

一起线路复故障变化量方向保护动作行为分析

李正红, 陈朝晖

(中国南方电网电力调度通信中心, 广东 广州 510623)

摘要:通过分析某 220 kV 输电线路单相断线接地复故障时线路纵联方向保护的动作为, 发现了变化量方向元件在本次故障时判为反方向而拒绝动作的情况。采用双口网络理论推导了变化量方向元件在线路发生单相断线接地复故障时的计算公式。分析结果表明: 当双端系统通过单回线路连接时, 线路两侧变化量方向保护均能正确动作; 当双端系统存在环并等值线路时, 变化量方向元件因环并等值线路参数的不同可能出现判为反方向故障的情况。最后, 通过 PSCAD 仿真分析, 进一步验证了变化量方向元件在环并系统线路发生故障时可能拒绝动作的原理性缺陷。

关键词: 单相断线接地故障; 复故障; 方向元件; 线路保护; 仿真分析; 双端口网络

Behavior analysis of direction-protection based on power-frequency variation with complex fault on transmission line

LI Zheng-hong, CHEN Zhao-hui

(CSG Power Dispatching & Communication Center, Guangzhou 510623, China)

Abstract: By analyzing the behavior of a 220 kV transmission line's pilot direction-protection, it was found that directional element based on variation of power-frequency rejected action when single-phase line-broken earth fault happened on the line. Based on the two-port network theory, the formula of directional element is deduced in case of such fault. The results show that when the system M and N are connected by a single transmission line, the variation directional protection can properly act when such fault happens on the line; when the system M and N are connected by electrical ring, the directional element may be judged as reverse direction fault owing to the different circuit parameters. Finally, the results of PSCAD simulation further validate the principle defect that the directional element may reject action when such fault happens in electrical ring system.

Key words: single-phase line-broken earth fault; complex fault; directional element; transmission line protection; simulation analysis; two-port network

中图分类号: TM77 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2014)06-0129-07

0 引言

纵联方向保护作为高压线路的一种主保护, 在电力系统得到了广泛的应用。纵联方向保护的方向元件一般采用工频变化量方向元件^[1-4]、能量积分方向元件^[5-6]、距离方向元件^[7]及零序功率方向元件^[8]。变化量方向元件具有不受负荷状态、系统振荡、过渡电阻及电压死区的影响, 并能在非全相运行再发生短路的情况下正确判断故障方向等优点^[9-10], 因此在电力系统中得到了广泛的应用。长期的运行经验表明, 变化量方向元件在系统单一短路故障情况下一般能够正确动作。但是, 随着电网规模的不断扩大, 电网结构的日益复杂, 输电线路复故障情况(尤其是断线接地复故障)时有发生^[11-12], 分析变

化量方向元件在断线接地复故障情况下的动作为具有一定的现实意义。

本文结合某 220 kV 线路发生 C 相断线、单侧接地故障时非接地侧变化量方向元件判为反方向故障的实际案例, 根据故障时系统等值网络, 采用双口网络^[13-15]进行理论计算, 分析了变化量方向保护在环并系统断线接地复故障情况下的保护动作为, 并用 PSCAD 进行了仿真计算, 得出了与保护实际动作情况一致的分析结果。

1 故障简介

2012 年 11 月 16 日 23 时, 220 kV 马丘线在电厂出线端发生 C 相断线接地(丘海侧线路接地)复故障, 故障时系统运行方式如图 1 所示。马丘线

PSL601G 闭锁式纵联方向保护在本次故障中拒绝动作。

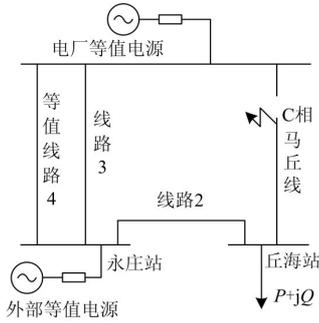


图 1 故障时系统运行方式
Fig. 1 Fault system operation mode

PSL601G纵联方向保护主要由基于暂态的变化量方向(能量积分方向)、基于稳态的零序方向和距离方向元件构成,采用反方向元件优先原则^[16]。变化量方向元件的原理是利用比较电压变化量 ΔU_m 和电流变化量 ΔI_m 的相位关系来判别故障方向。

