

小电阻接地配电网多回线故障分析与自适应零序电流保护

曾德辉¹, 王 钢¹, 李海锋¹, 刘胤良¹, 郭敬梅²

(1. 华南理工大学 电力学院, 广东 广州 510640; 2. 广东电网有限责任公司电力科学研究院, 广东 广州 510080)

摘要: 当小电阻接地配电网发生同母多回线接地故障时, 每条馈线的零序电流相比于单回线故障时有较大差别, 馈线零序电流保护可能不正确动作。为此, 首先推导了发生多回线同名相单相接地与单回线单相接地故障时馈线零序电流间的关系, 揭示了保护不正确动作机理。提出了考虑负荷且能适用于不同类型多回线接地故障的零序电流计算方法。基于实际变电站参数搭建 RTDS 仿真模型, 分析了不同类型多回线接地故障对零序电流保护的影响。在此基础上, 提出了自适应馈线零序电流保护方案, 利用故障前电压等参数将发生多回线接地故障时的零序电流修正为发生单回线接地故障时的零序电流, 在不改变原有保护定值的情况下使零序电流保护能够自主适应于不同类型的多回线接地故障。基于 RTDS 和自主研发的保护测控装置的测试结果表明, 所提保护方案不受负荷电流的影响, 能够在不同类型的多回线接地故障发生时正确动作, 且能够提高馈线零序电流保护对过渡电阻的耐受能力。

关键词: 配电网; 小电阻接地; 多回线故障; 零序电流保护; 故障分析; 继电保护

中图分类号: TM 761

文献标识码: A

DOI: 10.16081/j.issn.1006-6047.2019.05.007

0 引言

相比于经消弧线圈接地方式, 小电阻接地系统能更准确地定位故障和排除故障, 降低过电压, 被越来越多的大中城市配电网所采用^[1-5]。小电阻接地配电网由于存在零序电流通路, 在不对称接地故障发生后, 零序电流较大, 一般会采用相应的零序电流保护清除故障^[6-7]。同时, 随着同塔多回架空线和同沟多回电缆得到越来越多的应用, 配电网发生同母多回线同时或相继接地故障的概率大幅增加, 此时的零序电流将出现与发生单回线接地故障时不同的特征^[8-9]。

目前针对小电阻接地系统零序电流保护的研究主要集中在单回线接地故障方面^[10-11]。相比单回线故障, 发生同母多回线同名相接地故障时, 馈线零序电流因分流而大幅减小, 可能导致零序保护拒动, 甚至会造成母线接地变压器的零序保护越级误动, 扩大停电范围。而发生同母多回线异相接地故障时, 零序电流会显著增大, 可能导致零序保护误动。为此, 工程上主要采用延长母线接地变压器零序电流保护的时间和降低馈线零序电流保护定值等方法^[10-11], 但这些方法降低了变压器保护的速动性, 也无法解决馈线零序保护误动的问题。因此, 需要进一步提高小电阻接地配电网馈线零序电流保护的灵敏性和选择性。

对此, 文献[12]提出了一种适用于配电网发生相继接地故障情况的零序保护定值整定方法, 但所

提定值整定方法的依据主要是现场运行和继电保护整定经验, 没有严格的理论推导, 且仅能适用于多回线发生相继接地故障的情况。文献[13]推导了单回线和多回线接地故障零序电流关系, 提出了相应的零序电流计算方法和保护方案。然而, 该方法以忽略线路负荷电流为前提, 不符合工程实际。此外, 该方法仅适用于多回线同相接地故障, 不适用于异相接地等其他故障类型。因此, 亟需针对小电阻接地配电网同母多回线故障进行较为全面的理论分析, 构建能够适用于不同类型多回线接地故障且不受负荷影响的零序电流保护方案。

对此, 本文首先对小电阻接地配电网单回线及多回线接地故障进行了理论分析, 得出了多回线与单回线发生接地故障时馈线零序电流关系, 进而提出了考虑负荷且能适用于不同类型多回线接地故障的零序电流计算方法。在此基础上, 提出了一种自适应馈线零序电流保护方案, 利用故障前电压等参数将不同类型多回线接地故障情况下的零序电流修正为单回线空载接地故障情况下的零序电流, 从而在不改变原有保护定值的情况下使馈线零序电流保护能够自主地适应不同类型的多回线接地故障。最后基于 RTDS 和自主研发的保护测控装置对所提保护方案进行了验证。

