

故障全量的分相复合阻抗输电线路纵联保护原理

索南加乐, 夏经德, 焦在滨, 王莉, 何世恩, 刘凯

(西安交通大学电力设备电气绝缘国家重点实验室, 710049, 西安)

摘要: 提出了一种基于故障全量的分相复合阻抗输电线路纵联保护原理, 它根据线路两端电压、电流故障全量差的比值引入分相阻抗, 并以计算得到的阻抗数值判断故障是否发生在区内. 在区外故障时, 分相阻抗等于线路全长的正序阻抗; 在区内故障时, 分相阻抗明显偏离上述正序阻抗. 该原理为幅值判据, 不仅易于整定、具有自选相功能, 而且性能可靠、动作灵敏、适应性强, EMTP 数字仿真和动模试验结果验证了其有效性.

关键词: 输电线路; 故障全量; 纵联保护

中图分类号: TM77 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2010)02-0092-06

Transmission Line Pilot Protection Principle of Fault Total Content Based on Composite Impedance of Individual Phase

SUONAN Jiale, XIA Jingde, JIAO Zaibin, WANG Li, HE Shien, LIU Kai

(State Key Laboratory of Electrical Insulation and Power Equipment, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: A transmission line pilot protection principle based on the composite impedance of individual phase is proposed. The individual phase impedances are calculated from the fault total content differences of the voltages and currents at both terminals of the line, and then used for judging if the fault is occurs at the line. If the fault is outside of the protected area, the individual phase impedances just equal to the positive sequence impedance of whole length of the transmission line, while they will obviously differ from the determined value in case of the fault inside of the protected area, which refers an amplitude criterion. The proposed protection with independent phase selection possesses identity of reliable performance, sensitive operation, and strong adaptation. The EMTP simulation and the dynamic simulation test results indicate the effectiveness of the presented principle.

Keywords: transmission line; fault total content; pilot protection

随着 1 000 kV 输电系统投入运行, 对继电保护提出了许多新的要求, 这些要求既促使传统保护做出必要的增补, 也催生新型保护的诞生. 通信光纤的发展为新型保护提供了实时海量数据交换通道^[1].

在传统保护原理中, 电流差动保护一直保持优异的特性, 只是在高阻性接地故障和系统强振荡下的性能略显不足^[2]. 近年来, 微机保护大量普及, 基于故障分量的保护原理正在推广运用^[3]. 其中负序、零序方向纵联式保护可快速切除不对称故障, 对由

不对称故障引发的三相不对称短路也有一定效果^[4]. 非周期电流分量纵联差动保护利用光纤电流传感器技术和最小二乘算法, 从故障初提取电流非周期分量, 利用其线路两端所呈方向特性构成保护模型^[5], 但需考虑故障时刻/初相角的影响. 正序故障分量的方向式元件不受故障类型、系统负荷和过渡电阻的影响, 动作灵敏度高, 已成为线路的主保护, 只是在非全相运行及系统发生强振荡期间存在例外^[3]. 近年来, 此方向的研究很活跃^[6], 由于篇幅

限制,就不详细叙述了。

本文提出了故障全量的分相复合阻抗输电线路纵联保护新原理。该原理具备较强的电容电流补偿能力,可保护较长距离的线路。EMTP 数字仿真和动模试验验证了其有效性。

1 分相阻抗的特性

1.1 健全相分相阻抗的特性

图1为a相区内单相接地故障时三相系统故障网络分解图,图2为零序网络。按图1a所示,以健全相b相为例,m端的电压故障全量可表示为

$$\begin{aligned} \dot{U}_{mb} - (\dot{I}_{mb} + 3K\dot{I}_{m0})z_1d = \\ \dot{U}_{nb} - (\dot{I}_{nb} + 3K\dot{I}_{n0})z_1(D-d) \end{aligned} \quad (1)$$

式中: $K=(z_0-z_1)/3z_1$ 。

由图2的电路结构和电气参数可以得出

$$\dot{I}_{m0}z_0d - \dot{I}_{n0}z_0(D-d) = \dot{U}_{m0} - \dot{U}_{n0} \quad (2)$$

