

负荷电流对非故障相相间距离继电器的影响

李斌, 范瑞卿, 于绚, 贺家李

(电力系统仿真控制教育部重点实验室(天津大学), 天津市 南开区 300072)

Influence of Load Current on Healthy Phase-to-phase Distance Relay

LI Bin, FAN Ruiqing, YU Xuan, HE Jiali

(Key Laboratory of Power System Simulation and Control of Ministry of Education (Tianjin University),
Nankai District, Tianjin 300072, China)

ABSTRACT: The distance relay of transmission line may mal-operate due to the influence of fault transit resistance and load current. The paper deduces measurement impedance expressions of phase-to-phase distance relay in the case of phase-to-phase faults. Based on the deduced expression of measurement impedance, the paper analyzes the influence of load current on distance relay, and then indicates that phase-to-phase distance relay of the leading phase at the sending end is possible to mal-operate when the transmission line is heavily loaded and the phase-to-phase fault occurs at the end of the transmission line, while the distance relay of the lagging phase at the receiving side may mal-operate. Eventually, the paper proposes the measure to improve the distance relay. Simulation tests and real fault record verify that the theoretical analysis and improved methods are correct and valid.

KEY WORDS: power system; distance relay; phase-to-phase fault; mal-operation; cosine voltage criterion

摘要: 高压输电线路距离继电器受故障点过渡电阻以及负荷电流的影响,可能出现误动的现象。分析推导了在相间故障情况下相间距离继电器的测量阻抗,研究了线路负荷电流对阻抗继电器动作特性的影响。指出重载线路末端发生相间故障的情况下,位于送电侧的超前相的相间距离继电器存在误动的可能,位于受电侧的滞后相的相间距离继电器存在误动的可能。最后提出了相间距离继电器的改进措施。大量仿真测试与现场故障实例验证了理论分析的正确性以及所提方法的有效性。

关键词: 电力系统; 距离保护; 相间故障; 误动; 余弦电压元件

基金项目: 国家自然科学基金项目(50607014)。

Project Supported by National Natural Science Foundation of China (50607014).

0 引言

距离保护是电力系统输电线路中应用最为广泛的保护原理之一。在高压线路中普遍用作线路主保护,在超、特高压远距离输电线路主要作线路的后备保护^[1-5]。微机距离保护广泛采用多边形动作特性,其耐受过渡电阻的能力较强;同时,合理的动作特性中电抗线的下倾角设置可以防止距离保护在经高阻故障时可能发生的超越问题,已有相关文献对此进行了深入分析^[6-13]。

传统的距离保护根据选相元件的判断结果决定相应阻抗继电器是否投入及进行区内外故障的判定^[14-15],然而,为了保证保护动作的可靠性,距离保护也在选相失效或不确定的情况下利用距离继电器的计算结果进一步判断故障。中国某省的一条 110 kV 线路曾发生区外金属性相间故障时距离保护误动的情况。因此,本文重点分析了相间故障情况下各相间距离继电器的测量阻抗,从理论上研究了负荷电流对距离继电器的影响,并证明在重载线路上超前相的相间距离继电器有发生误动的可能。电网的故障实例也印证了理论分析的正确性。最后,本文在理论分析与仿真验证的基础上,提出了距离保护在边界故障情况下的改进措施,有效地防止了误动现象的发生。

1 相间故障分析

如图 1 所示,待分析的距离继电器安装于母线 m 侧,其保护范围末端为 y 点,整定阻抗为 Z_{set} 。故障点位于输电线路 f 点, f 点与保护安装处之间的线路阻抗为 Z_f ,与 n 侧母线之间的线路阻抗为 Z_l ; m 、 n 侧的系统阻抗分别为 Z_{sm} 、 Z_{sn} 。当区外 f 点发生 BC 相间金属性短路故障时,母线 m 侧的距离继