1 小电阻接地系统多回线接地故障分析

基于单回线的传统零序电流保护原理在发生同母多回线故障时可能会不正确动作。然而, 以往针对这一问题的研究大多依赖于仿真, 对其机理的解释不够明确。因此, 本节将从理论上揭示发生多回线故障时传统零序保护可能拒动或误动的原理。

收稿日期: 2018-08-21; **修回日期:** 2019-03-27

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51477057)

Project supported by the National Natural Science Foundation of China(51477057)

小电阻接地配电网如图 1 所示。图中, U_s 为系统电压; Z_s 为系统阻抗; Z_{T0} 为接地变零序阻抗; R_0 为中性点接地电阻; L_1-L_n 为连接于同一母线的 n 条馈线。

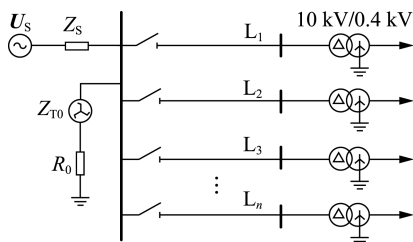


图 1 小电阻接地配电网

Fig.1 Low-resistance grounding distribution network

1.1 单回线单相接地

为了分析单回线接地故障与多回线接地故障零序电流之间的关系,首先给出单回线接地故障的零序电流计算方法。以带负荷的 L_1 单独发生 A 相金属性接地故障为例,其复合序网如图 2 所示。

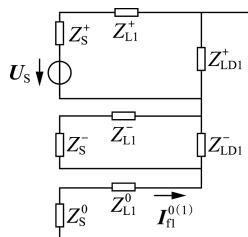


图 2 单回线单相接地故障复合序网

Fig.2 Complex sequence network of single-phase grounding fault of single feeder

图中, Z_s^+ 、 Z_s^- 和 Z_s^0 分别为系统正序、负序和零序阻抗, $Z_s^+ = Z_T^+ + 3R_0$, $Z_s^+ = Z_s^-$; Z_{L1}^+ 、 Z_{L1}^- 和 Z_{L1}^0 分别为故障点之前的正序、负序和零序阻抗,且 $Z_{L1}^+ = Z_{L1}^-$; Z_{LD1}^+ 和 Z_{LD1}^- 分别为馈线 L_1 故障点之后的线路阻抗与负荷阻抗之和的正、负序分量; $I_{f1}^{(1)}$ 为 L_1 的零序电流。

为便于叙述,下文中上标 (m) 表示 m 条馈线发生故障、下标数字代表线路编号。

假设负荷的正、负序阻抗相等,由图 2 可得发生单回线单相接地故障时的零序电流如式(1)所示。

$$I_{f1}^{(1)} = \frac{U_s}{2(Z_s^+ + Z_{L1}^+) + (Z_s^0 + Z_{L1}^0)(Z_s^+ + Z_{L1}^+)/Z_{LD1}^+ + (Z_s^+ + Z_{L1}^0)} \quad (1)$$

由式(1)可知,对于小电阻接地系统,由于 Z_s^0 较大, $(Z_s^0 + Z_{L1}^0)(Z_s^+ + Z_{L1}^+)/Z_{LD1}^+$ 这一项不能忽略,因此,计算小电阻接地系统的零序电流必须考虑负荷的影响。

可令 $Z_{L1}^0 = kZ_{L1}^+$, 则当线路空载时,式(1)可变为:

$$I_{f1}^{(1)} = \frac{U_s}{Z_{L1}^+(k+2) + 2Z_s^+ + Z_s^0} \quad (2)$$

式(2)为后续的多回线零序电流修正计算奠定了基础。

1.2 同母多回线同名相单相接地

从对零序电流保护影响的角度考虑,多回线同相接地故障最值得关注^[9,13],因此,本节分析这种故障类型对传统零序电流保护的影响机理。当带负荷的 m 条馈线在同一位置发生同名相单相金属性接地故障时,其正序网如图 3 所示。