将式(2)代入式(1),整理为两端电压故障全量差的形式,再除以两端电流故障全量差,由于 $\dot{I}_{mb} = -\dot{I}_{nb}$,依据其物理意义用分相阻抗 Z_b 表示

$$Z_b = 2((\dot{U}_{mb} - \dot{U}_{nb}) - 3z_m(\dot{U}_{m0} - \dot{U}_{n0})/z_0)/(\dot{I}_{mb} - \dot{I}_{nb}) = z_1D \quad (3)$$

1.2 故障相分相阻抗的特性

同样按图1a所示,故障相a相m端的电压故障全量可表示为

$$\begin{aligned} \dot{U}_{ma} - (\dot{I}_{ma} + 3K\dot{I}_{m0})z_1d = \\ \dot{U}_{na} - (\dot{I}_{na} + 3K\dot{I}_{n0})z_1(D-d) \end{aligned} \quad (4)$$

由于 $\dot{I}_{ma} \neq -\dot{I}_{na}$,按照式(3)的推导方法,依据其物理意义用分相阻抗 Z_a 表示

$$Z_a = 2((\dot{U}_{ma} - \dot{U}_{na}) - 3z_m(\dot{U}_{m0} - \dot{U}_{n0})/z_0)/(\dot{I}_{ma} - \dot{I}_{na}) \neq z_1D \quad (5)$$

即故障相a相的分相阻抗 Z_b 不为线路全长的正序阻抗,这是本文建立输电线路复合分相阻抗纵联保护相角判据的理论依据。由图1c所示,故障相的电

压故障分量还可由区外等效系统阻抗来表示

$$\left. \begin{aligned} \Delta\dot{U}_{ma} &= -(\Delta\dot{I}_{ma} + 3K_m\Delta\dot{I}_{m0})Z_{1m} \\ \Delta\dot{U}_{na} &= -(\Delta\dot{I}_{na} + 3K_n\Delta\dot{I}_{n0})Z_{1n} \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

$$K_m = (Z_{0m} - Z_{1m})/3Z_{1m}; K_n = (Z_{0n} - Z_{1n})/3Z_{1n}$$

按照式(3)的推导过程,转换式(6)形成电压故障分量差,并使用对应的零序电压代替零序电流,整理零序电压差到公式的左端并乘以2,再除以双端电流故障分量差,仍可用分相阻抗 Z_a 表示

$$\begin{aligned} Z_a = \\ 2 \frac{\Delta\dot{U}_{ma} - \Delta\dot{U}_{na} - (\dot{U}_{m0}Z_{mm}/Z_{0m} - \dot{U}_{n0}Z_{nn}/Z_{0n})}{\Delta\dot{I}_{ma} - \Delta\dot{I}_{na}} = \\ -2 \frac{\Delta\dot{I}_{ma}Z_{1m} - \Delta\dot{I}_{na}Z_{1n}}{\Delta\dot{I}_{ma} - \Delta\dot{I}_{na}} = 2 \frac{Z_{1n} - K_1Z_{1m}}{K_1 - 1} \end{aligned} \quad (7)$$

式中: $K_1 = \Delta\dot{I}_{ma}/\Delta\dot{I}_{na}$,可以证明 $\arg K_1 \approx 0$ 。

从式(7)可见,故障分量的分相阻抗 Z_a 与两端等效系统正序阻抗 Z_{1m} 、 Z_{1n} 和电流故障分量比值 K_1 有关,而 K_1 是随故障位置而变化的,需分析分相阻抗 Z_a 的分布状态和变化规律。根据上述内容可知,通常情况下 $Z_a \neq Z_b$,但这里存在例外。将 $d=D/2$ 代入式(5),可发现这种算法在区内故障时存在死区,因此需研究这种死区的分布状态和特性

$$Z_a = \frac{2(\dot{I}_{ma}z_1D/2 - \dot{I}_{na}z_1(D-D/2))}{\Delta\dot{I}_{ma} - \Delta\dot{I}_{na}} = z_1D \quad (8)$$

