

基于解耦后输电线路纵向阻抗的改进型纵联保护

夏经德^{1,2}, 索南加乐², 张恽宁^{2,3}, 王斌², 邵文权^{1,2}, 何世恩^{2,4}

(1. 西安工程大学 电子信息学院, 陕西 西安 710048; 2. 西安交通大学 电气工程学院, 陕西 西安 710049;
3. 中国南方电网超高压输电公司 检修试验中心, 广东 广州 510663; 4. 甘肃省电力公司, 甘肃 兰州 730050)

摘要: 基于单相模型的纵向阻抗特性, 在三相模型上建立一种纵向阻抗的精确解耦算法, 从理论上确保了纵向阻抗计算的可靠性, 由此提出一种运用故障分量纵向阻抗的改进型输电线路纵联保护。对于外部故障, 纵向阻抗等于线路的正序阻抗; 对于内部故障, 纵向阻抗等于等效系统正序阻抗负的相量和。纵向阻抗不需考虑线路各端电气量的同步采样, 所提保护方案具有动作灵敏和性能可靠的优点。分析了系统阻抗和线路电容对纵向阻抗的综合影响, 增加了辅助判据, 使所提保护方案可以适用于不同的运行环境。仿真结果验证了所提保护原理的正确性。

关键词: 输电; 纵联保护; 继电保护; 故障分量; 纵向阻抗

中图分类号: TM 773

文献标识码: A

DOI: 10.3969/j.issn.1006-6047.2013.12.010

0 引言

随着微机控制技术^[1]、光纤通信技术^[2]和电子传感技术^[3-4]的快速发展, 输电线路纵联保护的性能也将得到大幅的提升^[5]。在传统的纵联保护中, 虽然电流差动保护可成功地提取出最能反映故障特征的故障电流来获得稳定可靠的甄别效果^[6], 但是需要线路各端同步采样电流数据, 同时受线路分布电容的影响较大, 并且在单侧电源下将丧失绝大部分故障判别的灵敏度^[7]; 方向比较纵联保护简单可靠, 只需要相对低廉的数据通信量^[8-9], 并且不需要两端同步采样, 可达到较快的动作速度, 但在分相保护中需配置选相元件, 保护的灵敏度不高, 在单侧电源下不能可靠工作, 在大电源侧存在电压死区的缺陷^[10-11]。因为三相线路模型存在相间耦合的影响^[12-13], 在继电保护的性能分析中往往通过单相模型建立数学定义和分析结论, 然后将这个成果推广运用到三相模型并且建立合理的保护算法, 形成满足要求的动作判据。

纵向阻抗(LI)有效利用了零序电压和零序电流的等效转换关系, 达到了消除相间耦合, 简化电路结构和明晰阻抗计算的目的, 可以直接在三相模型下推导出准确的计算形式, 相比文献^[11], 它可以获得更稳定、可靠的阻抗模型和判别效果; 同时, 这种解耦算法具有比距离阻抗保护更合理的消耦效应和更准确的判别结果。

文献^[14]没有考虑系统阻抗和线路电容对阻抗的影响。本文通过理论分析后发现, 当系统阻抗大于一定限值后将会严重威胁 LI 结果的可靠性。在分

析系统短路容量特征的基础上增加了线路各端测量阻抗的辅助判据。根据分析可知, 在已有系统和线路的各种运行方式下, 所增加的辅助判据能够和 LI 主判据构成完美的配合。

1 单相模型的阻抗特性

图 1 分别是在区外和区内故障时 $R-L$ 单相等效工频故障分量线路模型。

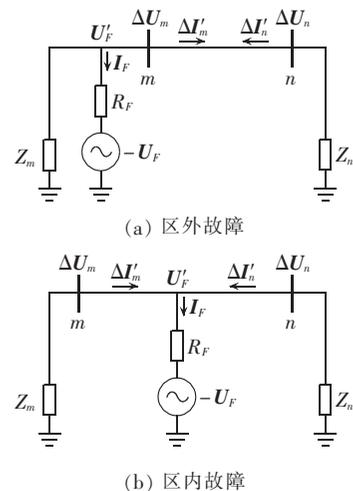


图 1 $R-L$ 单相等效线路模型

Fig.1 $R-L$ single-phase equivalent line model

在图 1 中, m 和 n 分别为被保护线路的两侧电气测量端, 被保护线路全长为 D ; Z_m 和 Z_n 分别为线路两侧系统阻抗; 单位长度线路阻抗为 z ; 内部故障时从 m 端到故障点测算获得的故障距离为 d ; R_F 为故障电阻; $-U_F$ 和 I_F 为故障点等效工频电动势和故障电流; U'_F 为线路故障点处实际工频电压; ΔU_m 和 ΔU_n 分别为在线路两端测量得到的工频电压故障分量; $\Delta I'_m$ 和 $\Delta I'_n$ 分别为在线路两端测量得到的工频电流故障分量(不考虑线路电容的影响)。工频电流故障

收稿日期: 2012-07-30; 修回日期: 2013-08-30

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51037005, 50877061); 西安工程大学博士科研启动基金项目(BS1206)

Project supported by the National Natural Science Foundation of China(51037005, 50877061) and the Research Starting Fund for the Doctoral Program of Xi'an Polytechnic University(BS1206)

分量的设定流向已在图中标出。

1.1 单相模型下 LI 的定义^[14]

在文献[14]的基础上,结合图1所示线路逻辑关系,定义 LI 如下:

$$\Delta Z_{op} = \frac{\Delta U_m}{\Delta I'_m} + \frac{\Delta U_n}{\Delta I'_n} \quad (1)$$

1.2 区外故障^[14]

将两端电压差除以任意一端电流,可以得到:

$$\frac{\Delta U_m - \Delta U_n}{\Delta I'_m} = \frac{\Delta U_m - \Delta U_n}{-\Delta I'_n} = zD \quad (2)$$

同样,图 1(a)所示的两端电流相量和的结果是 $\Delta I'_m + \Delta I'_n = 0$, 因此,式(2)可以转换为:

$$\Delta Z_{op} = \frac{\Delta U_m}{\Delta I'_m} + \frac{\Delta U_n}{\Delta I'_n} = zD \quad (3)$$

