{I}_{fa}=0$, $\dot{I}_{fb}=0$, $\dot{U}_{fb}=0$, 相当于发生了 B 相的单相接地, 此时边界条件为^[14]

$$\dot{I}_{fb1} = \dot{I}_{fb2} = \dot{I}_{fb0} \quad (3)$$

$$\dot{U}_{fb1} + \dot{U}_{fb2} + \dot{U}_{fb0} = 0 \quad (4)$$

此时, 显然存在零序分量, $\dot{I}_{fb0} = \frac{1}{3}\dot{I}_{fb}$, 其中,

$$\dot{I}_{fb} = \frac{\dot{U}_B - \dot{U}_A}{Z_{\sum AB} \angle \varphi} \approx \frac{\sqrt{3}\dot{U}_B}{Z_{\sum AB} \angle \varphi + 30^\circ}$$

则此时需要对原正向动作区进行补偿。由于特高压输电线路的阻抗角接近 90° , 零序方向元件补偿后的正向动作区大约为

$$210^\circ \leq \arg \frac{\dot{U}_0}{\dot{I}_0} < 390^\circ \quad (5)$$

同理可得, 当 B 相数据延迟时, 发生 AB 两相短路, $\dot{I}_{fa0} = \frac{1}{3}\dot{I}_{fa}$, 其中, $\dot{I}_{fb} = \frac{\dot{U}_A - \dot{U}_B}{Z_{\sum AB} \angle \varphi} \approx$

$\frac{\sqrt{3}\dot{U}_A}{Z_{\sum AB} \angle \varphi - 30^\circ}$ 其补偿后的正向动作区大约为

$$150^\circ \leq \arg \frac{\dot{U}_0}{\dot{I}_0} < 330^\circ \quad (6)$$

但是, 当发生 BC 两相相间短路时, 与数据窗不延迟基本相同, 不存在零序分量。且当 A 相发生单相接地时, 需要经过延时时长后才能正确反应, 影响速动性。由此可见, 该方法不完善。

因此, 可以将三相数据都进行延迟为 A'、B'、C', 分别利用 [A',B,C]、[A,B',C]、[A,B,C'] 求取三组零序分量判据。再利用三取二原则, 对三个动作信号取两个相同信号作为输出信号, 以此来实现零序方向元件对相间故障和三相短路故障的正确反应。由于高频分量会对零序电流电压相位产生影响, 故在数据采集后对电流电压进行低通滤波, 去除高频分量, 之后再采用傅立叶算法提取零序电流与零序电压。逻辑图如图 1。

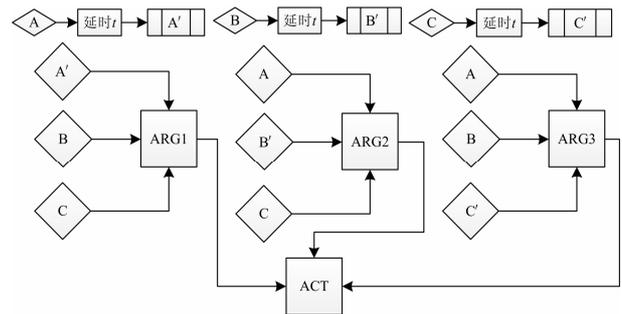


图 1 逻辑图

Fig. 1 Logic diagram

3 理论分析

令利用 [A',B,C] 所得零序分量 $\text{Arg} \frac{\dot{U}_0}{\dot{I}_0}$ 为 ARG1, 利用 [A,B',C] 所得零序分量 $\text{Arg} \frac{\dot{U}_0}{\dot{I}_0}$ 为 ARG2, 利用 [A,B,C'] 所得零序分量 $\text{Arg} \frac{\dot{U}_0}{\dot{I}_0}$ 为 ARG3。

3.1 单相接地故障

当发生 A 相接地故障时, 由于 A 相数据延迟, 故障发生 40 ms 内 ARG1 与正常运行时相比基本不变, 故障发生 40 ms 后, ARG1 进入正向动作区。