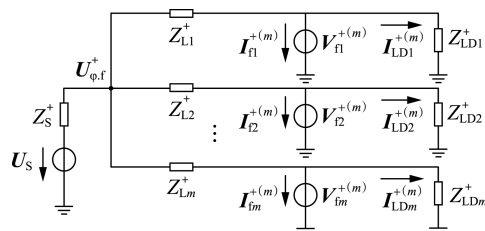


图 3 多回线单相接地故障正序网

Fig.3 Positive-sequence network of single-phase grounding fault of multi-feeders

图中, $U_{\phi,f}^+$ 为母线正序电压; $I_{f1}^{(m)}$ 、 $I_{f2}^{(m)}$ 、 $\dots$ 、 $I_{fm}^{(m)}$ 和 $I_{LD1}^{(m)}$ 、 $I_{LD2}^{(m)}$ 、 $\dots$ 、 $I_{LDm}^{(m)}$ 分别为各馈线正序电流的故障分量和负荷分量; $V_{f1}^{(m)}$ 、 $V_{f2}^{(m)}$ 、 $\dots$ 、 $V_{fm}^{(m)}$ 为各馈线的故障点正序电压; Z_{LD1}^+ 、 Z_{LD2}^+ 、 $\dots$ 、 Z_{LDm}^+ 为各馈线故障点后线路和负荷正序阻抗之和。由图 3 可得:

$$U_{\phi,f}^+ = U_s - Z_s^+ \sum_{i=1}^m (I_{fi}^{(m)} + I_{LDi}^{(m)}) \quad (3)$$

$$U_{\phi,f}^+ = Z_{L1}^+ (I_{f1}^{(m)} + I_{LD1}^{(m)}) + Z_{LD1}^+ I_{LD1}^{(m)} \quad (4)$$

负序网是在正序网的基础上将系统电源置零,同理可得:

$$U_{\phi,f}^- = -Z_s^- \sum_{i=1}^m (I_{fi}^{(m)} + I_{LDi}^{(m)}) \quad (5)$$

$$U_{\phi,f}^- = Z_{L1}^- (I_{f1}^{(m)} + I_{LD1}^{(m)}) + Z_{LD1}^- I_{LD1}^{(m)} \quad (6)$$

由于配电负荷侧不存在零序回路,同理可得:

$$U_{\phi,f}^0 = -Z_s^0 \sum_{i=1}^m I_{fi}^{(m)} \quad (7)$$

$$U_{\phi,f}^0 = Z_{L1}^0 I_{f1}^{(m)} + V_{f1}^{(m)} \quad (8)$$

其中, $U_{\phi,f}^0$ 为母线零序电压; $I_{fi}^{(m)}$ 为 L_1 的零序电流; $V_{f1}^{(m)}$ 为 L_1 的故障点零序电压。

首先分析各回线负荷相同的情况。由于 $Z_s^+ = Z_s^-$, 则根据故障边界条件联立式(3)、(5)得:

$$U_{\phi,f}^+ + U_{\phi,f}^- = U_s - 2m Z_s^+ I_{f1}^{(m)} - m Z_s^+ (I_{LD1}^{(m)} + I_{LD1}^{(m)}) \quad (9)$$

设负荷的正负序阻抗相等,联立(4)、(6)可得:

$$U_{\phi,f}^+ + U_{\phi,f}^- = 2Z_{L1}^+ I_{f1}^{(m)} + (Z_{L1}^+ + Z_{LD1}^+) (I_{LD1}^{(m)} + I_{LD1}^{(m)}) \quad (10)$$

由于故障点故障相电压为 0,可得:

$$Z_{LD1}^+ (I_{LD1}^{(m)} + I_{LD1}^{(m)}) - (Z_{L1}^0 + mZ_s^0) I_{f1}^{(m)} = 0 \quad (11)$$

联立式(9)~(11)可得到同母 m 回线发生同名

单相相接地故障时零序电流的表达式为:

$$I_{f1}^{(0(m))} = \frac{U_s}{2(mZ_s^+ + Z_{L1}^+) + (Z_{L1}^+ + Z_{LD1}^+ + mZ_s^+)(Z_{L1}^0 + mZ_s^0)/Z_{LD1}^+} \quad (12)$$

考虑实际情况,可将式(12)进行简化。通常系统正序阻抗与线路正序阻抗之和远小于负荷阻抗,故有 $(Z_{L1}^+ + Z_{LD1}^+ + mZ_s^+)/Z_{LD1}^+ \approx 1$ 。令 $Z_{L1}^0 = kZ_{L1}^+$,则由式(12)可得:

$$I_{f1}^{(0(m))} \approx \frac{U_s}{Z_{L1}^+(2+k) + m(2Z_s^+ + Z_s^0)} \quad (13)$$