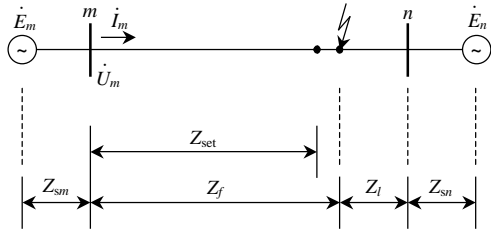


图 1 输电线路示意图

Fig. 1 Diagram of transmission line

电器动作特性各有不同，特定运行条件下某些阻抗继电器存在发生误动的可能。

对于图 1 所示的故障，从故障点看入系统的等效复合序网图如图 2 所示。

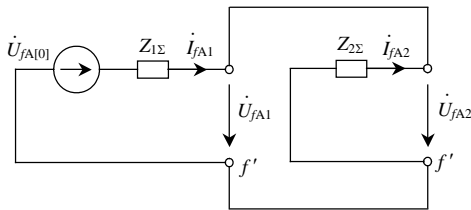


图 2 相间故障的等效复合序网图

Fig. 2 Equivalent compound sequence circuit of phase-to-phase fault

图中： $\dot{U}_{fA[0]}$ 为从故障端口看入的故障前电压； $Z_{1\Sigma}$ 、 $Z_{2\Sigma}$ 分别为从故障端口看入的等效正、负序阻抗，可近似认为 $Z_{1\Sigma} = Z_{2\Sigma} = \frac{(Z_{sm} + Z_f)(Z_{sn} + Z_l)}{Z_{sm} + Z_f + Z_l + Z_{sn}}$ ； \dot{U}_{fA1} 、 \dot{U}_{fA2} 、 \dot{I}_{fA1} 、 \dot{I}_{fA2} 分别为正、负序电压和电流。

$$\begin{cases} \dot{U}_{fA1} = \dot{U}_{fA2} \\ \dot{I}_{fA1} = -\dot{I}_{fA2} \end{cases} \quad (1)$$

则 m 侧支路流过的序电流为

$$\begin{cases} \Delta \dot{I}_{mA1} = c \dot{I}_{fA1} \\ \dot{I}_{mA2} = c \dot{I}_{fA2} \end{cases} \quad (2)$$

式中 c 为分支系数， $c = \frac{Z_l + Z_{sn}}{Z_{sm} + Z_f + Z_l + Z_{sn}}$ 。

由式(1)、(2)可知，保护安装处测量得到的三相电流 \dot{I}_{mA} 、 \dot{I}_{mB} 、 \dot{I}_{mC} 和电压 \dot{U}_{mA} 、 \dot{U}_{mB} 、 \dot{U}_{mC} 可以分别表示为

$$\begin{cases} \dot{I}_{mA} = \dot{I}_{mA1} + \dot{I}_{mA2} = \dot{I}_{mA.load} + (\Delta \dot{I}_{mA1} + \dot{I}_{mA2}) = \dot{I}_{mA.load} + c(\dot{I}_{fA1} + \dot{I}_{fA2}) = \dot{I}_{mA.load} \\ \dot{I}_{mB} = \dot{I}_{fB1} + \dot{I}_{fB2} = \dot{I}_{mB.load} + c(\dot{I}_{fB1} + \dot{I}_{fB2}) = \dot{I}_{mB.load} + jc\sqrt{3}\dot{I}_{fA2} \\ \dot{I}_{mC} = \dot{I}_{fC1} + \dot{I}_{fC2} = \dot{I}_{mC.load} + c(\dot{I}_{fC1} + \dot{I}_{fC2}) = \dot{I}_{mC.load} - jc\sqrt{3}\dot{I}_{fA2} \end{cases} \quad (3)$$

$$\begin{cases} \dot{U}_{mA} = \dot{U}_{fA} + \dot{I}_{mA1}Z_{f1} + \dot{I}_{mA2}Z_{f2} = \dot{U}_{fA} + \dot{I}_{mA.load}Z_f \\ \dot{U}_{mB} = \dot{U}_{fB} + \dot{I}_{mB1}Z_{f1} + \dot{I}_{mB2}Z_{f2} = \dot{U}_{fB} + \dot{I}_{mB.load}Z_f + jc\sqrt{3}\dot{I}_{fA2}Z_f \\ \dot{U}_{mC} = \dot{U}_{fC} + \dot{I}_{mC1}Z_{f1} + \dot{I}_{mC2}Z_{f2} = \dot{U}_{fC} + \dot{I}_{mC.load}Z_f - jc\sqrt{3}\dot{I}_{fA2}Z_f \end{cases} \quad (4)$$

式中 $\dot{I}_{mA.load}$ 、 $\dot{I}_{mB.load}$ 、 $\dot{I}_{mC.load}$ 和 \dot{U}_{fA} 、 \dot{U}_{fB} 、 \dot{U}_{fC} 分别为负荷电流以及故障点的三相电压。