a) 正方向短路时,设保护装置安装在MN线路的M端。其正方向短路时的短路附加状态如图2所示。加在保护装置的电压、电流按传统方向规定其正方向,可得到关系式为

$$\Delta U_m = -\Delta I_m \times Z_M \quad (1)$$

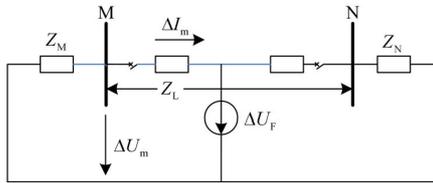


图 2 正方向短路时短路附加状态
Fig. 2 Additional state of positive direction short-circuit

Z_M 是保护背后电源的等值正序阻抗。式(1)说明正方向短路时保护安装处电压的变化量 ΔU_m 实际上是电流变化量 ΔI_m 在保护背后等值正序阻抗 Z_M 上的压降的负值。

b) 反方向短路时,短路附加状态如图3所示,可得到关系式为

$$\Delta U_m = \Delta I_m \times Z_R \quad (2)$$

Z_R 是保护安装处正方向的等值正序阻抗。式(2)说明反方向短路时保护安装处电压的变化量 ΔU_m 实际上是电流变化量 ΔI_m 在保护正方向等值阻抗 Z_R 上的压降。

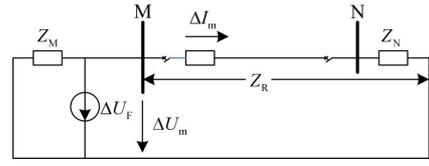


图 3 反方向短路时短路附加状态

Fig. 3 Additional state of negative direction short-circuit

PSL601G纵联方向保护采用相间回路的变化量方向元件,同时对变化量进行方向补偿,经过比相式与幅幅式等价转换,通过计算相间补偿电压变化量 $\Delta Z_{m\phi\phi}$ 、 $\Delta U_{p\phi\phi}$ 的大小判别故障方向:

$$\Delta Z_{m\phi\phi} = \left| \Delta U_{\phi\phi} - \Delta I_{\phi\phi} \times Z_{com} \right| \quad (3)$$

$$\Delta U_{p\phi\phi} = \left| \Delta U_{\phi\phi} + \Delta I_{\phi\phi} \times Z_{com} \right| \quad (4)$$

式中, Z_{com} 为补偿阻抗,一般取纵联距离阻抗定值的一半。当 $\Delta Z_{m\phi\phi} < \Delta U_{p\phi\phi}$ 时为反方向故障,反之为正方向故障。

220 kV 马丘线故障过程可分为两个阶段:第一阶段为C相单一断线故障;第二阶段为C相断线且单侧接地故障。电厂侧 PSL601 纵联方向保护录波数据如图4所示,由于断线过程缓慢发展,断线相(C相)电流缓慢减小,断线瞬间C相电流变化量小于变化量电流定值,变化量方向元件不启动,装置发闭锁信号。断线后约5.6s,丘海侧发生C相接地点短路,此时,电厂侧 PSL601 装置感受到短路零序电流,A、B相电流突然增大,零序电流呈现明显的区内故障特征,变化量方向元件启动。

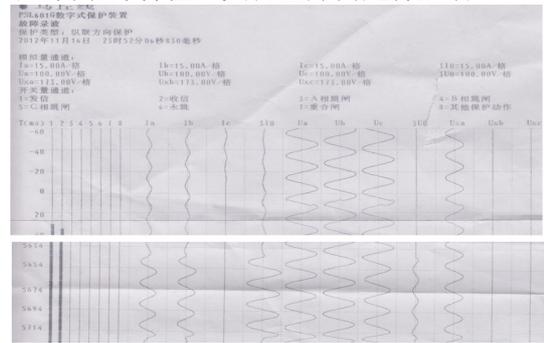


图 4 电厂侧 PSL601 装置故障录波图

Fig. 4 Fault recorder of PSL601 device in power plant

根据故障录波数据,电厂侧 BC 相间变化量方向元件计算结果如图5所示。

由图5可知,断线接地故障中BC相间变化量方向元件判为反方向,按照反方向元件优先的原则,电厂侧 PSL601G 纵联保护反方向元件动作,保护不停信,两侧纵联方向保护均不动作。CA 相间方向元件分析结果同 BC 相间变化量方向元件,亦判为