由于 Z_s^0 较大且配电网线路较短,即 $(2Z_s^+ + Z_s^0) \gg Z_{L1}^0 + 2Z_{L1}^+$,则比较式(2)和(13)可知同母 m 回线发生同名相单相接地故障时的零序电流约为发生单回线故障时零序电流的 $1/m$,即:

$$I_{f1}^{(0(1))} \approx m I_{f1}^{(0(m))} \quad (14)$$

此时,馈线零序保护可能拒动。

当各回线所带负荷不同时,以两回线发生同名相单相金属性接地故障为例,由式(4)、(6)和(8)可得:

$$U_{\varphi,f} = Z_{L1\Sigma} I_{f1}^{(0(2))} + Z_{L1}^+ (I_{LD1}^{+(2)} + I_{LD1}^{-(2)}) = Z_{L2\Sigma} I_{f2}^{(0(2))} + Z_{L2}^+ (I_{LD2}^{+(2)} + I_{LD2}^{-(2)}) \quad (15)$$

其中, $Z_{L1\Sigma}$ 和 $Z_{L2\Sigma}$ 分别为各馈线故障点前的各序线路阻抗之和。由式(15)可得两馈线的零序电流为:

$$I_{f1}^{(0(2))} = \frac{U_{\varphi,f} - Z_{L1}^+ (I_{LD1}^{+(2)} + I_{LD1}^{-(2)})}{Z_{L1\Sigma}} \quad (16)$$

$$I_{f2}^{(0(2))} = \frac{U_{\varphi,f} - Z_{L2}^+ (I_{LD2}^{+(2)} + I_{LD2}^{-(2)})}{Z_{L2\Sigma}} \quad (17)$$

由式(16)、(17)可知,2条故障馈线的零序电流会受负荷的影响而出现较大差别,可能出现1条馈线的零序电流大于定值而另一条馈线的零序电流小于定值的情况。此时,两回线的零序保护相继动作,总动作时间延长。此外,不同故障线路的故障点距母线的电气距离不同(线路参数不同或故障位置不同),同样会导致2条馈线的零序电流出现较大差别,进而导致零序保护相继动作。该结论将在第2节通过仿真进行进一步的分析

1.3 同母多回线异相接地故障

相比于多回线同名相接地故障,异相接地故障发生概率更高。此时,相当于母线发生相间短路的情况,每条馈线的零序电流远大于单回线单相接地时的零序电流,可能引起零序保护越级误动作。为分析零序保护的选择性需要准确计算零序电流,然而对于这种类型的故障,目前多采用基于多端口理论的复故障计算方法^[14],该方法由于需要计算各序网的端口阻抗,过程繁琐且不够直观。对此,本节给

出了一种简洁有效的计算方法。以两回线发生此类故障为例,当 L_1 和 L_2 分别发生 B 相和 C 相金属性接地故障时,可得到基于理想变压器的故障复合序网如附录中图 A1 所示^[14]。由图 A1 可得回路电流方程如式(18)所示。

$$\begin{cases} (Z_s^+ + Z_{L1}^+ + Z_{LD1}^+) I_{L1}^+ + Z_s^+ I_{L2}^+ - a Z_{LD1}^+ I_{f1}^0 = U_s \\ Z_s^+ I_{L1}^+ + (Z_s^+ + Z_{L2}^+ + Z_{LD2}^+) I_{L2}^+ - a^2 Z_{LD2}^+ I_{f2}^0 = U_s \\ (Z_s^- + Z_{L1}^- + Z_{LD1}^-) I_{L1}^- + Z_s^- I_{L2}^- - a^2 Z_{LD1}^- I_{f1}^0 = 0 \\ Z_s^- I_{L1}^- + (Z_s^- + Z_{L2}^- + Z_{LD2}^-) I_{L2}^- - a Z_{LD2}^- I_{f2}^0 = 0 \\ -a^2 Z_{LD1}^+ I_{L1}^+ - a Z_{LD1}^- I_{L1}^- + (Z_s^0 + Z_{L1}^0 + Z_{LD1}^+ + Z_{LD1}^-) I_{f1}^0 + Z_s^0 I_{f2}^0 = 0 \\ -a Z_{LD2}^+ I_{L2}^+ - a^2 Z_{LD2}^- I_{L2}^- + Z_s^0 I_{f1}^0 + (Z_s^0 + Z_{L2}^0 + Z_{LD2}^+ + Z_{LD2}^-) I_{f2}^0 = 0 \end{cases} \quad (18)$$