2 相间故障时距离继电器的动作特性

2.1 各相相间距离继电器的测量阻抗

假设母线 m 侧为送电侧，现分析送电侧(m 侧)距离继电器的动作特性。

当输电线路发生 BC 相间故障时，相间距离继电器 Z_{mBC} 的测量阻抗能够准确反映故障距离。下文对其他 2 种相间阻抗继电器的动作行为进行分析。

由式(3)、(4)可得相间距离继电器 Z_{mAB} 的测量阻抗：

$$Z_{mAB} = \frac{\dot{U}_{mA} - \dot{U}_{mB}}{\dot{I}_{mA} - \dot{I}_{mB}} = Z_f + \frac{\dot{U}_{f(A-B)}}{\dot{I}_{m(A-B).load} - jc\sqrt{3}\dot{I}_{fA2}} \quad (5)$$

结合式(1)，可得 AB 相测量阻抗的表达式：

$$Z_{mAB} = Z_f + \frac{-3\dot{I}_{fA2}Z_{2\Sigma}}{\dot{I}_{m(A-B).load} - jc\sqrt{3}\dot{I}_{fA2}} = Z_f - j\sqrt{3}(Z_{sm} + Z_f) \frac{1}{1 + j\dot{I}_{m(A-B).load} / (c\sqrt{3}\dot{I}_{fA2})} \quad (6)$$

$$\text{令 } A = \frac{|\dot{I}_{m(A-B).load}|}{|c\sqrt{3}\dot{I}_{fA2}|}, \quad \alpha = \arg\left(\frac{\dot{I}_{m(A-B).load}}{\dot{I}_{fA2}}\right) + 90^\circ,$$

则式(6)可表示为

$$Z_{mAB} = Z_f - j\sqrt{3}(Z_{sm} + Z_f) \frac{1}{1 + Ae^{j\alpha}} \quad (7)$$

为简化分析，假设全系统阻抗角一致且等于 90° 的情况下，分支系数 c 为实数，且有

$$\alpha = \arg\left(\frac{\dot{E}_{mA} - \dot{E}_{nA}}{\dot{U}_{fA[0]}}\right) - 60^\circ \quad (8)$$

同理，相间故障时滞后的相间距离继电器 Z_{mCA} 的测量阻抗表达式为

$$Z_{mCA} = Z_f + j\sqrt{3}(Z_{sm} + Z_f) \frac{1}{1 + Be^{j\beta}} \quad (9)$$

此时 $\frac{j\dot{I}_{m(C-A).load}}{c\sqrt{3}\dot{I}_{fA2}} = Be^{j\beta}$ 。同理可知：

$$\beta = \arg\left(\frac{\dot{E}_{mA} - \dot{E}_{nA}}{\dot{U}_{fA(0)}}\right) + 30^\circ \quad (10)$$

2.2 送电侧的相间距离继电器的动作行为分析

假设母线 m 侧为送电侧, 据此可用相量图表示电压电流的相位关系, 如图 3 所示(此处假设阻抗角为 90°), 图中 $\delta = \arg(\dot{E}_m / \dot{E}_n)$ 。

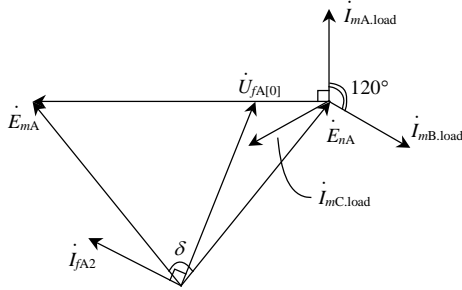


图 3 相量关系图
Fig. 3 Phase diagram

对于安装于线路送电侧的距离继电器而言, 当故障点位于线路不同位置时, 式(8)中 α 的变化范围为 $[30^\circ - \delta/2, 30^\circ + \delta/2]$, 式(10)中 β 的变化范围为 $[150^\circ - \delta/2, 150^\circ + \delta/2]$; 且当故障点越靠近线路末端时, α 、 β 越接近于各自的最大值。

另一方面, 当故障点固定时, A 的值随系统功角的变化(负荷变化时)而变化, 而 α 的值可认为基本不变。对于复数 $\dot{F} = (1 + Ae^{j\alpha})^{-1}$, 若 α 为常数, 则当 A 在 $(0, +\infty)$ 范围内变化时, \dot{F} 的轨迹就是一系列以 α 为参变量的圆弧^[2,16], 如图 4 所示。图 4 给出了不同 α 条件下 \dot{F} 的变化轨迹, 由式(7)、(9)可得 Z_{mAB} 、 Z_{mCA} 的变化轨迹, 如图 5 所示。