上述结果意味着可将本端测量阻抗 $\Delta U_m / \Delta I'_m$ 传送到对端,再和对端测量阻抗 $\Delta U_n / \Delta I'_n$ 进行相量和运算,从而得出 LI 在区外故障时的结果。由式(3)可知,当区外故障时,LI 为线路阻抗。

众所周知,在方向比较纵联保护中存在电压死区的缺陷,实际可反映为当遇到大电源时,其电压故障分量的幅值较小,在极端状态下甚至趋于零,由此将影响电压和电流间相位差数值的稳定提取,降低甚至威胁其可靠性。

由式(3)的结构可以看出,LI 将线路两端的测量阻抗依据线路阻抗联系起来,形成了互补的关联,完全可以抵御单端电压过小所带来的影响。

1.3 区内故障^[14]

如图 1(b)所示,在区内故障时,线路各端的电压和电流故障分量的关系可分别表示为:

$$\Delta U_m = -Z_m \Delta I'_m, \quad \Delta U_n = -Z_n \Delta I'_n \quad (4)$$

式(4)中线路各端电压除以相同端电流,将结果代入式(3)中,可以得到:

$$\Delta Z_{op} = \frac{\Delta U_m}{\Delta I'_m} + \frac{\Delta U_n}{\Delta I'_n} = -(Z_m + Z_n) \quad (5)$$

由式(5)可知,当区内故障时,上述 LI 为区外系统阻抗相量和的负值。由式(3)和式(5)的对比可以看出,由于在区外故障时 LI 就是线路阻抗,它非常明确,当 LI 偏离线路阻抗时就可以断定为区内故障。这样,可以将 LI 偏离线路阻抗的程度作为故障类型识别的依据。

根据式(5)的计算形式可以看出,LI 将两端的测量阻抗联系起来,构成一个合理的数据关系链,完全可以避免单侧电气量扰动所带来的任何相关影响,所得结果和线路阻抗形成了反相的相量关系,状态的分辨裕度更宽,因此相比方向比较纵联保护,它的可靠性也更高。

由此可以看出,当发生区内故障时,所得阻抗为系统阻抗负的相量和,式(3)和式(5)之间的差异就

是 LI 确认故障状态的依据。

2 三相模型的阻抗特性

图 2 是 a 相单相接地故障的 R-L 三相等效工频故障分量模型,图 3 是零序等效工频线路模型。

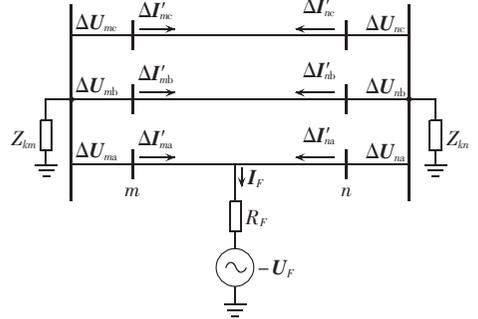


图 2 R-L 三相等效线路模型

Fig.2 R-L three-phase equivalent line model

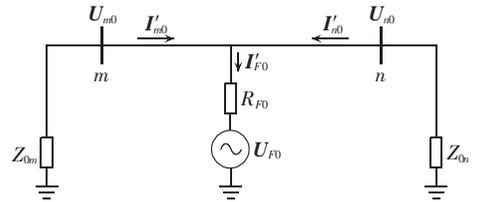


图 3 R-L 零序线路等效模型

Fig.3 R-L zero-sequence equivalent line model

在图 2、3 中, Z_{km}, Z_{kn} 在下标 k 取 s, m, 1 和 0 时分别为线路两侧系统自阻抗、互阻抗、正序阻抗和零序阻抗; z_s, z_m, z_1, z_0 分别为单位长度线路的自阻抗、互阻抗、正序阻抗和零序阻抗; R_{F0} 为零序故障电阻; $-U_{F0}$ 和 I_{F0} 是故障点零序等效工频电动势和零序故障电流; $\Delta U_{m\varphi}$ 和 $\Delta U_{n\varphi}$ ($\varphi = a, b, c$) 分别为线路两端测量所得的各相工频电压故障分量; $\Delta I'_{m\varphi}$ 和 $\Delta I'_{n\varphi}$ ($\varphi = a, b, c$) 分别为线路两端测量所得的各相工频电流故障分量(不考虑线路电容的影响); U_{m0} 和 U_{n0} 分别为线路两端工频零序电压; I'_{m0} 和 I'_{n0} 分别为线路两端工频零序电流(不考虑线路电容的影响)。各电流故障分量的设定方向已在图 2 和图 3 上标出。

2.1 三相模型下 LI 的定义

根据单相模型的分析结果,结合图 2 所示三相模型,定义三相模型基于故障分量的任意相 LI 为各端经精确解耦后的各相电压除以相同端同相电流相量,具体计算形式为:

$$\Delta Z_{\varphi\Sigma} = \frac{\Delta U_{m\varphi\Sigma}}{\Delta I'_{m\varphi\Sigma}} + \frac{\Delta U_{n\varphi\Sigma}}{\Delta I'_{n\varphi\Sigma}} \quad \varphi = a, b, c \quad (6)$$

$$\Delta U_{m\varphi\Sigma} = \Delta U_{m\varphi} - 3 \frac{z_m}{z_0} U_{m0}$$

$$\Delta U_{n\varphi\Sigma} = \Delta U_{n\varphi} - 3 \frac{z_n}{z_0} U_{n0}$$

首先建立 LI 的基本状态表达关系。按照图 2 所

示,各相两端电压相量差可表示为:

$$\Delta U_{m\varphi} - \Delta U_{n\varphi} = \Delta I'_{m\varphi} z_1 d - \Delta I'_{n\varphi} z_1 (D-d) =$$

$$\Delta I'_{m\varphi} z_1 d - \Delta I'_{n\varphi} z_1 (D-d) + 3\Delta I'_{n0} z_m d - 3\Delta I'_{n0} z_m (D-d) \quad (7)$$

$$\Delta I'_{m\varphi} = \Delta I'_{m\varphi} + K_z \times 3I'_{m0}, \quad \Delta I'_{n\varphi} = \Delta I'_{n\varphi} + K_z \times 3I'_{n0}$$