反方向故障。

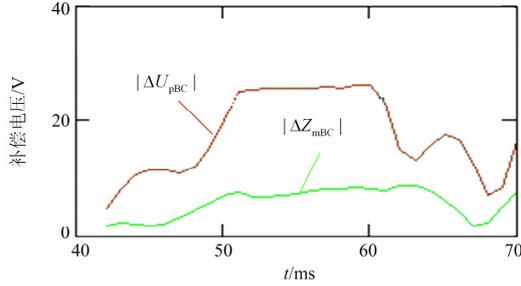


图 5 BC 相间变化量方向元件计算结果

Fig. 5 Result of BC directional element

正常情况下, 在线路区内故障时, 线路两侧变化量方向保护均应判为正方向故障。为什么电厂侧 (非接地侧) 变化量方向元件在此次故障时会判为反方向故障呢? 以下将用双口网络理论进行故障计算分析, 并利用 PSCAD 仿真做进一步验证。

2 双口网络复故障计算分析

为简化分析, 将图 1 系统进行等值, 如图 6 所示。等值系统 M 与系统 N 之间, 连接有等值线路 I 与故障线路 II, 线路 I、II 之间不存在互感。

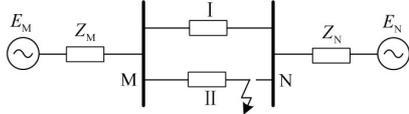


图 6 故障等值系统

Fig. 6 Equivalent fault system

假设线路 II 在靠近 N 侧出线处发生 A 相断线 M 侧接地故障, 用 C 型双口网络方程进行计算, 正序、负序、零序网络如图 7~图 9 所示。

用 C 型双口网络进行计算, 可以列出正序双口网络方程为

$$\begin{bmatrix} \dot{U}_{1F} \\ \dot{I}_{1II} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -C_{1FF} & C_{1FII} \\ C_{1IIF} & -C_{1IIII} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{I}_{1F} \\ \dot{U}_{1II} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \dot{E}_{F(c)} \\ \dot{I}_{II(c)} \end{bmatrix} \quad (5)$$

负序双口网络方程为

$$\begin{bmatrix} \dot{U}_{2F} \\ \dot{I}_{2II} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -C_{2FF} & C_{2FII} \\ C_{2IIF} & -C_{2IIII} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{I}_{2F} \\ \dot{U}_{2II} \end{bmatrix} \quad (6)$$

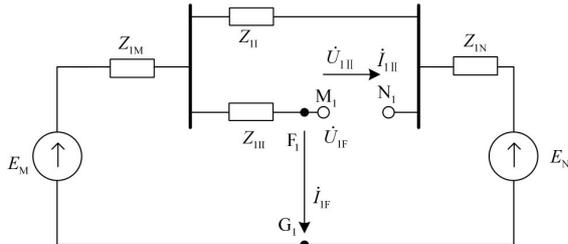


图 7 正序网络图

Fig. 7 Positive sequence network diagram

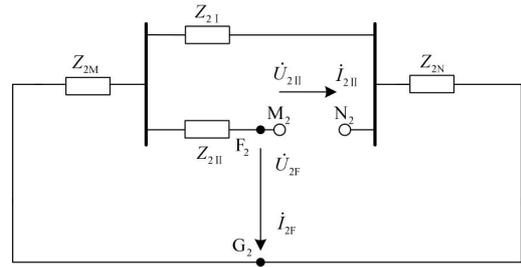


图 8 负序网络图

Fig. 8 Negative sequence network diagram

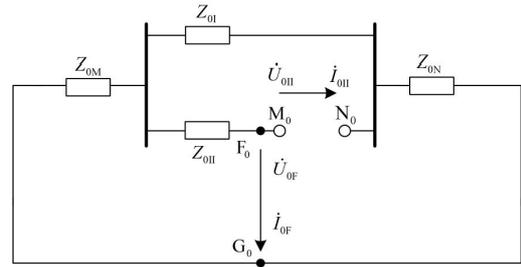


图 9 零序网络图

Fig. 9 Zero sequence network diagram

零序双口网络方程为

$$\begin{bmatrix} \dot{U}_{0F} \\ \dot{I}_{0II} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -C_{0FF} & C_{0FII} \\ C_{0IIF} & -C_{0IIII} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{I}_{0F} \\ \dot{U}_{0II} \end{bmatrix} \quad (7)$$