由图 5 可知, 对于位于送电侧的相间距离继电器

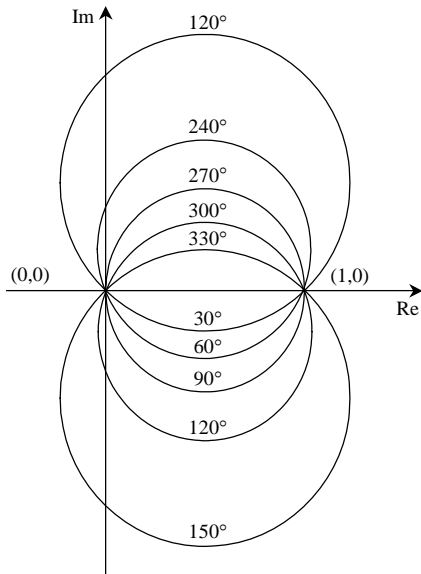


图 4 \dot{F} 的轨迹曲线
Fig. 4 Locus of \dot{F}

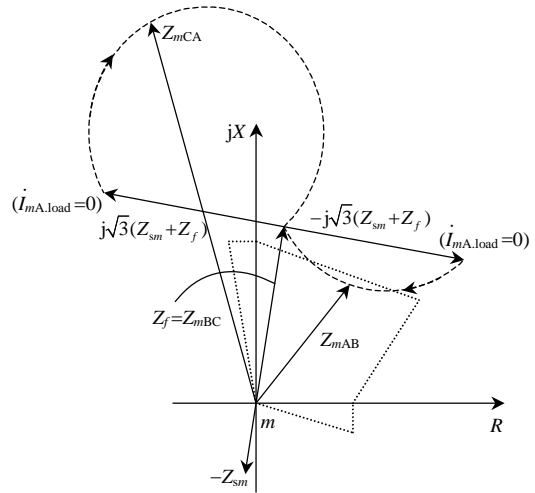


图 5 送电侧相间阻抗继电器测量阻抗变化轨迹
Fig. 5 Measurement impedance trajectory of phase-to-phase fault impedance relay on the sending side

器, 当负荷电流逐渐变大时, 相间故障时超前相的相间距离继电器的测量阻抗 Z_{mAB} 近似沿小圆弧变化, 而滞后相的测量阻抗 Z_{mCA} 近似沿大圆弧变化, 因此, 在线路重载或系统振荡的运行情况下, 区外相间故障时, 超前相的相间阻抗继电器可能落入动作区而误动。2001 年 7 月, 中国南方某省的一条 110 kV 线路在下一级线路出口处发生 BC 相间故障, 结果该线路的距离保护判定 I 段区内发生 AB 相间故障而越级出口跳闸。这起事故的误动原因正如前文所述。

2.3 受电侧的相间距离继电器的动作行为分析

对受电侧的距离继电器而言, 当故障点位于线路不同位置时, α 、 β 的变化范围分别为 $[210^\circ - \delta/2, 210^\circ + \delta/2]$ 、 $[330^\circ - \delta/2, 330^\circ + \delta/2]$, 因此, 受电侧的相间阻抗继电器 Z_{nAB} 、 Z_{nCA} 的变化轨迹如图 6 所示。

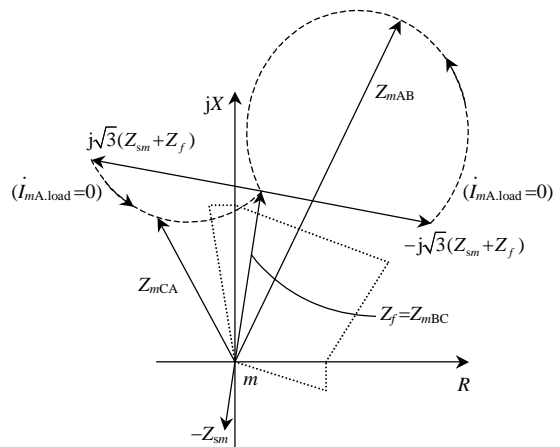


图 6 受电侧相间阻抗继电器测量阻抗变化轨迹
Fig. 6 Measurement impedance trajectory of phase-to-phase fault impedance relay on the receiving side