为了便于定性地描述并分析在区内故障时阻抗 Z_a 的相角随故障位置/距离所反映出的变化关系,对图1c中的线路模型进行适度的简化。忽略区外相间耦合($Z_{mn}=Z_{nm}=0$),并假设 Z_{1m} 、 Z_{1n} 和 Z_1 相角相等的条件下,根据式(5)可构建基于图1c简化后的由线路正序参数组成的纯粹的单相故障附加电路,见图3。由图3可以得出故障相a相的故障电流 $\dot{I}_F$ 和线路两端电流故障分量的关系为

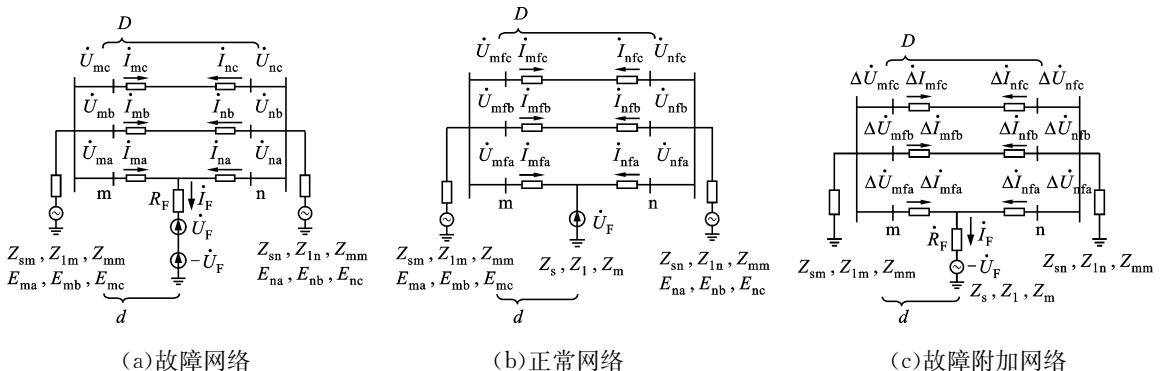


图1 a相单相接地时的三相故障网络

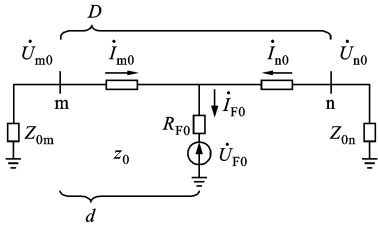


图 2 系统的零序网络

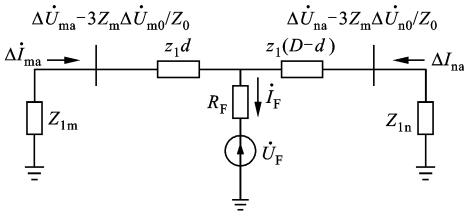


图 3 故障相电路模型

$$\left. \begin{aligned} \Delta \dot{I}_{ma} &= \dot{I}_F (Z_{1n} + z_1 (D - d)) / Z_\Sigma \\ \Delta \dot{I}_{na} &= \dot{I}_F (Z_{1m} + z_1 d) / Z_\Sigma \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

式中: $Z_\Sigma = Z_{1m} + z_1 D + Z_{1n}$.

将式(9)代入式(5), 消去故障电流, 得 Z_a 与故障距离 d 的函数关系

$$Z_a = 2z_1 \frac{Z_{1n}d - Z_{1m}(D - d)}{Z_{1n} - Z_{1m} + z_1(D - 2d)} = 2z_1(1 + f(d)) \quad (10)$$
$$f(d) = \frac{(Z_{1n} + Z_{1m} + 2z_1)d - Z_{1m}D - Z_{1n} + Z_{1m}}{Z_{1n} - Z_{1m} + z_1(D - 2d)}$$

由式(10)可知: 在区内故障时, 分子项在 d 的变化范围内随 d 线性增加, 分母项在 d 的变化范围内随 d 线性减少, 因此 Z_a 在 d 的变化范围内随 d 绝对地单调增加, 同理可知 $f(d)$ 也具有上述特性. 那么, 在区内故障时只存在一个盲点和死区, 就是线路的中点, 在其余位置上 Z_a 和 Z_b 间维持可靠的分辨差值.