其中, $a = e^{j120^\circ}$ 。此时的馈线零序电流可直接由式(18)计算得到。类似地,当更多回线发生异相或同相接地故障时,可由相应故障复合序网列写回路电流方程。而相应的故障复合序网可在图4的母线节点上并联更多的故障支路得到^[14]。据此,可得到 m 回线发生任意相接地故障时的零序电流求解方程如下:

$$\begin{bmatrix} Z^+ & 0 & -K_1 Z_{LD}^+ \\ 0 & Z^- & -K_2 Z_{LD}^- \\ -K_2 Z_{LD}^+ & -K_1 Z_{LD}^- & Z^0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I^+ \\ I^- \\ I^0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} U_s^+ \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (19)$$

其中, I^+ 、 I^- 和 I^0 分别为各馈线正序、负序和零序电流列向量; U_s^+ 为系统电压列向量。阻抗矩阵中的所有子矩阵均为 $m \times m$ 方阵,其定义如下:

- 矩阵 Z^+ 的对角线元素为 $Z_{ii}^+ = Z_s^+ + Z_{Li}^+ + Z_{LDi}^+$, 非对角线元素均为 Z_s^+ ;
- Z^- 与 Z^+ 类似,但所有元素均为负序阻抗;
- Z^0 的对角线元素为 $Z_{ii}^0 = Z_s^0 + Z_{Li}^0 + Z_{LDi}^+ + Z_{LDi}^-$, 为非对角线元素均为 Z_s^0 ;
- Z_{LD}^+ 和 Z_{LD}^- 的对角线元素分别为 Z_{LDi}^+ 和 Z_{LDi}^- , 非对角线元素均为 0;
- K_1 和 K_2 为对角线矩阵, $K_2 = 1/K_1$, K_1 的对角线元素可表示为式(20)。

$$K_{ii} = \begin{cases} 1 & \text{馈线 } i \text{ A 相故障} \\ a & \text{馈线 } i \text{ B 相故障} \\ a^2 & \text{馈线 } i \text{ C 相故障} \end{cases} \quad (20)$$

求解式(19)即可得到同母多回线同名相或异相发生单相接地故障时各馈线的零序电流,为分析零序保护在发生不同类型的多回线接地故障时的灵敏性和选择性提供依据。

2 多回线故障仿真分析

为验证第1节的理论分析,并以东莞市某变电站 10 kV 系统为依据基于 RTDS 搭建如图1所示的

小电阻接地配电网。模型中, $Z_s^+ = j0.392 \Omega$; 每相 $Z_{T0} = j12 \Omega, R_0 = 12 \Omega$ 。该变电站 10 kV 馈线的分段处未装设保护, 故只有零序保护 I 段动作于跳闸, 根据线路长短和参数, 保护定值为 3 A 或 4 A, 时间定值为 0.3 s; 零序保护 II 段动作于告警, 保护定值为 1.25 A, 时间定值为 1.25 s。

模型中共四回线, 均为电缆-架空线混合线路, 电缆型号为 YJV-3×300, 其正序和零序阻抗分别为 $0.06+j0.089 \Omega/\text{km}$ 和 $0.6+j0.267 \Omega/\text{km}$ [15]。各馈线的电缆长度均为 8 km, 电缆末端有型号为 LGJ-185 的架空线路, 其正序和零序阻抗分别为 $0.158+j0.36 \Omega/\text{km}$ 和 $0.474+j1.08 \Omega/\text{km}$ 。架空线长度分别为 1.5 km、1.2 km、1 km 和 0.8 km。每回线最大输送有功功率为 10 MW, 功率因数均为 0.85。测试中零序保护定值均为 4 A (零序互感器变比为 250 A:5 A), 零序保护正方向判据为 $-90^\circ < \arg(U_0/I_0) < -270^\circ$ [16]。

图 4 为距母线 4 km 处发生两回线 A 相金属性接地故障时, 零序电流有效值 $I_{f1}^{0(2)}$ 和 $I_{f2}^{0(2)}$ 及零序电流相对于零序电压的相角 φ_{f1}^0 和 φ_{f2}^0 与负荷的关系。