由图可知，BC 相间故障时，位于受电侧的滞后相的相间阻抗继电器理论上可能发生误动。

3 仿真验证与解决对策

3.1 解决对策

在保护区外(靠近保护范围末端)发生故障时，为防止距离保护发生误动，可以采用 $U\cos\varphi$ 的结果对相间距离继电器加以闭锁。 U 为相间电压， $\varphi = \varphi_m + 90^\circ - \varphi_{line}$ ，其中 φ_m 为相间电流滞后于相间电压的相角， φ_{line} 为被保护线路的正序阻抗角。当相间距离继电器动作且相应的 $U\cos\varphi$ 小于一定数值时，距离继电器出口；否则相应的距离继电器被闭锁。 $U\cos\varphi$ 在线路正常运行、相间故障时均有明确的物理意义及表达式^[14-15]。本文针对前文所述的误动问题，从理论上分析了故障相间以及非故障相间 $U\cos\varphi$ 的物理意义及表达式。理论证明可知(见附录 A)：在相间故障时(仍以 BC 相间故障为例)，对应的 $U_{BC}\cos\varphi_{(BC)}$ 很小，其值一般低于相间额定电压的 6%；而对于健全相与任一故障相之间的计算结果，即 $U_{AB}\cos\varphi_{(AB)}$ 和 $U_{CA}\cos\varphi_{(CA)}$ 的数值较大。因此，利用 $U_{AB}\cos\varphi_{(AB)}$ 和 $U_{CA}\cos\varphi_{(CA)}$ 的闭锁作用，距离继电器 Z_{AB} 及 Z_{CA} 不会发生前文所述的误动作。

3.2 仿真分析

本文利用 RTDS 仿真了 300 km 长的 500 kV 超高压输电线路，如图 7 所示，线路参数如下： $R_1=0.0195\Omega/\text{km}$ ， $R_0=0.1675\Omega/\text{km}$ ； $L_1=0.9134\text{mH}/\text{km}$ ， $L_0=0.1675\text{mH}/\text{km}$ ； $C_1=0.0140\mu\text{F}/\text{km}$ ， $C_0=0.0083\mu\text{F}/\text{km}$ 。 m 侧系统阻抗为： $X_{sm1}=149.3600\Omega$ ； $X_{sm0}=41.3400\Omega$ 。 n 侧系统阻抗为： $X_{sn1}=46.0300\Omega$ ； $X_{sn0}=103.3600\Omega$ 。

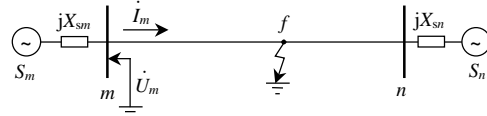


图 7 500 kV 输电线路仿真模型

Fig. 7 Simulation model for a 500 kV transmission system

为验证区外相间故障时阻抗继电器的误动现象，此处设保护范围为线路全长的 85%，即 $Z_{set}=4.97+j73.17\Omega$ 。以方向阻抗继电器为动作范围。区外靠近保护范围末端(90%线路长度)处发生 BC 相间金属性短路故障，考虑输电线路传输的负荷电流大小不同的情况下，送电侧、受电侧的距离继电器在故障后的测量阻抗值分别如表 1、2 所示。

为了清晰地表示距离继电器的动作情况，图 8、9 在阻抗平面上表示了当电源摆开角在 70° 、线路 90% 位置处发生 BC 相间故障时的测量阻抗值。

表 1 BC 相间故障时送电侧距离继电器的动作情况

Tab. 1 Performance of phase-to-phase distance relay on the sending side in the case of BC phase-to-phase fault

电源摆开角/(°)	Z_{AB}/Ω		Z_{BC}/Ω		Z_{CA}/Ω		$U_{AB}\cos\varphi/\text{kV}$	$U_{BC}\cos\varphi/\text{kV}$	$U_{CA}\cos\varphi/\text{kV}$
	测量阻抗	动作情况	测量阻抗	动作情况	测量阻抗	动作情况			
0	148+j54	-	5.6+j80	-	-141+j79	-	478	3.5	478
10	114+j47	-	5.6+j80	-	-198+j110	-	467	2	476
20	91+j44	-	5.6+j80	-	-305+j214	-	452	2	450
30	75+j42	-	5.6+j80	-	-260+j700	-	435	2	210
45	56+j42	-	5.6+j80	-	328+j200	-	400	2	425
60	46+j42	-	5.6+j80	-	174+j79	-	358	2	460
75	36+j42	+	5.6+j80	-	112+j58	-	312	2	446

注：“+”表示相应的阻抗继电器动作；“-”表示不动作。

表 2 BC 相间故障时受电侧距离继电器的动作情况

Tab. 2 Performance of phase-to-phase distance relay on the receiving side in the case of BC phase-to-phase fault