将式(10)代入式(5), 由于用正常量得到的分相阻抗也是线路全长的正序阻抗, 得到用故障距离表示阻抗变化关系的 Z_a 为

$$Z_a = 2z_1 D(1 + K_z f(d)) \quad (11)$$

$$K_z = \frac{\Delta \dot{I}_{ma} - \Delta \dot{I}_{na}}{\dot{I}_{ma} - \dot{I}_{na}} = \frac{\Delta \dot{I}_{ma} - \Delta \dot{I}_{na}}{\Delta \dot{I}_{ma} - \Delta \dot{I}_{na} + 2\dot{I}_H} = \frac{1}{1 + 2\dot{I}_H / (\Delta \dot{I}_{ma} - \Delta \dot{I}_{na})} = \frac{Z_{1n} - Z_{1m} + z_1(D - 2d)}{Z_{1n} - Z_{1m} + z_1(D - 2d) + 2K_{HF}Z_\Sigma} \quad (12)$$

式中: $\dot{I}_H$ 为负荷电流; $K_{HF} = \dot{I}_H / \dot{I}_F$.

由于 K_z 的分子和分母都是 d 的一次多项式, 因此不改变 Z_a 随 d 的单调变化特性.

1.3 通用相分相阻抗的特性

将两端经零序电压补偿的电压故障全量差的 2

倍和各相电流故障全量差的比值叫做分相阻抗

$$Z_\varphi = 2\dot{U}_{\text{op}\varphi} / \dot{I}_{\text{op}\varphi} \quad (13)$$

$$\dot{U}_{\text{op}\varphi} = \sum \dot{U}_{m\varphi} - \sum \dot{U}_{n\varphi} = \dot{U}_{m\varphi} - \dot{U}_{n\varphi} -$$

$$3z_m(\dot{U}_{m0} - \dot{U}_{n0}) / z_0 = \dot{I}_{m\varphi} z_1 d - \dot{I}_{n\varphi} z_1 (D - d)$$

$$\dot{I}_{\text{op}\varphi} = \dot{I}_{m\varphi} - \dot{I}_{n\varphi}, \quad \varphi = a, b, c$$

当线路发生故障时, 在各相故障电流纵联差动的模值满足保护动作要求的条件下, 式(13)可适用于各种故障状态下的健全相和故障相.

2 分相复合阻抗纵联保护的幅值判据

2.1 故障全量的分相复合阻抗算法

分相阻抗算法在线路中点故障时唯一固定存在死区. 为了弥补分相阻抗在中点处死区的影响, 本文提出改进方法: 将两端测量点的各相电压故障全量直接推导为中点处的等效相电压故障全量

$$\left. \begin{aligned} \dot{U}'_{m\varphi} &= \dot{U}_{m\varphi} - (\dot{I}_{m\varphi} + K3\dot{I}_{m0})z_1 D/2 \\ \dot{U}'_{n\varphi} &= \dot{U}_{n\varphi} - (\dot{I}_{n\varphi} + K3\dot{I}_{n0})z_1 D/2 \end{aligned} \right\} \quad (14)$$

将等效相电压故障全量和对端相电压故障全量组成差值, 依据式(13), 以 m 端- n 端、中点- n 端、 m 端-中点计算得到的 3 组分相阻抗数值, 分别设为

$$\left. \begin{aligned} Z_\varphi &= 2 \frac{\dot{U}_{m\varphi} - \dot{U}_{n\varphi} - 3(\dot{U}_{m0} - \dot{U}_{n0})z_m z_0^{-1}}{\dot{I}_{m\varphi} - \dot{I}_{n\varphi}} \\ Z'_\varphi &= 2 \frac{\dot{U}'_{m\varphi} - \dot{U}_{n\varphi} - 3(\dot{U}'_{m0} - \dot{U}_{n0})z_m z_0^{-1}}{\dot{I}_{m\varphi} - \dot{I}_{n\varphi}} \\ Z''_\varphi &= 2 \frac{\dot{U}_{m\varphi} - \dot{U}'_{n\varphi} - 3(\dot{U}_{m0} - \dot{U}'_{n0})z_m z_0^{-1}}{\dot{I}_{m\varphi} - \dot{I}_{n\varphi}} \end{aligned} \right\} \quad (15)$$