根据序网图可以确定 C 型双口网络的参数。以正序网络为例: 1) 令 \$\dot{U}_{1II} = 0\$、\$\dot{I}_{1F} = 1\$, 计算可得 \$C_{1FF}\$、\$C_{1IIF}\$; 2) 令 \$\dot{U}_{1II} = 1\$、\$\dot{I}_{1F} = 0\$, 计算可得 \$C_{1FII}\$、\$C_{1IIII}\$; 3) 再求 C 型有源双口网络的等效电源, 将 M、N 短路, F、G 开路, 这实际上是系统正常负荷状态, 假设故障前系统空载, 即 \$E_M = E_N\$、\$\dot{E}_{F(c)} = 1\$、\$\dot{I}_{II(c)} = 0\$。负序及零序的 C 型双口网络参数的求法相同, 此处不再赘述。

应用双口网络短路、断线边界条件, 复故障时故障处的电气量关系如式 (8)、式 (9) 所示。

$$\dot{U}_{1F} + \dot{U}_{2F} + \dot{U}_{0F} = 0 \quad \dot{I}_{1F} = \dot{I}_{2F} = \dot{I}_{0F} \quad (8)$$

$$\dot{I}_{1II} + \dot{I}_{2II} + \dot{I}_{0II} = 0 \quad \dot{U}_{1II} = \dot{U}_{2II} = \dot{U}_{0II} \quad (9)$$

根据式 (5)~式 (9), 可以计算出故障时故障点的各序电流、电压量, 进而可以求得线路 II 在 M、N 两侧保护安装处电流、电压故障前后的变化量, 以 AB 相间变化量方向元件为例, 断线线路 II 在 N 侧保护安装处的变化量关系为

$$\frac{\Delta I_{ABN}}{\Delta U_{ABN}} = \frac{\dot{I}_{2II}}{\dot{U}_{2F} - \dot{U}_{2II}} \quad (10)$$

断线线路 M 侧变化量关系为

$$\frac{\Delta U_{ABM}}{\Delta U_{ABN}} = \frac{3 \times (i_{1F} + i_{1II})}{(i_{1F} + i_{1II}) \times 3Z_{1II} + \dot{U}_{2F} - \dot{U}_{0F} - 1} \quad (11)$$

(1) 取 $Z_{1I} = \infty$ 、 $Z_{2I} = \infty$ 、 $Z_{0I} = \infty$ ，即断开等值线路 I，系统 M、N 通过单回线 II 相连，断线线路 N 侧变化量方向计算结果为

$$\frac{\Delta I_{ABN}}{\Delta U_{ABN}} = \frac{i_{2II}}{\dot{U}_{2F} - \dot{U}_{2II}} = -\frac{1}{Z_{1N}} \quad (12)$$

断线线路 M 侧变化量方向计算结果为

$$\frac{\Delta I_{ABM}}{\Delta U_{ABM}} = \frac{3 \times (i_{1F} + i_{1II})}{(i_{1F} + i_{1II}) \times 3Z_{1II} + \dot{U}_{2F} - \dot{U}_{0F} - 1} = -\frac{1}{Z_{1M}} \quad (13)$$

即系统 M、N 通过单回线相连时，在线路发生单相断线接地故障的情况下，线路两侧保护安装处电流、电压变化量相角差为保护安装处背后系统正序阻抗角。线路两侧变化量方向保护均判为正方向故障，能够正确动作。

(2) 取 $Z_{1I} = 0$ 、 $Z_{2I} = 0$ 、 $Z_{0I} = 0$ ，即系统 M、N 通过线路 I 强电气联系，在线路 II 发生断线接地故障时，断线线路 N 侧变化量方向计算结果为

$$\frac{\Delta I_{ABN}}{\Delta U_{ABN}} = \frac{i_{2II}}{\dot{U}_{2F} - \dot{U}_{2II}} = \frac{(Z_{0II} - Z_{1II}) \times (Z_{1N} + Z_{1M})}{Z_{1N} \times Z_{1M} \times (2Z_{0II} + Z_{1II})} \quad (14)$$