电源摆开角/(°)	Z_{AB}/Ω		Z_{BC}/Ω		Z_{CA}/Ω		$U_{AB}\cos\varphi/\text{kV}$	$U_{BC}\cos\varphi/\text{kV}$	$U_{CA}\cos\varphi/\text{kV}$
	测量阻抗	动作情况	测量阻抗	动作情况	测量阻抗	动作情况			
0	148+j54	-	5.6+j80	-	-141+j79	-	478	3.5	478
10	206+j76	-	5.6+j80	-	-108+j66	-	476	2.0	467
20	319+j160	-	5.6+j80	-	-86+j59	-	451	1.5	454
30	350+j600	-	5.6+j80	-	-70+j55	-	230	1.5	436
45	-274+j265	-	5.6+j80	-	-53+j52	-	402	1.5	403
60	-150+j110	-	5.6+j80	-	-40+j50	-	448	1.5	360
75	-101+j78	-	5.6+j80	-	-31+j49	+	438	1.5	315

注：“+”表示相应的阻抗继电器动作；“-”表示不动作。

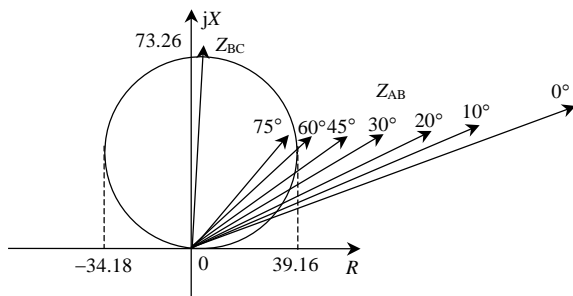


图8 送电侧超前相距离继电器的误动

Fig. 8 Mal-operation of fore phase-to-phase distance relay on the sending side

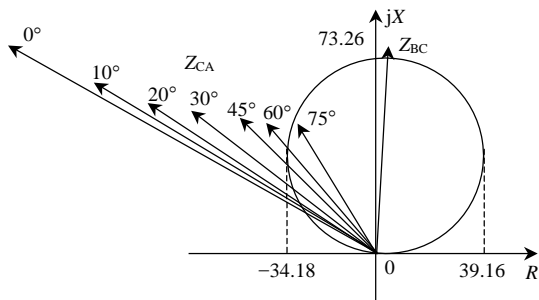


图9 受电侧滞后相距离继电器的误动

Fig. 9 Mal-operation of lag phase-to-phase distance relay on the receiving side

由实验数据可知,超前相与滞后相距离继电器测量阻抗的变化轨迹与本文的理论分析完全一致。由图8和图9可知:送电侧距离继电器受负荷电流的影响,在区外相间故障时,超前相的相间距离继电器可能发生误动;受电侧的滞后相间距离继电器也存在误动的可能。目前的微机距离保护广泛采用抗过渡电阻能力强的多边形特性,显然,此时送电侧的超前相距离继电器误动的可能性更大,而利用余弦电压判据可以可靠防止该误动现象。

4 结论

1) 多边形特性的距离继电器可通过调整电抗线的下倾角来防止距离保护在经高阻故障时可能发生的误动问题;

2) 距离继电器在重载线路上或系统振荡时发生相间故障时,送电侧阻抗继电器超前相的相间阻抗继电器存在误动的可能,受电侧滞后相的相间阻抗继电器也存在误动的可能;

3) 可以采用 $U \cos\varphi$ 的结果对相间距离继电器加以闭锁,从而有效地防止上述误动现象的发生。

参考文献

[1] 贺家李,宋从矩.电力系统继电保护原理[M].北京:中国电力出版社,2004:74-146.
He Jiali, Song Congju. Principles of protective relaying in electric

power systems[M]. Beijing: China Electric Power Press, 2004: 74-146(in Chinese).

[2] 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,2005:183-203.
Zhu Shengshi. The protection technique of high voltage network protection[M]. The 3rd Edition. Beijing: China Electric Power Press, 2005: 183-203(in Chinese).

[3] 许正亚.输电线路新型距离保护[M].北京:中国水利水电出版社,2002:335-338.
Xu Zhengya. New distance protection for transmission lines [M]. Beijing: Hydraulic and Electric Power Press, 2002: 335-338(in Chinese).