其中, $K_z = (z_0 - z_1) / (3z_1)$ 。

按照图 3 所示,两端零序电压相量差可表示为:

$$U_{m0} - U_{n0} = I'_{m0} z_0 d - I'_{n0} z_0 (D-d) \quad (8)$$

将式(7)的零序电流用式(8)的零序电压进行等效替换,经移项整理并除以相同相任意一端的电流故障分量后,式(7)可以表示为:

$$\frac{\Delta U_{m\varphi} - \Delta U_{n\varphi}}{\Delta I'_{m\varphi}} = \frac{\Delta U_{m\varphi}}{\Delta I'_{m\varphi}} - \frac{\Delta U_{n\varphi}}{\Delta I'_{m\varphi}} = \frac{\Delta U_{m\varphi}}{\Delta I'_{m\varphi}} - \frac{\Delta U_{n\varphi}}{\Delta I'_{n\varphi}} =$$

$$\frac{\Delta I'_{m\varphi} z_1 d - \Delta I'_{n\varphi} z_1 (D-d)}{\Delta I'_{m\varphi}} = -\frac{\Delta I'_{n\varphi} z_1 d - \Delta I'_{n\varphi} z_1 (D-d)}{\Delta I'_{n\varphi}} \quad (9)$$

2.2 健全相

针对图 2 所示三相模型的健全相 b 相和 c 相,可以分别得到这 2 个健全相两端电流相量和为:

$$\Delta I'_{mb} + \Delta I'_{nb} = 0, \quad \Delta I'_{mc} + \Delta I'_{nc} = 0$$

因此,式(7)可以转换为:

$$\frac{\Delta U_{mb}}{\Delta I'_{mb}} + \frac{\Delta U_{nb}}{\Delta I'_{nb}} = z_1 D, \quad \frac{\Delta U_{mc}}{\Delta I'_{mc}} + \frac{\Delta U_{nc}}{\Delta I'_{nc}} = z_1 D \quad (10)$$

由此可以看出,上述解耦算法能够彻底消除相间耦合的影响,使得式(10)和式(3)的计算形式完全一致,并且将基于单相模型的 LI(等于线路阻抗)准确地换算为基于三相模型的线路正序阻抗。

2.3 故障相

针对图 2 所示三相等效线路模型的故障相 a 相,可以得到该相按照两端电流和电压用区外系统阻抗所表示的关系为:

$$\Delta U_{ma} = -\Delta I'_{Ma} Z_{1m} = -\Delta I'_{ma} Z_{1m} - \Delta I'_{n0} Z_{1m}$$

$$\Delta U_{na} = -\Delta I'_{Na} Z_{1n} = -\Delta I'_{na} Z_{1n} - \Delta I'_{n0} Z_{1n} \quad (11)$$

$$\Delta I'_{Ma} = \Delta I'_{ma} + 3K_M I'_{n0}, \quad \Delta I'_{Na} = \Delta I'_{na} + 3K_N I'_{n0}$$

其中, $K_M = Z_{1m} / Z_{1m}, K_N = Z_{1n} / Z_{1n}$ 。

同样,按图 3 所示,可得零序电压和零序电流基于区外零序系统阻抗所表示的等式关系为:

$$U_{m0} = -I'_{m0} Z_{0m}, \quad U_{n0} = -I'_{n0} Z_{0n} \quad (12)$$

将式(11)的零序电流用式(12)的零序电压等效替换,经移项整理并除以相同端该相电流后,式(11)可以表示为:

$$\frac{\Delta U_{Ma}}{\Delta I'_{ma}} = \frac{\Delta U_{ma} \left(1 + 3 \frac{Z_{1m}}{Z_{0m}} \frac{U_{n0}}{\Delta U_{ma}} \right)}{\Delta I'_{ma}} = -Z_{1m}$$

$$\frac{\Delta U_{Na}}{\Delta I'_{na}} = \frac{\Delta U_{na} \left(1 + 3 \frac{Z_{1n}}{Z_{0n}} \frac{U_{n0}}{\Delta U_{na}} \right)}{\Delta I'_{na}} = -Z_{1n} \quad (13)$$

$$\Delta U_{Ma} = \Delta U_{ma} + 3 \frac{Z_{1m}}{Z_{0m}} U_{n0}, \quad \Delta U_{Na} = \Delta U_{na} + 3 \frac{Z_{1n}}{Z_{0n}} U_{n0}$$

当使用式(6)表示式(13)时,可以得到:

$$\frac{\Delta U_{Ma}}{\Delta I'_{ma}} + \frac{\Delta U_{Na}}{\Delta I'_{na}} = \frac{\Delta U_{ma} \left(1 - 3 \frac{Z_{1m}}{Z_0} \frac{U_{n0}}{\Delta U_{ma}} \right)}{\Delta I'_{ma}} +$$

$$\frac{\Delta U_{na} \left(1 - 3 \frac{Z_{1n}}{Z_0} \frac{U_{n0}}{\Delta U_{na}} \right)}{\Delta I'_{na}} = \frac{\Delta U_{Ma} \Sigma \left(1 - 3 \frac{Z_{1m}}{Z_0} \frac{U_{n0}}{\Delta U_{ma}} \right)}{\Delta I'_{ma} \left(1 + 3 \frac{Z_{1m}}{Z_{0m}} \frac{U_{n0}}{\Delta U_{ma}} \right)} +$$

$$\frac{\Delta U_{Na} \Sigma \left(1 - 3 \frac{Z_{1n}}{Z_0} \frac{U_{n0}}{\Delta U_{na}} \right)}{\Delta I'_{na} \left(1 + 3 \frac{Z_{1n}}{Z_{0n}} \frac{U_{n0}}{\Delta U_{na}} \right)} = -(Z'_{1m} + Z'_{1n}) \quad (14)$$

$$Z'_{1m} = Z_{1m} \left(1 - 3 \frac{Z_{1m}}{Z_0} \frac{U_{n0}}{\Delta U_{ma}} \right) / \left(1 + 3 \frac{Z_{1m}}{Z_{0m}} \frac{U_{n0}}{\Delta U_{ma}} \right)$$

$$Z'_{1n} = Z_{1n} \left(1 - 3 \frac{Z_{1n}}{Z_0} \frac{U_{n0}}{\Delta U_{na}} \right) / \left(1 + 3 \frac{Z_{1n}}{Z_{0n}} \frac{U_{n0}}{\Delta U_{na}} \right)$$