断线线路 M 侧变化量方向计算结果为

$$\frac{\Delta I_{ABM}}{\Delta U_{ABM}} = \frac{3 \times (i_{1F} + i_{1II})}{(i_{1F} + i_{1II}) \times 3Z_{1II} + \dot{U}_{2F} - \dot{U}_{0F} - 1} = \frac{3Z_{0II} \times (Z_{1N} + Z_{1M})}{Z_{1N} \times Z_{1M} \times (2Z_{0II} + Z_{1II})} \quad (15)$$

一般情况下，线路正序电抗小于零序电抗，即 $Z_{1II} < Z_{0II}$ 。式 (14)、式 (15) 说明当系统 M、N 之间强电气连接时，线路 II 发生单相断线接地故障，N 侧变化量电流滞后变化量电压 90° ，变化量方向元件判为反方向故障；M 侧变化量电流超前变化量电压 90° ，变化量方向元件判为正方向故障。

(3) 由以上推导可知，当系统 M、N 之间存在环并等值线路 I 时，必然存在等值线路参数 $0 < Z_{1I} = Z_{2I} < \infty$ 、 $0 < Z_{0I} < \infty$ ，使得线路 II 发生单相断线接地时，非接地侧 (N 侧) 变化量方向保护判为反方向故障。

进一步推导可知，对特定的系统，当环并线路 I 参数 Z_{1I} 、 Z_{0I} 满足式 (16) 时，N 侧变化量方向保护判为反方向故障。

$$(Z_{1I} + Z_{1M} + Z_{1N}) [Z_{0I} (Z_{0II} + Z_{0M}) + Z_{0II} (Z_{0M} + Z_{0N})] - (Z_{0I} + Z_{0M} + Z_{0N}) [Z_{1I} (Z_{1II} + Z_{1M}) + Z_{1II} (Z_{1M} + Z_{1N})] > 0 \quad (16)$$

取 220 kV 马丘线故障时电网等值参数如式

(17) 所示。

$$\begin{aligned} Z_{1M} = Z_{2M} = 0.69j \quad Z_{0M} = 0.33j \\ Z_{1N} = Z_{2N} = 0.26j \quad Z_{0N} = 0.18j \\ Z_{1I} = Z_{2I} = 0.15j \quad Z_{0I} = 0.94j \\ Z_{1II} = Z_{2II} = 0.3j \quad Z_{0II} = 0.9j \end{aligned} \quad (17)$$

N 侧保护变化量方向元件计算结果为

$$\frac{\Delta I_{ABN}}{\Delta U_{ABN}} = \frac{i_{2II}}{\dot{U}_{2F} - \dot{U}_{2II}} = -\frac{1}{0.62} j \quad (18)$$

M 侧保护变化量方向元件计算结果为

$$\frac{\Delta I_{ABM}}{\Delta U_{ABM}} = \frac{3 \times (i_{1F} + i_{1II})}{(i_{1F} + i_{1II}) \times 3Z_{1II} + \dot{U}_{2F} - \dot{U}_{0F} - 1} = \frac{1}{0.22} j \quad (19)$$

式 (18)、式 (19) 计算结果说明，由于环并等值线路 I 的存在，线路 II 发生单相断线接地故障时，M 侧保护变化量电流超前变化量电压 90° ，变化量方向元件判为正方向故障；N 侧保护变化量电流滞后变化量电压 90° ，变化量方向元件判为反方向故障，从而造成线路两侧方向保护不能正确动作。以上故障计算结果与保护实际动作情况一致。