[4] 李斌,李永丽,贺家李.特高压长线路电容电流对距离保护的影响[J].天津大学学报,2006,39(6):83-89.
Li Bin, Li Yongli, He Jiali. The distance protection of UHV long transmission line[J]. Transactions of Tianjin University, 2006, 39(6): 83-89(in Chinese).

[5] 李斌,贺家李,杨洪平,等.特高压长线路距离保护算法改进[J].电力系统自动化,2007,31(1):43-46,104.
Li Bin, He Jiali, Yang Hongping, et al. Improvement of distance protection algorithm of UHV long transmission line[J]. Automation of Electric Power Systems, 2007, 31(1): 43-46, 104(in Chinese).

[6] 李岩,陈德树,尹项根,等.新型自适应姆欧继电器的研究[J].中国电机工程学报,2003,23(1):80-83.
Li Yan, Chen Deshu, Yin Xianggen, et al. Study on the new adaptive mho relay[J]. Proceedings of the CSEE, 2003, 23(1): 80-83(in Chinese).

[7] 沈冰,何奔腾.基于阻抗轨迹估计的自适应相间距离继电器[J].中国电机工程学报,2007,27(31):71-76.
Shen Bing, He Benteng. A novel adaptive distance protection based on impedance locus estimation[J]. Proceedings of the CSEE, 2007, 27(31): 71-76(in Chinese).

[8] Eissa M M, Masoud M. A novel digital distance relaying technique for transmission line protection[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2001, 16(1): 380-384.

[9] Li Gang, Zhu Shengshi, Sui Fenghai. Adaptive bowl impedance relay [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1999, 14(1): 142-147.

[10] 李斌,常文华,赵长兵,等.超高压输电线路接地电抗继电器的研究[J].电力自动化设备,2009,29(8):8-12.
Li Bin, Chang Wenhua, Zhao Changbing, et al. Earthing fault reactance relay of EHV transmission line[J]. Electric Power Automation Equipment, 2009, 29(8): 8-12(in Chinese).

[11] 沈冰,何奔腾.反向分支支路故障对距离保护的影响[J].电力系统自动化,2006,30(21):66-70.
Shen Bin, He Benteng. Effect of reactive equivalent fault impedance on distance protection[J]. Automation of Electric Power Systems, 2006, 30(21): 66-70(in Chinese).

[12] 王茂,马铁军.微机距离保护中典型误动情况分析[J].华电技术,2008,30(8):1-3
Wang Mao, Ma Tiejun. Analysis of typical malfunction in microcomputer distance protection[J]. Huadian Technology, 2008, 30(8): 1-3(in Chinese).

[13] 胡玉峰,柳焕章.以故障前补偿电压为基准量的距离继电器研究[J].中国电机工程学报,2006,26(16):27-32.
Hu Yufeng, Liu Huanzhang. Study on distance relay based on pre-fault compensated voltage[J]. Proceedings of the CSEE, 2006,

26(16): 27-32(in Chinese).

- [14] 许庆强, 索男加乐, 柳焕章, 等. 基于相间故障弧光电压特征的高压线路选相元件[J]. 电力系统自动化, 2006, 30(4): 65-70, 104. Xu Qingqiang, Suonan Jiale, Liu Huanzhang, et al. Fault phase selector for HV transmission line protective relaying based on the characteristic of the arc voltage between two faulted phases [J]. Automation of Electric Power Systems, 2006, 30(4): 65-70, 104(in Chinese).
- [15] 隋风海, 李钢, 王善祥, 等. 余弦电压元件的特性及其应用[J]. 电力系统自动化, 1997, 21(5): 26-28. Sui Fenghai, Li Gang, Wang Shanxiang, et al. Cosine relay $U_{\cos\phi}$'s characteristic and application[J]. Automation of Electric Power Systems, 1997, 21(5): 26-28(in Chinese).
- [16] 柳焕章. 阻抗保护分析中电压平面与阻抗平面的变换[J]. 中国电机工程学报, 2004, 24(1): 40-43. Liu Huanzhang. A novel impedance protection analysis method based on the transform from voltage plane to the impedance plane [J]. Proceedings of the CSEE, 2004, 24(1): 40-43(in Chinese).