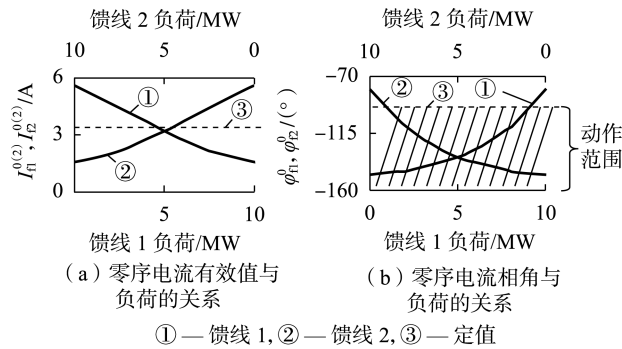


图 4 零序电流有效值、相角与负荷的关系

Fig.4 Relationship between RMS and phasor of zero-sequence current, and load

由图 4 可知, 当两回线发生同名相单相接地故障时, 若负荷相同, 则各馈线的零序电流约等于最大零序电流的一半。当负荷相差较大时, 两回线的零序电流差别很大, 甚至会出现发生正方向故障但零序电流为反方向的情况, 严重影响零序保护的正确动作。

图 5 为 L_1 和 L_2 在不同距离发生 A 相金属性接地故障时的零序电流有效值 $I_{f1}^{0(2)}$ 和 $I_{f2}^{0(2)}$ 及相角 φ_{f1}^0 和 φ_{f2}^0 。由图 5 可知, 当发生两回线同名相单相接地故障时, 零序电流的大小和相位均受故障距离的影响, 同样会出现发生正方向故障但零序电流为反方向的情况。

综上所述, 当小电阻接地配电网发生同母多回线同名相或异相单相接地故障时, 馈线零序保护可能拒动或误动。此外, 负荷和故障电气距离的变化会导致不同馈线零序电流发生显著变化, 从而降低零序保护的灵敏性。因此, 有必要从算法上改进原

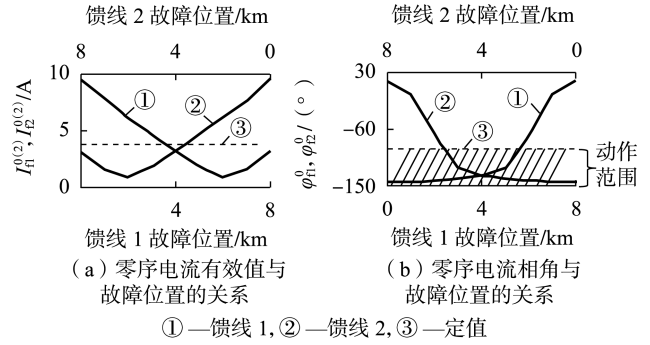


图 5 零序电流与故障位置

Fig.5 Relationship between zero-sequence current and fault location

有的零序电流保护。

3 自适应馈线零序电流保护方案

传统馈线零序保护在发生单回线故障时有较好的灵敏性和选择性。对于不同类型的多回线接地故障, 若能将故障馈线的零序电流修正为该馈线单独发生单相接地故障时的零序电流, 则能够使零序保护在不改变原有定值的基础上自适应于多回线故障。

当图 1 所示的配电网在同一母线有 m 条馈线发生同名相或异相单相金属性接地故障时, 由于故障点相电压为 0, 则对于任意一条故障馈线, 若故障相为 A 相, 则有:

$$U_{\varphi, f} = Z_L^+ I^{+(m)} + Z_L^- I^{- (m)} + Z_L^0 I^{0(m)} \quad (21)$$

其中, $I^{+(m)}$ 、 $I^{- (m)}$ 和 $I^{0(m)}$ 分别为任意馈线出口处测量到的正、负和零序电流。令 $Z_L^0 = kZ_L^+$, 可得:

$$U_{\varphi, f} = Z_L^+ (I^{+(m)} + I^{- (m)} + kI^{0(m)}) \quad (22)$$

联立式 (2)、(22) 可得到任一故障馈线空载情况下单独发生单相金属性接地故障时的零序电流表达式:

$$I_f^{0(1)} = \frac{U_s (I^{+(m)} + I^{- (m)} + kI^{0(m)})}{U_{\varphi, f} (2+k) + (I^{+(m)} + I^{- (m)} + kI^{0(m)}) Z_{S\Sigma}} \quad (23)$$