其中, Z'_{1m} 和 Z'_{1n} 分别为基于三相参数和外部参数导出的两侧等效系统正序阻抗。

根据式(14)可以看出,计算出的等效正序系统阻抗明显不同于实际的正序系统阻抗。根据实际线路和系统参数的特点可知,由于在超/特高压输电线路中,所有相关阻抗的相角都非常趋近于 90° ,因此计算带来的偏差对于等效系统阻抗而言主要反映在阻抗的幅值上,而其相角的偏差不大,不会改变其所呈现的基本阻抗特征。

基于式(14),当区内故障时,LI 等于等效系统正序阻抗负的相量和。LI 能够有效消减相间耦合的影响,并对于区外故障获得明显可信度。这个结果能确保与 1.1 节和 1.2 节的结果保持一致。实际上,当区内故障发生时,虽然计算结果出现了一定的偏差,但依据电力系统的运行分析和特性统计,这个偏差实际非常有限,并且完全可以被工程计算和故障识别所接受。精确解耦后的 LI 可用图 4 表示。

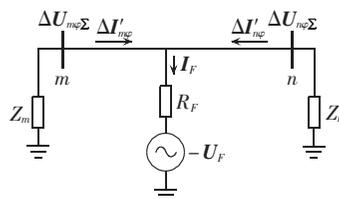


图 4 R-L 单相解耦线路模型

Fig.4 R-L single-phase decoupled line model

由此可知,通过设置的精确解耦算法,LI 相比方向比较纵联保护,具有自选相跳闸的能力。

3 性能分析

3.1 解耦算法的性能特点

在基于阻抗特性继电保护的分析和中,相间耦合的影响是不容回避的。文献[14]虽然确立了 LI 的许多

重要特性,但是由于未能消除相间耦合的影响,大幅削弱了其实用价值。本文所做的工作之一就是弥补了上述缺陷。

在距离阻抗保护中,已经建立起完善的补偿算法,可以有效减免相间耦合的影响^[15]。本文所提的解耦算法与补偿算法相比具有非常明显的优势。

首先回顾距离阻抗的补偿算法,针对故障相,在忽略故障电阻的情况下,距离阻抗的幅值与故障距离呈现绝对的线性关系;但是在考虑故障电阻存在的情况下,距离阻抗将受到故障电阻及对端系统双重因素的影响,性能由此急剧恶化。根据式(5)和式(14)所示,LI 根本不包含故障电阻的因素,因此故障电阻影响不到 LI,系统运行方式不仅不会影响 LI,而且成为 LI 状态识别的重要性能标志。

针对健全相,距离阻抗的补偿算法不仅不能有效消减相间耦合,实际上还需要增加一个小于 1 的修正系数来减免由于过补偿所带来的不利影响,因此它的补偿效果非常有限。LI 的解耦算法从原理上完全消除相间耦合的影响,因此其结果可以准确表示为线路的正序阻抗。

由此可知,解耦算法比补偿算法更可靠灵敏。

3.2 不同步采样下的阻抗特点

在输电线路纵联保护中,需要线路各端同步时。在各输电线路纵联保护的方式中,电流差动保护就必须保证各端电流保持严格的同步采样。

LI 从原理上可以确定只需将本端的测量阻抗发送到对端,就可以满足需要,完全不涉及两端电压和电流同步采样及其相关的技术问题,因此 LI 完全可以不考虑各电气量的同步采样。

3.3 系统运行方式下的阻抗特点

线路在运行时可能遇到强系统向另一侧弱系统甚至是无源系统供电,导致弱系统阻抗较正常运行情况大,在极端情况下会面临系统阻抗趋于无穷大的情况。这里假设可能出现 $|Z_m| \rightarrow \infty$ 。由此,LI 将呈如式(15)所示变化。

$$\Delta Z_{op}|_{|Z_m| \rightarrow \infty} = \frac{\Delta U_m}{\Delta I'_m}|_{|Z_m| \rightarrow \infty} + \frac{\Delta U_n}{\Delta I'_n}|_{|Z_m| \rightarrow \infty} \rightarrow \infty - \infty = \text{不定值} \quad (15)$$

由式(15)可以看出,当系统阻抗较大时,会引发 LI 计算结果的不可靠,在此情况下不能保证在区外故障时 LI 等于线路阻抗。LI 在取得不需考虑同步采样优势的同时,降低了阻抗计算的可靠性,这个缺陷需要规避。

在输电线路运行中,线路至少有一侧的系统为电源端。根据运行要求,该侧系统的短路容量必须数倍于该线路的自然传输功率,才能保证电力的正常输

送;而且根据统计,此倍数至少要大于 5。系统的短路容量可以等效反映为系统阻抗,而输电线路的自然传输功率可以等效反映为线路的特征阻抗,因此上述的功率比值关系可以等效转换为系统阻抗和特征阻抗的比较。动模所用 750 kV 输电线路,它的特征阻抗约为 250 Ω 。这样,当线路两侧的测量阻抗都明显大于 50 Ω 时,就可以确认没有任何一侧的系统为电源端,由此违反了上述电力系统运行设定的条件,可以确认此为区外故障。然而根据 LI 的计算特点,当发生区外故障、电源侧系统阻抗满足此设定条件时,仍然需要校验 LI 是否稳定、可靠。

首先,在增加线路分布电容影响的基础上,定性分析系统阻抗与 LI 在线路 Π 型等效模型下的对应关系。图 5 所示为当发生区外故障时带等效并联电容的 Π 型单相等效工频故障分量模型,图中, ΔI_{mp} 、 $\Delta I'_{mp}$ 分别为线路两端测量所得的各相工频电流故障分量(包含了线路电容的影响);线路单位长度电容为 c ; ΔI_{mc} 和 $\Delta I'_{nc}$ 分别为线路两端的等效电容电流。

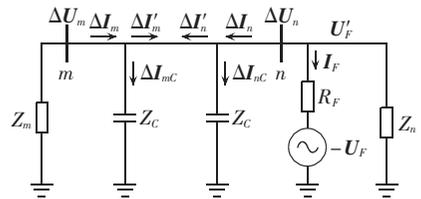


图 5 Π 型单相等效线路模型

Fig.5 Π -type single-phase equivalent line model

按照图 5 所示, m 端的测量阻抗就是 m 端区外的系统阻抗 Z_m ,而 n 端的测量阻抗可表示为:

$$\frac{\Delta U_n}{\Delta I'_n} = [(Z_m // Z_C) + zD] // Z_C = \frac{Z_m Z_C^2 + zD Z_C (Z_m + Z_C)}{2 Z_m Z_C + zD (Z_m + Z_C) + Z_C^2} \quad (16)$$