附录 A

$U_{\cos\phi}$ 的物理意义及表达式分析。如图 A1 所示, 当系统三相对称运行时(正常运行或系统振荡情况), 各相间 $U_{\cos\phi}$ 表示了系统电气中心点的相间电压。当输电线路 f 点发生 BC 相间故障时, $U_{BC}\cos\phi_{(BC)} < U_{arc}$, 即 $U_{BC}\cos\phi_{(BC)}$ 间接反映了故障点弧光电阻上的压降, 其值很小。

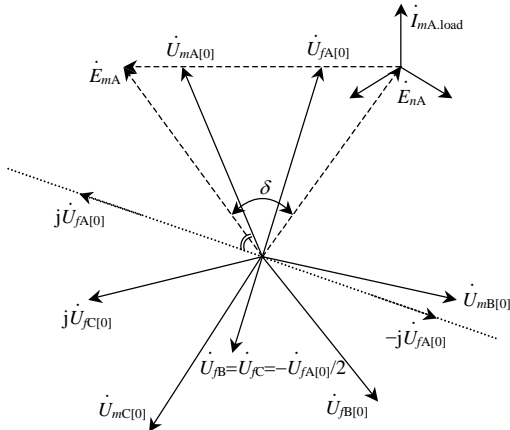


图 A1 全相与故障相之间的 $U_{\cos\phi}$

Fig. A1 $U_{\cos\phi}$ between fault phase and sound phase

需要分析说明的是非故障相间的 $U_{\cos\phi}$ 的大小。在 BC 相间故障的情况下, A 相电压电流不变, 因此故障前后 A

相各点电压不变。对于 AB 相间来说, A 相为健全相, B 相为故障相。由式(3)、(4)可得

$$\begin{aligned} \dot{U}_{mAB} \cos\phi_{(AB)} &= \dot{U}_{mA} \cos\phi_{(AB)} - \dot{U}_{mB} \cos\phi_{(AB)} = \\ &[\dot{U}_{mA[0]} - (\dot{U}_{fB} + \dot{I}_{mB.load} Z_f + jc\sqrt{3}\dot{I}_{fA2} Z_f)] \cos\phi_{(AB)} = \\ &[\dot{U}_{mAB[0]} - (\dot{U}_{fB} - \dot{U}_{fB[0]} + jc\sqrt{3}\dot{I}_{fA2} Z_f)] \cos\phi_{(AB)} \end{aligned} \quad (A1)$$

根据相量关系进一步化简, 式(A1)可以改写为

$$\dot{U}_{mAB} \cos\phi_{(AB)} = [\dot{U}_{mAB[0]} - j\frac{\sqrt{3}}{2}\dot{U}_{fA[0]} \frac{Z_{sm}}{Z_{sm} + Z_f}] \cos\phi_{(AB)} \quad (A2)$$

同理可求解得到

$$\dot{I}_{mAB} = \dot{I}_{mAB.load} - jc\sqrt{3}\dot{I}_{fA2} = \dot{I}_{mAB.load} + j\frac{\sqrt{3}}{2}\dot{U}_{fA[0]} \frac{1}{Z_{sm} + Z_f} \quad (A3)$$

假设全系统阻抗角一致, 且等于 90° 的情况下, 上述分析中各电气量之间的相量关系如图 A1 所示。显然, $U_{mAB}\cos\phi_{(AB)} > U_{mAB[0]}\cos\phi_{(AB)} > U_{arc}$; 并且由图可知, $\phi_{(AB)}$ 随着负荷电流的增大(系统功角增大)而减小, 且有 $0^\circ < \phi_{(AB)} < 60^\circ$ 。因此有

$$\begin{aligned} U_{mAB} \cos\phi_{(AB)} &> U_{mAB} \cos\phi_{(AB)} > \\ U_{mAB[0]} \cos 60^\circ &= \frac{1}{2} U_{mAB[0]} \end{aligned} \quad (A4)$$

由上述分析可知, BC 相间故障时, 健全相 A 与故障相 B 之间的 $U_{\cos\phi}$ 数值较大, 远比故障相间(BC 相)的 $U_{\cos\phi}$ 数值大很多。同理分析可知, BC 相间故障时, 健全相 A 与故障相 C 之间的 $U_{\cos\phi}$ 数值也较大。



李斌

收稿日期: 2010-06-30.

作者简介:

李斌(1976), 男, 副教授, 研究方向为电力系统继电保护, libin_tju@126.com;

范瑞卿(1985), 男, 硕士研究生, 研究方向为电力系统继电保护, ruiqingfan@163.com;

于绚(1986), 女, 硕士研究生, 研究方向为电力系统继电保护, yuxuan@tju.edu.cn;

贺家李(1925), 男, 教授, 俄罗斯工程院院士, 长期从事电力系统继电保护与故障分析的研究和教学工作, hjl86222@126.com.

(责任编辑 刘浩芳)