3 PSCAD 仿真计算分析

对 220 kV 马丘线单相断线接地故障进行 PSCAD 仿真，建立仿真模型如图 10 所示。

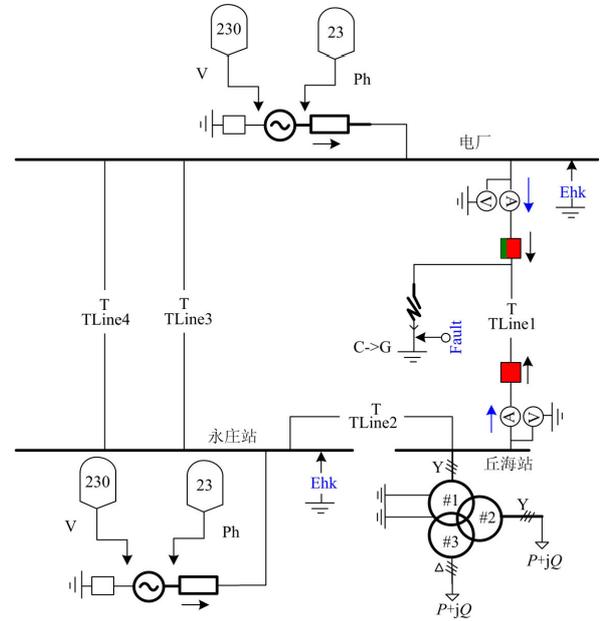


图 10 故障仿真模型

Fig. 10 Fault simulation model

仿真模型元件参数设置如表 1 所示。

220 kV 马丘线发生 C 相断线接地故障时，丘海

侧 CA 相间变化量方向元件仿真计算结果如图 11 所示。CA 相间补偿电压 $\Delta Z_{mCA} > \Delta U_{pCA}$ ，变化量方向元件判为正方向故障，与故障中保护实际判别结果一致。

表 1 仿真模型计算参数
Table 1 Simulation model parameters

元件名称	正(负)序阻抗	零序阻抗
电厂	0.26j	0.18j
永庄站	0.69j	0.33j
Tline1	0.26j	0.78j
Tline2	0.05j	0.15j
Tline3	0.23j	0.69j
Tline4	0.15j	0.94j

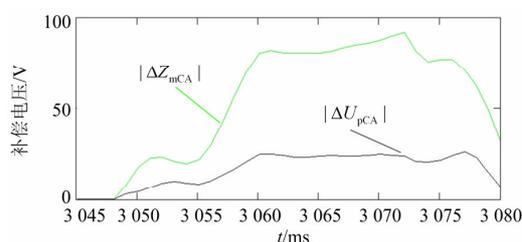


图 11 丘海侧 CA 相间变化量方向计算结果

Fig. 11 Result of CA directional element at Qiu Hai

故障时，电厂侧变化量方向元件计算结果如图 12 所示，CA 相间补偿电压 $\Delta Z_{mCA} < \Delta U_{pCA}$ ，变化量方向判为反方向故障，与故障中保护实际判别结果一致。

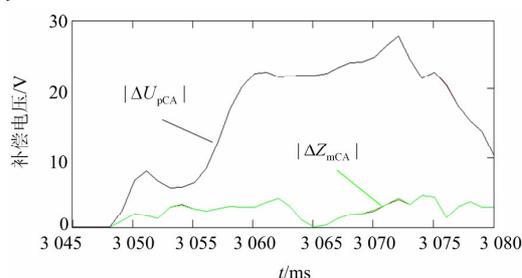


图 12 电厂侧 CA 变化量方向计算结果

Fig. 12 Result of CA directional element at power plant

线路两侧 BC 相间变化量方向元件计算结果与 CA 相间一致。

仿真计算结果进一步验证了 220 kV 马丘线发生 C 相断线接地故障时，接地侧变化量方向保护判为正方向故障，非接地侧变化量方向保护判为反方向故障的动作行为。

4 结论

通过 220 kV 马丘线单相断线接地故障分析，发

现非接地侧变化量方向元件在线路正方向故障时判为反方向，从而导致线路两侧纵联方向保护拒绝动作的现象。

利用双口网络理论，对线路单相断线单侧接地故障时变化量方向保护进行理论推导，得出：

(1) 当双端系统通过单回线路连接时，线路两侧变化量方向保护均判为正方向故障，可以正确动作。

(2) 当双端系统存在环并等值线路时，非接地侧变化量方向元件因环并等值线路参数的不同可能出现判为反方向故障的情况。

根据故障时电网的等值参数，用双口网络理论计算及 PSCAD 仿真分析进一步验证了由于环并等值线路的存在，导致本次故障时非接地侧变化量方向保护在正方向故障时判为反方向的原理性缺陷。