其中, $Z_C = \frac{2}{j\omega cD}$; // 表示算式两侧阻抗的并联。

当系统阻抗 Z_m 为纯电阻时,和线路左侧等效电容并联后,表示为较并联前标么值缩小的电阻和电容的串联,并且其等效阻抗将抵消线路感抗,使对端(n 端)的测量阻抗呈现缩小的趋势,LI 变小;当 Z_m 为感抗时,和线路左侧电容并联后为较并联前放大的感抗(当系统阻抗幅值小于线路特征阻抗时),并且其等效阻抗将放大线路感抗,使对端测量阻抗呈现放大的趋势,LI 变大。

因为当发生区外故障时,LI 的结果与线路阻抗直接相关,因此可以先假设存在如下对应关系:

$$\Delta Z_{op} = \frac{\Delta U_m}{\Delta I'_m} + \frac{\Delta U_n}{\Delta I'_n} = KzD \quad (17)$$

其中, K 为一个任意随机的实数。

将 m 侧测量阻抗 (依据式 (4) 转换等效获得) 和 n 侧测量阻抗 (式 (16)) 代入式 (17), 对式 (17) 进行恒等转换, 并且设转换后的分子项为零, 可以获得以下计算关系:

$$(2Z_c + zD)Z_m^2 + [2KZ_c zD + K(zD)^2]Z_m + K(zD)^2 Z_c + (K-1)zDZ_c^2 = 0 \quad (18)$$

取 LI 保护动作主判据式 (21) 的下限 $K = K_{Q_{S1}} = 0.5$, 并且代入文献 [16] 所用 1 000 kV、500 km 输电线路的相关参数, 计算所得对应的系统阻抗为:

$$|Z_{m\max}| = \left| -\frac{KzD}{2} + \sqrt{\left(\frac{KzD}{2}\right)^2 - \frac{K(zD)^2 Z_c + (K-1)zDZ_c^2}{2Z_c + zD}} \right| \approx |190 - j32| \approx |192.7 \angle 9.6^\circ| \approx 192.7 (\Omega) \quad (19)$$

同样取 LI 保护动作判据式 (21) 的上限 $K = K_{Q_{S2}} = 2.0$, 对应的系统阻抗为:

$$|Z_{m\max}| \approx |j120| \approx 120 (\Omega) \quad (20)$$

根据以上结果的对比可以获得如下结论:

a. 只要系统阻抗的幅值小于 50Ω , 在区外故障时, LI 的阻值就能够确保限制在线路阻抗附近, 由此可以保证 LI 的稳定性和其保护的可靠性;

b. 当发生区内故障时, 至少有一侧系统为电源端, 其系统阻抗必然小于 50Ω , 因此也就能够处于式 (21) 所设定辅助判据的最大限制范围内;

c. 虽然解耦算法式 (14) 调整了系统阻抗的幅值, 但是其调整的变化量是非常有限的, 根据各种实际线路和系统运行参数统计可知, 调整后的阻抗幅值绝对不会超越式 (21) 所设限制值;

d. 只要线路两端测量阻抗的幅值都大于式 (21) 辅助判据所设定的最大限值, 就能够认定没有任何一端的测量阻抗反映为电源端的等效系统阻抗, 违反了上述所设的要求, 由此可以不必进行 LI 的计算, 直接判定为区外故障;

e. 增加测量阻抗幅值的辅助判据能够可靠辅助 LI 的主判据, 构成完整可靠的纵联保护。

4 各种纵联保护的性能比较

传统的输电线路纵联保护包括电流差动保护、方向比较纵联保护和阻抗纵联保护等。本文提出了

基于 LI 的新型输电线路纵联保护。上述各种纵联保护的性能对比如表 1 所示。

由表 1 可以看出, 传统的输电线路纵联保护在所列的性能状态及动作特点等方面存在一些明显的限制或者缺陷, 如电流差动保护需要同步采样各端的电流, 这些限制或者缺陷将影响其实际使用效果; LI 虽然在数据传输量上不具有优势, 但是通过其他性能的提高, 完全可以弥补对通信信道的苛求。由于该阻抗所拥有的独特特点, 在未来的纵联保护中具有较好的推广价值和运用前景。

5 基于 LI 的纵联保护

根据上述的内容分析, 在此提出了基于分相精确解耦算法故障分量 LI 的输电线路纵联保护。该纵联保护有 3 组计算元件, 分别是纵联保护启动元件、线路各侧测量阻抗判别元件和故障分量 LI 的计算元件, 这 3 组计算元件之间通过与运算联合, 具体如式 (21) 所示。

$$\begin{cases} \Delta I_{mp}^x > 1.25 \Delta I_{mp}^{x-X} + I_0 \vee \Delta I_{mp}^x > 1.25 \Delta I_{mp}^{x-X} + I_0 \\ |\Delta Z_{m\text{侧}}| > \frac{|Z_T|}{K_P} \wedge |\Delta Z_{n\text{侧}}| > \frac{|Z_T|}{K_P} \end{cases} \quad (21)$$

$$0^\circ > \arg \Delta Z_{\text{侧}} > 180^\circ \vee K_{Q_{S1}} |z_1 D| > |\Delta Z_{\text{侧}}| \vee |\Delta Z_{\text{侧}}| > K_{Q_{S2}} |z_1 D|$$

$$\Delta I_{mp}^x = I_m(x) - I_m(x-X)$$

$$\Delta I_{mp}^{x-X} = I_m(x-X) - I_m(x-2X)$$

$$\Delta I_{np}^x = I_n(x) - I_n(x-X)$$

$$\Delta I_{np}^{x-X} = I_n(x-X) - I_n(x-2X)$$

$$|\Delta Z_{m\text{侧}}| = \left| \frac{\Delta U_{mp}}{\Delta I_{mp}} \right|$$

$$|\Delta Z_{n\text{侧}}| = \left| \frac{\Delta U_{np}}{\Delta I_{np}} \right|$$

其中, X 为单位工频周期内数据采样的点数; ΔI_{mp}^x 、 ΔI_{mp}^{x-X} 分别为 m 端当前时刻测量得到的电流和前一个测量工频周期相同时刻测量得到的电流; ΔI_{np}^x 、 ΔI_{np}^{x-X} 分别为 n 端当前时刻测量得到的电流和前一个测量工频周期相同时刻测量得到的电流; $|\Delta Z_{m\text{侧}}|$ 、 $|\Delta Z_{n\text{侧}}|$ 分别为线路两端各相的测量阻抗; $K_P = 2.0$ 为短路容量和自然传输功率设定的比值门槛; $K_{Q_{S1}} = 0.5$ 为 LI 幅值的最低门槛, $K_{Q_{S2}} = 2.0$ 为 LI 幅值的最高门槛; $I_0 = 0.2 I_N$, I_N 是系统的额定电流。