其中, $Z_{S\Sigma}$ 为系统侧总阻抗。

实际工程中, 零序电流互感器测得的是 3 倍零序电流。此外, 由于系统电压 U_s 无法获取, 可以用故障前相电压 $U_{\varphi, n}$ 近似代替, 并借用距离保护中零序补偿系数 k_0 的概念, 将式 (23) 变为:

$$3I_f^{0(1)} = \frac{U_{\varphi, n} [3I^{+(m)} + 3I^{- (m)} + (3k_0 + 1)I^{0(m)}]}{U_{\varphi, f} (3+3k_0) + [3I^{+(m)} + 3I^{- (m)} + (3k_0 + 1)I^{0(m)}] \frac{Z_{S\Sigma}}{3}} \quad (24)$$

其中, $k_0 = (Z_L^0 - Z_L^+) / (3Z_L^+)$, Z_L^+ 和 Z_L^0 分别为单位长度线路的正序和零序阻抗。若故障相为 B 相或 C

相,式(24)需分别变换为式(25)和(26)。

$$3I_f^{0(1)} = \frac{U_{\varphi,n} [3a^2 I^{+(m)} + 3a I^{-(m)} + (3k_0 + 1) I^{0(m)}]}{U_{\varphi,f} (3 + 3k_0) + [3a^2 I^{+(m)} + 3a I^{-(m)} + (3k_0 + 1) I^{0(m)}]} \frac{Z_{S\Sigma}}{3} \quad (25)$$

$$3I_f^{0(1)} = \frac{U_{\varphi,n} [3a I^{+(m)} + 3a^2 I^{-(m)} + (3k_0 + 1) I^{0(m)}]}{U_{\varphi,f} (3 + 3k_0) + [3a I^{+(m)} + 3a^2 I^{-(m)} + (3k_0 + 1) I^{0(m)}]} \frac{Z_{S\Sigma}}{3} \quad (26)$$

式(24)~(26)为零序电流修正算法,其意义在于:当同母多回线发生同名相或异相接地故障时,可以利用系统侧总阻抗 $Z_{S\Sigma}$, 零序补偿系数 k_0 , 正、负、零序电流以及故障前后的故障相电压 $U_{\varphi,n}$ 和 $U_{\varphi,f}$, 修正得到该回线单独发生单相接地故障时的零序电流 $I_f^{0(1)}$ 。由于传统馈线零序电流保护的定值在发生单回线单相接地故障时有较好的灵敏性和选择性,因此,利用 $I_f^{0(1)}$ 与原有的定值进行保护判别能够使馈线零序电流保护自主适应于不同类型的多回线接地故障,消除零序保护拒动或误动的可能。

当发生两相接地故障时,零序保护常作为相间过电流保护的后备保护。当 m 条线路在相同距离处发生两相金属性接地故障时,由于故障相的故障点电压为 0,则式(21)依然成立。因此,仍可利用式(24)~(26)将零序电流修正为单回线发生单相故障时的零序电流。同时将两相接地故障的零序电流修正为单相接地故障时的零序电流可提高零序保护的灵敏性。

此外,多回线故障的形式主要为相继故障。因此,在保护启动后,应采用零序电压和零序电流突变量作为判据持续检测是否发生相继故障。若零序电压或零序电流突变量大于定值,则可认为有相邻线路发生相继故障。此时应延时一定时间并重新测量并计算各电气量和零序电流修正值。

根据之前的分析,可得到自适应馈线零序电流保护逻辑如图 6 所示,图中, U_{An} 、 U_{Bn} 、 U_{Cn} 和 U_{Af} 、 U_{Bf} 、 U_{Cf} 分别为故障前和故障后的三相相电压; $d()$ 表示突变量。由于零序电流的修正计算需要用到多种电压、电流相量,为提高精度在保护启动后延时 10 ms 以确保足够的计算时间窗。此外,当发生多回线同名相继故障时,由于电流发生了突变,同样为了提高计算精度而再次延时 10 ms。