参考文献

- [1] 沈国荣. 工频变化量方向继电器原理的研究[J]. 电力系统自动化, 1983, 7(1): 28-38.
SHEN Guo-rong. A new directional relay based on the variation of power frequency components[J]. Automation of Electric Power Systems, 1983, 7(1): 28-38.
- [2] 裘涛涛, 陈水耀, 杨恢宏, 等. 交直流混联系统突变量方向元件适用性研究[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(13): 115-120.
QIU Yu-tao, CHEN Shui-yao, YANG Hui-hong, et al. Research on applicability of directional element based on the power frequency variation in AC-DC hybrid system[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(13): 115-120.
- [3] 林添顺. 自适应相补偿电压突变量方向元件动作特性的仿真分析[J]. 电力系统保护与控制, 2008, 36(22): 54-56.
LIN Tian-shun. Simulation and analysis of self-adaptive directional relay based on fault component of compensating voltage[J]. Power System Protection and Control, 2008, 36(22): 54-56.
- [4] 古斌, 谭建成. 基于瞬时功率理论的新型功率方向元件[J]. 电工技术学报, 2010, 25(2): 177-182.
GU Bin, TAN Jian-cheng. A study of novel power direction relay based on the instantaneous power theory[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2010, 25(2): 177-182.

- [5] 何奔腾, 金华烽, 李菊. 能量方向保护原理和特性研究[J]. 中国电机工程学报, 1997, 17(3): 166-170.
HE Ben-teng, JIN Hua-feng, LI Ju. Principle and property research of the energy directional protection[J]. Proceedings of the CSEE, 1997, 17(3): 166-170.
- [6] 袁荣湘, 陈德树, 张哲. 能量方向保护原理的分析[J]. 电力系统自动化, 1999, 23(14): 17-20.
YUAN Rong-xiang, CHEN De-shu, ZHANG Zhe. Analysis of the principle of energy directional protection[J]. Automation of Electric Power Systems, 1999, 23(14): 17-20.
- [7] 吴麟琳, 黄少锋. 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 Lin-lin, HUANG Shao-feng. 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.
- [8] 杨兰, 杨廷方, 曾祥君. 自适应接地距离继电器的研究[J]. 电工技术学报, 2010, 25(4): 77-81.
YANG Lan, YANG Ting-fang, ZENG Xiang-jun. Study of adaptive grounding distance relay[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2010, 25(4): 77-81.
- [9] 张保会, 尹项根. 电力系统继电保护[M]. 北京: 中国电力出版社, 2005: 139-141.
- [10] 国家电力调度通信中心. 国家电网公司继电保护培训教材[M]. 北京: 中国电力出版社, 2009: 298-305.
- [11] 李建清, 陈玉林, 敬海皮. 220 kV 输电线路复合型故障保护动作行为分析[J]. 四川水力发电, 2010, 29(2): 206-208.
LI Jian-qing, CHEN Yu-lin, JING Hai-pi. The protection operation analysis of complex fault on 220 kV transmission line[J]. Sichuan Water Power, 2010, 29(2): 206-208.
- [12] 王微. 一起系统复杂故障状态下保护动作分析[J]. 安徽电气工程职业技术学院学报, 2009, 14(3): 22-26.
WANG Wei. The analysis of protection operation in complex fault system[J]. Journal of Anhui Electrical Engineering Professional Technique College, 2009, 14(3): 22-26.
- [13] 朱声石. 高压电网继电保护原理与技术[M]. 北京: 电力工业出版社, 1987: 40-45.
- [14] 王乡, 陈永琳. 利用口网络理论计算电力系统复杂故障的计算机算法[J]. 继电器, 1994, 22(2): 11-14.
WANG Xiang, CHEN Yong-lin. A computer algorithm for computing the complex fault in power system with network theory[J]. Relay, 1994, 22(2): 11-14.
- [15] 田军, 陈乔夫, 张宇. 基于双端口网络控制的多绕组变压器型可调电抗器[J]. 电工技术学报, 2010, 25(2): 60-66.
TIAN Jun, CHEN Qiao-fu, ZHANG Yu. An adjustable reactor realized by multi-winding transformer based on the double port network control[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2010, 25(2): 60-66.
- [16] 国电南京自动化股份有限公司. PSL601(G)数字式线路保护装置技术说明书[S]. 2004: 1-2.
Guodian Nanjing Automation Co., Ltd. PSL601(G) digital line protection device specification[S]. 2004: 1-2.

收稿日期: 2013-06-15; 修回日期: 2013-10-03

作者简介:

李正红(1983-), 男, 硕士研究生, 工程师, 从事电力系统继电保护专业工作; E-mail: 15889623932@163.com

陈朝晖(1979-), 男, 博士研究生, 高级工程师, 从事电力系统继电保护专业工作。