表 1 各纵联保护的性能对比

Tab.1 Comparison of performance among various pilot protections

保护类型	数据传输量	同步采样	可靠性	电力系统振荡后的可靠性	长距离线路电容	分相跳闸
方向比较纵联保护	最小	不需要同步采样	受大电源系统的影响	不可靠	不需要补偿	需要选相元件配合
电流差动保护	较大	需要同步采样	最可靠	可靠	需要补偿	可自选相跳闸
阻抗纵联保护	最小	不需要同步采样	受系统运行方式和故障电阻等因素影响	有影响	可以忽略	需要选相元件配合
使用 LI 的纵联保护	较大	不需要同步采样	较可靠	可靠	不需要补偿	可自选相跳闸

6 动模仿真验证

在本文所示动模仿真中,系统的额定电压为 750 kV。

6.1 动模仿真模型及结果

在兰州东至咸阳的继电保护动模试验系统中,建立了 750 kV 输电线路模型,整个系统是由中国电力科学研究院牵头,将实际输电系统通过实验室以真实的器件构建的缩小模型,其中输电线路部分是由真实器件构建的小模型串联而成的。其中,输电线路的主要参数为: $D=497\text{ km}$, $z_1 D=133.34\angle 87^\circ\ \Omega$, $r_1=0.01217\ \Omega/\text{km}$, $r_0=0.2729\ \Omega/\text{km}$, $l_1=0.8531\ \text{mH}/\text{km}$, $l_0=2.674\ \text{mH}/\text{km}$, $c_1=0.0137\ \mu\text{F}/\text{km}$, $c_0=0.0093\ \mu\text{F}/\text{km}$ 。

在线路中,对所发生各种类型故障其故障电阻的设置值为:金属性故障, $R_F=1.0\times 10^{-5}\ \Omega$;单相高阻接地故障, $R_F=400\ \Omega$;相间高阻短路和两相高阻接地故障, $R_F=100\ \Omega$ 。在动模系统中主要发电机的参数见表 2, $X'_{d\Sigma}$ 、 $X''_{d\Sigma}$ 为标么值。

表 2 动模系统主要发电机参数
Tab.2 Main generator parameters of dynamic emulation system

发电机序号	单位容量/ MW	参数		
		$\cos\varphi$	$X'_{d\Sigma}$	$X''_{d\Sigma}$
3G	850	0.85	0.316	0.251
4G	850	0.85	0.323	0.241
5G	850	0.85	0.314	0.251
11G	2550	0.85	0.312	0.194

系统接线图见图 6,图中 1 号、2 号和 3 号并联电抗器的容量分别为 $3\times 100\ \text{Mvar}$,4 号并联电抗器的容量为 $3\times 90\ \text{Mvar}$ 。故障位置 k_{10} 、 k_{11} 和 k_{12} 位于被

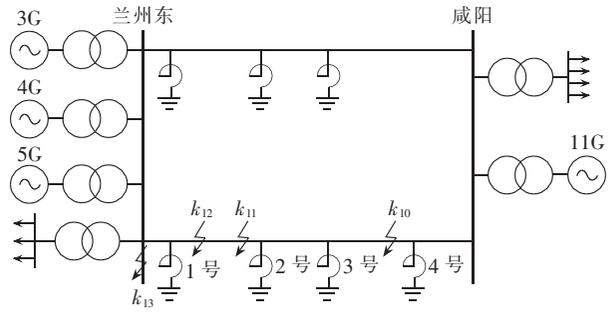


图 6 兰州东—咸阳动模试验故障位置示意图
Fig.6 Fault positions for dynamic emulation test of East Lanzhou-Xianyang

保护区内, k_{13} 位于被保护区外。

表 3—5 为动模仿真的验证结果。

6.2 结果分析

从表 3—5 所示仿真结果可获得以下结论。

- 对于外部故障,所有的 LI 都反映为被保护线路的正序阻抗,能确保纵联保护的可靠性。
- 对于内部故障,它们都趋向于系统阻抗负的相量和,同样可确保纵联保护的灵敏性。

表 3 m 侧动模仿真的验证结果
Tab.3 Verification results of dynamic emulation test at m side

故障位置	故障类型	R_F/Ω	$ \Delta Z_{mqa} /\Omega$	$ \Delta Z_{mqb} /\Omega$	$ \Delta Z_{mqc} /\Omega$
k_{10}	BG	400	$164+j177$	$48-j50$	$169+j158$
k_{11}	ABC	0	$56-j53$	$69-j45$	$56-j42$
k_{11}	AG	400	$98-j40$	$91+j133$	$56+j176$
k_{11}	BC	0	$88+j166$	$102-j17$	$46+j69$
k_{12}	AG	0	$32+j7$	$53-j21$	$-68-j15$
k_{13}	BCG	0	$84+j59$	$41-j85$	$97-j57$
k_{13}	BC	0	$69-j20$	$-10-j17$	$126-j25$

注:辅助判据 $|\Delta Z_{mqpc}| > 125.00\ \Omega$ 。

表 4 n 侧动模仿真的验证结果

Tab.4 Verification results of dynamic emulation test at n side

故障位置	故障类型	R_F/Ω	$ \Delta Z_{nqa} /\Omega$	$ \Delta Z_{nqb} /\Omega$	$ \Delta Z_{nqc} /\Omega$	辅助判据结果
k_{10}	BG	400	$-47-j38$	$18+j6$	$-111-j57$	不定
k_{11}	ABC	0	$-33-j41$	$-36-j56$	$-23-j52$	不定
k_{11}	AG	400	$-99-j106$	$-5+j19$	$-92-j62$	不定
k_{11}	BC	0	$-68-j37$	$92-j30$	$-89-j129$	不定
k_{12}	AG	0	$13-j34$	$-56+j166$	$131+j193$	不定
k_{13}	BCG	0	$-72+j86$	$-29+j225$	$-75+j186$	不定
k_{13}	BC	0	$-81+j174$	$11+j156$	$-108+j153$	不定