显然, 以中点- n 端电气状态数据计算获得的分相阻抗所保护的死区在距 m 端 $3/4$ 的位置, 以 m 端-中点电气状态数据计算获得的分相阻抗所保护的死区在距 m 端 $1/4$ 线路全长的位置. 前面证实的以 m 端- n 端电气状态数据计算获得的分相阻抗所保护的死区在线路的中点. 这样, 三组分相阻抗保护算法的死区相互分离, 从而可相互弥补使用其中任何单个保护算法时所带来的影响. 将这三组分相阻抗组合叫做分相复合阻抗.

2.2 故障全量分相复合阻抗纵联保护的幅值判据

由 2.1 节内容可以看出, 在区外故障时, 分相复合阻抗分别为线路全长或半长的正序阻抗. 在区内故障时, 至少有一组分相阻抗明显偏离上述正序阻抗, 故障特征明显, 据此可区分线路上所发生的区内和区外故障. 因此, 提出基于分相复合阻抗的输电线纵联保护的幅值判据. 按照幅值特性设置纵联保护的幅值判据为

$$\left. \begin{aligned} &|\Delta \dot{I}_{m\varphi} + \Delta \dot{I}_{n\varphi}| > I_{\text{set}} \\ &0.8 > |Z_{\varphi}| / |z_1 D| > 1/0.8 \\ &0.8 > 2|Z'_{\varphi}| / |z_1 D| > 1/0.8 \\ &0.8 > 2|Z''_{\varphi}| / |z_1 D| > 1/0.8 \end{aligned} \right\} \quad (16)$$

式中:利用各相故障电流纵联差动的模块为启动单元, I_{set} 作为保护动作的最小启动量门槛,可固定取为 0.1 A(二次侧电流)^[7];其余 3 个式子为保护判据,之间为逻辑或运算,即其中只要有一个判据满足条件,保护立即动作。

3 仿真验证

在 EMTP 仿真计算中,采用分布参数模型,电压等级为 1 MV. 在动模试验中额定电压为 750 kV. 考虑分布电容的影响的分相阻抗计算式为

$$Z_{\varphi} = 2K_c \dot{U}_{\text{op}\varphi} (1 + K_c j\omega c_1 z_1 D^2/4) / \dot{I}_{\text{op}\varphi} \quad (17)$$

式中: K_c 为电容补偿度,可根据需要人为调整,这里暂定为 1; c_1 为单位长度线路的正序并联电容。

从式(17)中可以看出,电容补偿项对分相阻抗的幅值产生一定的影响,特别针对较长距离线路。

3.1 仿真线路参数

在 EMTP 仿真中的线路参数 D 为 500 km, r_1 为 0.008 05 Ω/km , r_0 为 0.204 89 Ω/km , l_1 为 0.824 84 $\times 10^{-3}$ H/km, l_0 为 2.374 78 $\times 10^{-3}$ H/km, c_1 为 0.014 0 $\times 10^{-6}$ F/km, c_0 为 0.009 0 $\times 10^{-6}$ F/km, $z_1 D = 4.03 + j129.57 = 129.57 \angle 88^\circ \Omega$. E_{sm} 为 1 050 kV, f 为 50 Hz, θ_m 为 0° , L_{1m} 为 143.7 mH, L_{0m} 为 74.2 mH. E_{sn} 为 1 000 kV, f 为 50 Hz, θ_n 为 -50° , L_{1n} 为 306.4 mH, L_{0n} 为 151.1 mH.

过渡电阻:①金属性过渡电阻 $R_F = 1.0 \times 10^{-5} \Omega$; ②单相接地高阻过渡电阻 $R_F = 500 \Omega$; ③相间短路或相间接地高阻过渡电阻 $R_F = 100 \Omega$.