ARG2 与 ARG3 由于基本不受数据延迟的影响,故在故障发生后就能迅速进入正向动作区。此时,由于三个信号中有两个给出正向动作,则判断为正向动作。

可以类推 B 相接地与 C 相接地的情况。可见,发生单相接地故障时,改进后的零序方向元件依旧可以正确反应。

3.2 相间短路

当发生 AB 两相短路时,由之前分析可知 ARG1、ARG2 可以进入补偿后的正向动作区而 ARG3 由于基本不受数据延迟影响而不存在零序分量。

以此可以类推任意相间短路的情况。由此可见,发生两相短路后,三个信号中有两个可以给出正向动作,改进方向元件可以较为正确地反应故障。

3.3 两相接地短路

当发生 AB 两相接地故障时,可以视为同时发生了 A 相的单相接地和 B 相的单相接地,由于数据延迟,所以,ARG1 与 ARG2 相当于发生了单相接地时的值,显然此时 ARG1 与 ARG2 进入正向动作区。ARG3 延迟相为 C 相,故其值为发生两相短路接地时值,可见可以进入正向动作区。

同理可知,任意两相接地故障时,三个判据值均能进入正向动作区。因此,改进后的零序方向元件依旧可以正确反应两相接地故障。

3.4 三相对称短路

当发生三相对称故障时,由于数据延迟,则三个判据值都与两相接地故障相同,显然可以正确动作。

由此可见,改进后的零序方向元件可以反应各种故障,包括接地故障、相间故障和三相对称故障。

4 仿真验证

4.1 仿真模型

本文采用 PSCAD/EMTDC 进行仿真模拟,搭建特高压交流输电线路模型,如图 2 所示。K1 为区内故障点, K2 为区外故障点。

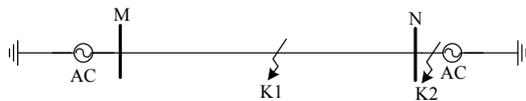


图 2 特高压输电线路模型
Fig. 2 UHV transmission line model

线路参数如下。

M 侧电源: $E_m=1\ 178\ \text{kV}$, $R_m=0.053\ 14\ \Omega$, $X_m=28.980\ 3\ \Omega$ 。

N 侧电源: $E_n=1\ 236\ \text{kV}$, $R_n=0.010\ 628\ 4\ \Omega$,

$X_n=5.796\ \Omega$ 。

线路: 总长度为 $600\ \text{km}$, $R_l=0.106\ 283\ 682\ \Omega$, $X_l=57.960\ 624\ 2\ \Omega$, $B_l=0.003\ 578\ 8\ \Omega$ 。

负荷等值阻抗: $225.0452+j32.0672$ 。

4.2 仿真结果与分析

经过大量仿真发现,由于线路为均匀分布,零序方向元件基本不受故障位置影响;过渡电阻的影响会影响零序阻抗角。考虑过渡电阻与负荷的影响,最大灵敏角按系统阻抗角的一半进行整定^[7]。则接地故障时取正向动作区为

$$90^\circ + \frac{\varphi_0}{2} \leq \arg \frac{\dot{U}_0}{\dot{I}_0} < 270^\circ + \frac{\varphi_0}{2} \quad (7)$$

相间故障时,补偿后的正向动作区为

$$90^\circ + \frac{\varphi_0 \pm 30^\circ}{2} \leq \arg \frac{\dot{U}_0}{\dot{I}_0} < 270^\circ + \frac{\varphi_0 \pm 30^\circ}{2} \quad (8)$$

则取三个正向动作区的交集,得到整定后的正向动作区

$$90^\circ + \frac{\varphi_0 + 30^\circ}{2} \leq \arg \frac{\dot{U}_0}{\dot{I}_0} < 270^\circ + \frac{\varphi_0 - 30^\circ}{2} \quad (9)$$

由于在特高压输电线路中, φ_0 接近 90° , 则可取 $(150^\circ, 300^\circ)$ 为正向动作区。相当于取裕度角为 75° , 则反向动作区为 $(-30^\circ, 120^\circ)$ 。