注:辅助判据 $|\Delta Z_{mqpc}| > 125.00\ \Omega$ 。

表 5 纵向阻抗动模仿真的验证结果

Tab.5 Verification results of dynamic emulation test for LI

故障位置	故障类型	R_F/Ω	$ \Delta Z_{qqa} /\Omega$	$ \Delta Z_{qpb} /\Omega$	$ \Delta Z_{qpc} /\Omega$	跳闸相别
k_{10}	BG	400	$117+j141$	$67-j54$	$38+j100$	B
k_{11}	ABC	0	$23-j194$	$33-j200$	$32-j193$	ABC
k_{11}	AG	400	$-2-j146$	$84+j156$	$-46+j108$	A
k_{11}	BC	0	$20+j132$	$195-j47$	$-43-j62$	BC
k_{12}	AG	0	$45-j27$	$-4+j145$	$63+j186$	A
k_{13}	BCG	0	$12+j127$	$12+j140$	$22+j129$	无
k_{13}	BC	0	$-12+j149$	$1+j140$	$18+j127$	无

注:LI 判据 $180^\circ < \arg \Delta Z_{mqpc} < 0^\circ$, $|\Delta Z_{mqpc}| < 66.68\ \Omega$, $|\Delta Z_{mqpc}| > 266.70\ \Omega$ 。

c. 当内部故障发生时,对于故障相,至少一端计算所得的测量阻抗明显小于式(21)所设限值,这个结果满足对系统阻抗识别的附加要求。

d. LI 的结果基本没有受线路长度和额定电压等因素的影响。

e. 文献[14]采用 500 kV、300 km EMTP 分布参数型的仿真模型,该阻抗幅值判据设置的动作范围为:

$$|\Delta Z_{\text{opp}}| < 0.2 |z_1 D| \vee |\Delta Z_{\text{opp}}| > 3 |z_1 D| \quad (22)$$

由于文献[14]没有记载设置式(22)(取自文献[14]的式(9)—(11))的理论依据,由此可以推测上述设置基本参照仿真数据的分布特点而人为设定,其数据分布范围相对分散。

f. 本文所用动模模型的电压等级和线路长度均高于文献[14],因此受线路分布电容等因素的影响也明显大于文献[14]。判据式(21)阻抗幅值变化范围明显小于式(22),并且有充分的理论依据,其仿真结果也充分证实了上述理论分析的准确性。

g. 本文与文献[14]最大的区别和改进之处在于增加了耦算法并且考虑了系统与线路参数间的相互影响。由此可以认定本文所述方法使 LI 计算结果的稳定性较文献[14]有明显的提高。

7 结论

基于单相和三相线路模型,完成了对 LI 状态和性能的分析,由此充分证明对于外部故障,LI 为被保护线路的正序阻抗,它能够确保相关纵联保护的安全和可靠性;对于内部故障,LI 是外部等效系统阻抗的相量和,它可以确保相关纵联保护的有效和灵敏度。LI 的一个重要性能是有能力避免线路分布电容和数据不同步采样所带来的负面影响,它所具有的准确的解耦算法可满足实际需要,同时所配的辅助判据从原理上能够弥补 LI 所反映数值发散的问题,因此本文所提的纵联保护能够适用于各种运行环境。同样,动模仿真结果证明 LI 及相关纵联保护具有更高的可靠性和适应性。

参考文献:

[1] 张源会,贺家李,宋从矩. 相电压补偿式方向继电器及其微机保护[J]. 天津大学学报,1996,29(5):647-653.
ZHANG Yuanhui, HE Jiali, SONG Congju. Phase voltage compensator type directional relay and that relay based microprocessor protection system[J]. Journal of Tianjin University, 1996, 29(5):647-653.

[2] 贾贵玺,梁斌,贺家李. 光纤通讯微机保护系统设计[J]. 电力系统及其自动化学报,2006,18(2):95-98.
JIA Guixi, LIANG Bin, HE Jiali. System design of microproces-

sor-based protection using optical fiber communication[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2006, 18(2):95-98.

[3] 陆晓军,裴会军,黄富才. 线路电流差动保护自适应 CT 变比的方法[J]. 继电器,2004,32(6):20-21.
LU Xiaojun, NIE Huijun, HUANG Fucui. A method of CT ratio self-adaptation of line differential protection[J]. Relay, 2004, 32(6):20-21.

[4] 索南加乐,谢雯洁,沈黎明,等. 解决电压互感器二次侧故障对距离保护影响的新方法[J]. 电力系统自动化,2008,32(23):56-61.
SUONAN Jiale, XIE Wenjie, SHEN Liming, et al. New method for solving potential transformer secondary side fault's effect on distance protection based on parameter identification[J]. Automation of Electric Power Systems, 2008, 32(23):56-61.

[5] 汤俊,王晓茹,桑丙玉. 稳态量分相电流差动保护判据制动特性的改进[J]. 电力系统自动化,2008,32(11):44-48.
TANG Jun, WANG Xiaoru, SANG Bingyu. Improvement on restraining characteristic of a dispersed phase current differential protection criterion using steady currents[J]. Automation of Electric Power Systems, 2008, 32(11):44-48.

[6] 郭征,贺家李. 输电线纵联差动保护的新原理[J]. 电力系统自动化,2004,28(11):1-5.
GUO Zheng, HE Jiali. Novel principle of pilot differential relay protection of transmission lines[J]. Automation of Electric Power Systems, 2004, 28(11):1-5.

[7] 文明浩,陈德树,尹项根. 超高压长线相量差动保护的研究[J]. 电力系统自动化,2000,24(20):37-40.
WEN Minghao, CHEN Deshu, YIN Xianggen. Study of current phasor differential protection for long UHV transmission line [J]. Automation of Electric Power Systems, 2000, 24(20):37-40.

[8] 薛士敏,贺家李,李永丽. 故障分量分相补偿式方向元件[J]. 电力系统自动化,2007,31(2):36-40.
XUE Shimin, HE Jiali, LI Yongli. Segregated phase compensator type directional relay based on the fault component[J]. Automation of Electric Power Systems, 2007, 31(2):36-40.