3.2 EMTP 数字仿真分相阻抗计算结果

线路全长正序阻抗模值 $|z_1 D| = 129.57 \Omega$, 阻抗经过电容电流补偿. 图 4 为数字仿真中故障位置设置示意图,其中 K_1 在 m 端区外, K_2 在 m 端区内距 m 端 0 km 处, K_3 在区内线路中点, K_4 在 n 端区内距 m 端 300 km 处, K_5 在 n 端区外,仿真计算结果见表 1~表 4.

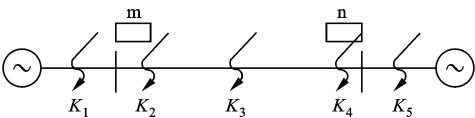


图 4 故障位置示意图

3.3 动模试验线路参数

在动模试验中的模型线路参数 D 为 497 km, r_1 为 0.012 17 Ω/km , r_0 为 0.272 9 Ω/km , l_1 为 0.853 1 $\times 10^{-3}$ H/km, l_0 为 2.674 $\times 10^{-3}$ H/km, c_1 为 0.013 7 $\times 10^{-6}$ F/km, c_0 为 0.009 3 $\times 10^{-6}$ F/km, $z_1 D = 6.05 + j133.20 = 133.34 \angle 87.4^\circ \Omega$. 并联电抗器 #1、#2 和 #3 的容量为 3 $\times 100$ MV $\cdot$ A, #4 的容量为 3 $\times 90$ MV $\cdot$ A. 表 5 为各发电机的主要参数。

3.4 动模试验分相阻抗计算结果

表 6 为动模试验经电容电流补偿后的分相阻抗计算结果. 图 5 为兰州东-咸阳 750 kV 长距离输电系统模拟接线图,故障位置见图中 $k_1 \sim k_{11}$.

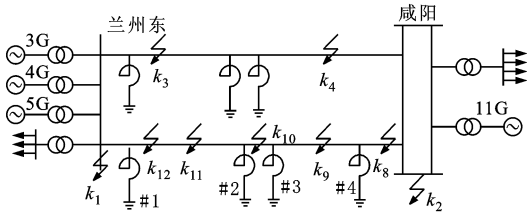


图 5 兰州东-咸阳 750 kV 长距离输电系统模拟接线图

3.5 结果分析

- (1)在区外故障时,各分相阻抗数值都保持在线路全长或半长的正序阻抗值附近,处在判据式(16)动作选择区域外,保护可靠不动。
- (2)在区内故障时,各分相阻抗数值保证有一组以上明显偏离线路全长或半长的正序阻抗值,落在判据式(16)动作选择区域内,保护可靠并正确动作。
- (3)在表 1 中,除线路中点处外,在其余位置/距离上发生故障时仅使用 m 端-n 端的分相阻抗数据就可识别区内、外故障。
- (4)在相同位置/距离上发生故障时,表 1 中的 a 相各分相阻抗数值和表 3 中对应的 a 相各分相阻抗数值基本接近,并保持相同的数据变化关系,这样由单相接地故障发展为相间接地故障的过程中,不会出现跨数据窗问题。
- (5)所有数据稳定,结果可靠,判据结构清晰,具备自选相功能,完全符合上述特性分析的结果,并具有进一步扩展和开发的能力。
- (6)通过电容补偿,可以抵消分布电容电流的影响,在不同长度的线路上都可获得理想的结果。

4 结 论

本文提出了一种基于分相复合阻抗的纵联保护新原理,并进行了理论证明、EMTP 仿真和动模试

表 1 EMTP 试验中 a 相单相接地的分相复合阻抗模值

位置	$R_F=0\ \Omega$			保护 动作	$R_F=500\ \Omega$			保护 动作
	$ Z_a /\Omega$	$ Z'_a /\Omega$	$ Z''_a /\Omega$		$ Z_a /\Omega$	$ Z'_a /\Omega$	$ Z''_a /\Omega$	
K_1	120.51	60.96	73.63	—	122.30	68.39	66.20	—
K_2	43.03	211.62	21.86	+	92.08	24.50	49.48	+
K_3	121.96	103.78	137.67	+	122.02	48.32	84.35	+
K_4	138.07	68.08	341.60	+	160.83	90.60	128.26	+
K_5	120.97	73.21	61.32	—	121.84	67.88	66.49	—