以下仿真结果皆为 M 侧的结果, N 侧结果与 M 侧基本一致, 故不赘述。由图 3 可知, 当发生保护内部单相接地故障时, A 相为故障相, ARG1 不能

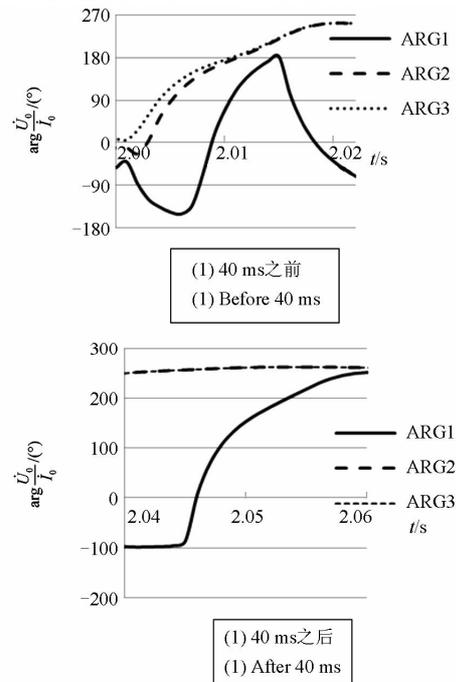


图 3 内部 A 相接地

Fig. 3 Internal A phase to ground fault

正确进入正向动作区, ARG2 与 ARG3 在 7 ms 进入正常动作区, 最后稳定在约 260° 。在 40 ms 之后 ARG1 进入正向工作区, 并稳定在大约 -100° 。仿真结果与理论分析基本一致, 可见, 该方法在单相接地故障时依旧可以正常工作, 其速动性良好, 满足特高压输电线路继电保护的要求。

当发生保护内部相间故障时, 故障相为 AB 相, 如图 4 所示, 在 8 ms 左右, ARG1 与 ARG2 都进入了正向工作区, 最后分别稳定在 260 与 -100 附近; ARG3 采用的是 C 相的延迟数据, 始终没有进入正向工作区。三取二之后, 零序方向元件给出正向动作信号, 由此可见, 改进后的零序方向元件可以实现对相间故障的正确反应。

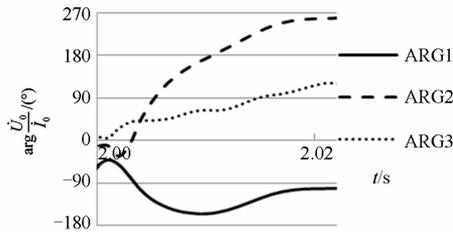


图 4 内部 AB 两相短路

Fig. 4 Internal AB phase to phase fault

当发生保护内部两相接地故障时, 故障相为 AB 相, 在 5 ms 左右, ARG1 与 ARG3 都进入了正向工作区; 在 8 ms 左右, ARG2 也进入了正向动作区。由此可见, 在 5 ms 之后, 零序方向元件就能根据三取二原则给出正向动作信号。如图 5 所示。

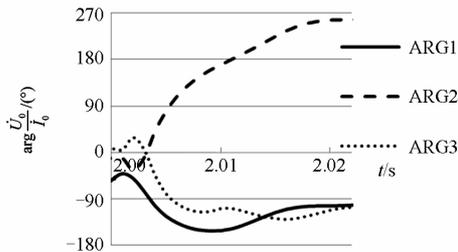


图 5 内部 AB 两相接地故障

Fig. 5 Internal AB phase to ground fault

当发生保护内部三相对称故障时, 三个判据所采用的信号全部不对称, 由图 6 可知, ARG1、

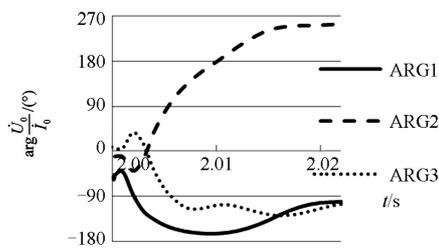


图 6 三相对称短路

Fig. 6 Three phase symmetrical fault

ARG2、ARG3 都进入了正向动作区, 改进后的零序方向元件可以正确地给出动作信号。

5 结论

改进的零序方向元件利用微机保护的存储功能和逻辑判断功能, 实现了在相间短路和三相对称短路时人为地制造零序分量。本文得到以下结论:

1) 经过理论分析, 可知改进后的零序方向元件可以正确反应相间短路和三相对称短路, 且给出了相间短路时正向工作区的补偿方法;

2) 经过大量的仿真, 可知改进后的零序方向元件依旧受过渡电阻的影响, 通过分析给出了合适整定方法;