[9] 袁兆强,张承学. 超(特)高压输电线路高速行波差动保护[J]. 电力自动化设备,2012,32(3):13-17.
YUAN Zhaoqiang, ZHANG Chengxue. High speed traveling wave differential protection for EHV/UHV transmission line[J]. Electric Power Automation Equipment, 2012, 32(3):13-17.

[10] 葛耀中. 新型继电保护与故障测距原理与技术[M]. 西安:西安交通大学出版社,1996:63-143.

[11] 李捷,苗世洪,刘沛,等. 基于分相有功功率差动原理的线路高阻接地保护判据[J]. 电网技术,2011,35(8):197-201.
LI Jie, MIAO Shihong, LIU Pei, et al. A protection criterion for high resistance grounding of transmission line based on phase-segregated active power differential principle[J]. Power System Technology, 2011, 35(8):197-201.

[12] 索南加乐,许庆强,宋国兵,等. 正序电压电流补偿的方向元件[J]. 电力系统自动化,2004,28(24):51-55.
SUONAN Jiale, XU Qingqiang, SONG Guobing, et al. A reliable directional relay based on positive sequence compensated voltage and current components[J]. Automation of Electric Power Systems, 2004, 28(24):51-55.

[13] 李捷,苗世洪,刘沛,等. 同杆双回路跨线接地故障的距离保护

- 算法研究[J]. 中国电机工程学报,2011,35(8):197-201.
- LI Jie,MIAO Shihong,LIU Pei,et al. A protection criterion for high resistance grounding of transmission line based on phase-segregated active power differential principle[J]. Proceedings of the CSEE,2011,35(8):197-201.
- [14] 索南加乐,张恽宁,粟小华,等. 基于故障分量的分相阻抗差动保护新原理[J]. 电力系统自动化,2008,32(4):41-45,58.
- SUONAN Jiale,ZHANG Yining,SU Xiaohua,et al. Novel principle investigation of segregated phase impedance differential protection based on fault components[J]. Automation of Electric Power Systems,2008,32(4):41-45,58.
- [15] 杨奇逊,黄少锋. 微机继电保护基础[M]. 3版. 北京:中国电力出版社,2007:105-112.
- [16] 夏经德,索南加乐,王莉,等. 基于纵联阻抗幅值的输电线路纵联保护[J]. 电力系统保护与控制,2011,39(4):43-51.
- XIA Jingde,SUONAN Jiale,WANG Li,et al. A transmission line pilot protection based on the amplitude of the pilot impedance[J]. Power System Protection and Control,2011,39(4):43-51.
- [17] 夏经德,索南加乐,王志恩,等. 基于纵联阻抗相角的输电线路纵联保护[J]. 电力自动化设备,2011,31(5):20-27.
- XIA Jingde,SUONAN Jiale,WANG Zhien,et al. Transmission line pilot protection based on pilot impedance angle[J]. Electric Power Automation Equipment,2011,31(5):20-27.
- [18] 刘凯,索南加乐,邓旭阳,等. 基于故障分量正序、负序和零序综合阻抗的线路纵联保护新原理[J]. 电力自动化设备,2010,30(4):21-25.
- LIU Kai,SUONAN Jiale,DENG Xuyang,et al. Principle of pilot line protection based on integrated impedance of fault component[J]. Electric Power Automation Equipment,2010,30(4):21-25.
- [19] 索南加乐,杨铖,邵文权,等. 基于模量的线路模型识别纵联保护新原理[J]. 电力自动化设备,2009,29(10):21-24,68.
- SUONAN Jiale,YANG Cheng,SHAO Wenquan,et al. Model recognition longitudinal protection based on modules for transmission lines[J]. Electric Power Automation Equipment,2009,29(10):21-24,68.
- [20] 索南加乐,邓旭阳,李瑞生,等. 基于故障分量综合阻抗的 T 接线路纵联保护新原理[J]. 电力自动化设备,2009,29(12):4-9.
- SUONAN Jiale,DENG Xuyang,LI Ruisheng,et al. Principle of T-type transmission line pilot protection based on fault component comprehensive impedance[J]. Electric Power Automation Equipment,2009,29(12):4-9.

作者简介:

夏经德(1961-),男,江苏泰州人,高级工程师,博士,研究方向为电力系统继电保护(E-mail:ylmxjd480020@163.com);

索南加乐(1960-2013),男,新疆乌鲁木齐人,教授,博士研究生导师,博士,主要研究方向为电力系统继电保护;

张恽宁(1973-),男,内蒙古赤峰人,高级工程师,博士,主要研究方向为电力系统继电保护;

王斌(1988-),男,北京人,硕士研究生,主要研究方向为电力系统继电保护;

邵文权(1978-),男,湖北宜昌人,副教授,博士,主要研究方向为电力系统继电保护;

何世恩(1961-),男,宁夏吴忠人,教授级高级工程师,博士研究生,主要研究方向为电力系统继电保护。

Improved pilot protection based on longitudinal impedance of decoupled transmission line

XIA Jingde^{1,2}, SUONAN Jiale², ZHANG Yining^{2,3}, WANG Bin², SHAO Wenquan^{1,2}, HE Shien^{2,4}

(1. School of Electronic Information, Xi'an Polytechnic University, Xi'an 710048, China;

2. School of Electric Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China;

3. Test & Maintenance Center, CSG EHV Power Transmission Company, Guangzhou 510663, China;

4. Gansu Electric Power Company, Lanzhou 730050, China)

Abstract: Based on the LI(Longitudinal Impedance) characteristic of single-phase model, an accurate decoupling algorithm of LI for three-phase model is proposed, which ensures its theoretical reliability. An improved pilot protection applying the LI of fault component is thus proposed for transmission line. When external fault occurs, its LI is equal to the positive-sequence impedance of line; when internal fault occurs, it is equal to the negative phasor sum of the positive-sequence impedances of equivalent system. The proposed protection scheme has sensitive operation and reliable performance, avoiding the synchronous sampling of electrical variables at each terminal of line. The composite influence of system impedance and line capacitance on LI is analyzed and an auxiliary criterion is added, which makes the proposed protection scheme suitable for various operational environments. Simulative results show its correctness.

Key words: electric power transmission; pilot protection; relay protection; fault component; longitudinal impedance