表 2 EMTP 试验中 a-b 相间短路时的分相复合阻抗模值

位 置	$R_F=0\ \Omega$						保 护 动 作	$R_F=100\ \Omega$						保 护 动 作
	$ Z_\varphi /\Omega$		$ Z'_\varphi /\Omega$		$ Z''_\varphi /\Omega$			$ Z_\varphi /\Omega$		$ Z'_\varphi /\Omega$		$ Z''_\varphi /\Omega$		
	a	b	a	b	a	b		a	b	a	b	a	b	
K_1	122.11	122.09	52.16	66.22	86.05	67.89	—	122.11	122.11	70.33	51.71	67.36	86.80	—
K_2	33.34	95.31	173.77	282.32	18.77	45.24	+	15.55	45.72	119.32	147.78	9.51	25.81	+
K_3	122.12	122.25	122.25	171.58	148.22	141.25	+	122.10	122.11	21.50	90.07	141.55	126.82	+
K_4	275.09	113.71	139.17	61.75	450.14	255.86	+	351.47	179.23	190.15	190.15	501.43	284.64	+
K_5^*	122.06	122.00	69.32	78.79	64.80	56.85	—	122.11	122.11	66.24	74.34	67.96	60.49	—

表 3 EMTP 试验中 a-b 相间接地时的分相复合阻抗模值

位 置	$R_F=0\ \Omega$						保 护 动 作	$R_F=100\ \Omega$						保 护 动 作
	$ Z_\varphi /\Omega$		$ Z'_\varphi /\Omega$		$ Z''_\varphi /\Omega$			$ Z_\varphi /\Omega$		$ Z'_\varphi /\Omega$		$ Z''_\varphi /\Omega$		
	a	b	a	b	a	b		a	b	a	b	a	b	
K_1	120.15	122.35	60.41	62.95	74.27	71.35	—	119.00	124.89	62.77	62.70	74.79	71.86	—
K_2	48.34	46.83	221.78	205.07	24.46	23.63	+	10.28	25.72	135.22	126.96	8.67	16.23	+
K_3	122.33	121.77	98.75	144.64	157.14	142.60	+	122.22	122.22	45.77	71.01	142.25	137.06	+
K_4	137.21	187.73	69.85	87.12	283.49	468.35	+	218.27	424.05	106.19	198.68	402.83	622.86	+
K_5	122.63	120.14	71.42	73.71	62.93	60.69	—	122.21	121.03	67.81	70.78	66.36	63.49	—

表 4 EMTP 试验中三相短路时的分相复合阻抗模值

位置	$ Z_\varphi /\Omega$			$ Z'_\varphi /\Omega$			$ Z''_\varphi /\Omega$			保护动作
	a	b	c	a	b	c	a	b	c	
K_1	122.2	122.1	122.2	62.5	62.5	62.6	72.0	71.9	72.0	—
K_2	58.8	58.7	58.8	219.2	219.2	219.3	29.6	29.6	29.7	+
K_3	122.1	122.2	122.1	123.0	122.9	122.8	157.9	158.0	158.0	+
K_4	197.3	197.3	197.6	100.1	100.0	100.2	369.9	369.8	370.2	+
K_5	122.1	122.1	122.1	71.9	71.8	71.9	62.4	62.5	62.5	—

表 5 各发电机的主要参数

发电机编号	3G	4G	5G	11G
机组容量/MW	850	850	850	2 550
$\cos\varphi$	0.85	0.85	0.85	0.85
$X'_{d\Sigma}$	0.316	0.323	0.314	0.312
$X''_{d\Sigma}$	0.251	0.241	0.251	0.194