3) 仿真结果表明, 改进的负序方向元件在 5~8 ms 的时间就能给出正确的动作信号。

理论分析和仿真结果都论证了改进方法的可行性, 改进的零序方向元件可以对所有类型的故障给出正确反应。

参考文献

- [1] 刘振亚. 中国特高压交流输电技术创新[J]. 电网技术, 2013, 37(3): 1-8.
LIU Zhenya. Innovation of UHVAC transmission technology in China[J]. Power System Technology, 2013, 37(3): 1-8.
- [2] 贺家李, 李永丽, 李斌, 等. 特高压输电线路继电保护配置方案(二)[J]. 电力系统自动化, 2002, 26(24): 1-6.
HE Jiali, LI Yongli, LI Bin, et al. Relay protection of UHV transmission lines configuration (two)[J]. Automation of Electric Power Systems, 2002, 26(24): 1-6.
- [3] 闫晓卿, 徐振宇, 杨奇迹. 1000 kV 特高压输电线路零序保护改进方案[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(28): 122-128.
YAN Xiaoqing, XU Zhenyu, YANG Qixun. An improved scheme of zero-sequence relay for 1000 kV UHV transmission lines[J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(28): 122-128.
- [4] 张弛, 李一泉, 曾耿晖. 基于负序分量补偿的纵联零序方向保护判据与仿真分析[J]. 电力系统保护与控制, 2008, 36(21): 18-23, 76.
ZHANG Chi, LI Yiquan, ZENG Genghui. Principle investigation and simulation research on pilot zero sequence directional protection with compensation of negative sequence component[J]. Power System Protection and Control, 2008, 36(21): 18-23, 76.
- [5] 吴麟琳, 黄少峰. 零序互感对相邻线路纵联零序方向

- 保护的影响[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(3): 24-28.
- WU Linlin, HUANG Shaofeng. Effects of zero-sequence mutual inductance on zero-sequence pilot protection of parallel lines[J]. Power System Protection and Control, 2011, 39(3): 24-28.
- [6] 阿里木江·卡尔德, 索南加乐, 伊力亚尔·艾尔肯, 等. 基于零序电流的超高压自耦变压器相位比较纵联保护的研究[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(16): 59-65.
- ALIMJAN Kader, SUONAN Jiale, YILYAR Arken, et al. A novel phase comparison pilot protection scheme based on zero-sequence current of UHV auto-transformer[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(16): 59-65.
- [7] 李爽, 王志新, 吴杰. 采用基频零序分量注入的 MMC 换流器故障容错控制研究[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(17): 1-7.
- LI Shuang, WANG Zhixin, WU Jie. Study on fault-tolerant operation control strategy of modular multilevel converters injected with fundamental-frequency zero-sequence voltage component[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(17): 1-7.
- [8] 陈曦, 傅锦发, 樊征臻, 等. 线路非全相运行及其再故障零序方向保护的動作特征分析[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(6): 82-88.
- CHEN Xi, FU Jinfu, FAN Zhengzhen, et al. Action features analysis on zero-sequence directional protection of line open phase running and sound phase grounding[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(6): 82-88.
- [9] 阿里木江·卡尔德, 索南加乐, 阿米那古丽·艾尼, 等. 基于超高压自耦变压器中性点零序电流的方向比较纵联保护的研究[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(22): 24-31.
- ALIMJAN Kader, SUONAN Jiale, AMINGUL Aini, et al. A novel scheme for UHV auto-transformer protection based on zero-sequence current longitudinal comparison principle[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(22): 24-31.
- [10] 索南加乐, 孟祥来, 陈勇, 等. 基于故障类型的零序方向元件[J]. 中国电机工程学报, 2007, 27(1): 25-30.
- SUONAN Jiale, MENG Xianglai, CHEN Yong, et al. A novel zero-sequence directional element based on fault type[J]. Proceedings of the CSEE, 2007, 27(1): 25-30.
- [11] 徐振宇, 杜兆强, 孟岩, 等. 零负序方向元件的特殊问题研究[J]. 电力自动化设备, 2008, 28(5): 21-25.
- XU Zhenyu, DU Zhaoqiang, MENG Yan, et al. Special problems in zero negative sequence directional element [J]. Electric Power Automation Equipment, 2008, 28(5): 21-25.
- [12] 贺家李, 李永丽, 董新洲, 等. 电力系统继电保护原理[M]. 北京: 中国电力出版社, 2010.
- [13] 丁小兵, 赵曼勇, 徐振宇. 接地故障零序方向元件拒动保护改进方案[J]. 电力系统自动化, 2006, 30(8): 25-27.
- DING Xiaobing, ZHAO Manyong, XU Zhenyu. Improvement on zero sequence current protection when directional element fails[J]. Automation of Electric Power Systems, 2006, 30(8): 25-27.
- [14] 李光琦. 电力系统暂态分析[M]. 北京: 中国电力出版社, 2007.

收稿日期: 2015-01-07; 修回日期: 2015-04-14

作者简介:

申志成(1989-), 男, 通信作者, 硕士研究生, 研究方向为电力系统继电保护; E-mail: 18611228967@163.com

张慧媛(1963-), 女, 副教授, 研究方向为电网络在电力系统中的应用与继电保护。

(编辑 葛艳娜)