表 6 动模试验中经电容电流补偿分相复合阻抗的模值

位置	k_9	k_9	k_9	k_{11}	k_{11}	k_{11}	k_{11}	k_{11}	k_{11}	k_{11}	k_{11}	k_{11}	k_{12}	k_{12}	k_{12}	k_1	k_1	k_1	k_1	k_1	k_1
RF/ Ω	400	400	400	0	0	0	400	400	400	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
故障类型	BG	BG	BG	ABC	ABC	ABC	AG	AG	AG	BC	BC	BC	AG	AG	AG	BCG	BCG	BCG	BC	BC	BC
相别	a	b	c	a	b	c	a	b	c	a	b	c	a	b	c	a	b	c	a	b	c
$ Z_\varphi /\Omega$	129*	2 397	133*	115	121	109	1 818	138*	124*	119*	72	148	2 686	139	120	119	118	119	121*	122	121
$ Z'_\varphi /\Omega$	71*	343	65*	216	204	200	272	63*	55*	58*	141	221	299	60	56	58	58	58	59*	59	61
$ Z''_\varphi /\Omega$	64*	308	74*	63	72	72	328	76*	63*	59*	75	64	363	74	55	60	59	60	64*	62	58
保护动作	-	+	-	+	+	+	+	-	-	-	+	+	+	-	-	-	-	-	-	-	-

注:在动模试验数据中,凡阻抗数据右上角带“*”的,由于其相电流纵联差动的模值小于最小启动量门槛,因此保护不动作。

验验证. 理论分析和仿真结果表明,在区外故障时,分相复合阻抗能准确反映线路全长或半长的正序阻抗,从而保证基于分相复合阻抗纵联保护的可靠性;在区内故障时,分相复合阻抗保证至少有一组数据满足保护判据动作的要求,故障特征明显,保证基于分相复合阻抗纵联保护选择的灵敏性. 该原理数值稳定、结构简单、整定容易,由于采用分相保护原理,具有自选相功能,动作灵敏,抗过渡电阻能力强,适合各种复杂运行环境. EMTP 仿真结果和动模试验验证了新原理的有效性.

参考文献:

[1] 孙鸣,谢芝东. 基于嵌入式以太网的变电站自动化系统无缝通信体系结构[J]. 电网技术, 2007, 31(9): 70-73,79.
SUN Ming, XIE Zhidong. Architecture of seamless communication for substation automation system based on embedded Ethernet[J]. Power System Technology, 2007, 31(9):70-73,79.

[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,2007:24-25.

[3] 罗四倍,段建东,张保会. 基于暂态量的 EHV/UHV 输电线路超高速保护研究现状与展望[J]. 电网技术, 2006, 30(22): 32-41.
LUO Sabei, DUAN Jiandong, ZHANG Baohui. Present status and research and development of transient component based ultra-high-speed protection for EHV/UHV transmission lines[J]. Power System Technol-

gy, 2006, 30(22):32-41.

[4] 汪萍,陈久林. 纵联零序方向保护误动原因分析及其对策[J]. 电力自动化设备,2007, 27(7): 122-125.
WANG Ping, CHEN Jiulin. Analysis of longitudinal zero sequence direction protection misoperation and its countermeasures [J]. Electric Power Automation Equipment,2007, 27(7):122-125.

[5] 及洪泉,杨以涵,李岩松,等. 基于光学电流互感器的非周期分量线路纵差保护[J]. 中国电机工程学报, 2007, 27(19):45-49.
JI Hongquan, YANG Yihan, LI Yansong, et al. Study on line aperiodic component current comparison based on optical current transducers[J]. Proceedings of the CSEE, 2007, 27(19):45-49.

[6] 索南加乐,何世恩,粟小华,等. 带可控串补和可调电抗器输电线路纵联保护新原理[J]. 西安交通大学学报, 2008,42(10):1259-1263.
SUONAN Jiale, HE Shi'en, SU Xiaohua, et al. New pilot protection principle of transmission line with thyristor controlled series capacitors and thyristor controlled reactor[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2008,42(10):1259-1263.

[7] 索南加乐,刘凯,粟小华,等. 输电线路综合阻抗纵联保护新原理[J]. 电力系统自动化,2008,32(3):36-41.
SUONAN Jiale, LIU Kai, SU Xiaohua, et al. Novel transmission line pilot protection based on integrated impedance[J]. Automation of Electric Power Systems, 2008,32(3):36-41.

(编辑 杜秀杰)