所提保护方案中保护定值及其整定方法如下:

a. 零序电流启动定值 I_{start}^0 、突变量启动定值 I_{abrupt}^0 和零序电压启动定值 U_{start}^0 按照躲开最大不平衡电流整定;

b. 零序电流动作定值 I_{set}^0 与原有馈线零序电流保护定值相同;

c. 零序电流时间定值 T_{set}^0 与原有馈线零序电流保护定值相同;

d. 系统综合阻抗定值 $Z_{S\Sigma} = Z_S^+ + Z_S^- + Z_S^0$;

e. 零序补偿系数 $k_0 = (Z_{Ln}^0 - Z_{Ln}^+) / 3Z_{Ln}^+$ 。

值得指出的是,配电网线路常存在分段,且不同分段的线路型号可能不同,但对于不同型号的电缆或架空线,其正序阻抗与零序阻抗的比值通常是一样的,即零序补偿系数不会因为线路型号的不同而不同。此外,配电网线路虽然可能存在电缆-架空线混合线路,但是较少出现多段混合的情况,且以电缆为主的混合线路中,架空线主要存在于整条线路的首端或末端,且长度通常较短,故采用固定的零序补偿系数不会产生较大的误差。

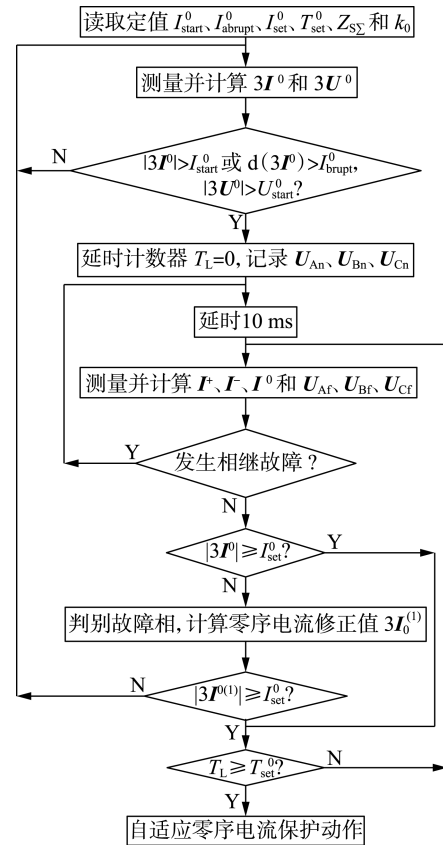


图 6 自适应零序电流保护流程图

Fig.6 Flowchart of adaptive zero-sequence current protection scheme

4 实验验证

4.1 多回线故障计算方法验证

首先利用第 2 节所搭建的仿真模型对所提多回线故障零序电流计算方法的准确性进行验证。

所有线路负载率均为 50% 的情况下,发生单回(馈线 L_1)、两回线(馈线 L_1 和 L_2) 和三回线(馈线 L_1 、 L_2 和 L_3) A 相金属性接地故障时,馈线 L_1 零序

电流的 RTDS 仿真结果和式 (19) 的计算结果如表 1 所示。表中,故障位置用其与母线的距离表示。

表 1 多回线同相接地故障零序电流的仿真结果和计算结果

Table 1 Simulative and calculated results of zero-sequence current of same-phase grounding fault of multi-feeders

故障位置/km	对比	$I_{n1}^{0(1)}/A$	$I_{n1}^{0(2)}/A$	$I_{n1}^{0(3)}/A$
0.5	仿真	$6.635 \angle -134.2^\circ$	$3.381 \angle -134.1^\circ$	$2.228 \angle -134.5^\circ$
	计算	$6.595 \angle -135.0^\circ$	$3.275 \angle -135.0^\circ$	$2.162 \angle -135.0^\circ$
4.0	仿真	$6.143 \angle -134.2^\circ$	$3.217 \angle -134.2^\circ$	$2.134 \angle -134.5^\circ$
	计算	$6.131 \angle -134.9^\circ$	$3.126 \angle -134.9^\circ$	$2.083 \angle -135.0^\circ$
8.5	仿真	$5.496 \angle -134.1^\circ$	$2.982 \angle -134.2^\circ$	$2.003 \angle -134.4^\circ$
	计算	$5.504 \angle -135.0^\circ$	$2.909 \angle -135.0^\circ$	$1.963 \angle -135.0^\circ$

由表 1 可知,本文所提计算方法精度较高,且 m 回线发生同名相单相接地故障时的零序电流约为发生单回线故障时零序电流的 $1/m$ 。

表 2 为所有线路负载率均为 50%,在 8.5 km 处发生两回线(馈线 L_1 和 L_2) 和三回线(馈线 L_1 、 L_2 和 L_3) 异相金属性接地故障时各馈线的零序电流。由表 2 可见,本文所提计算方法精度较高。

表 2 多回线异相接地故障零序电流的仿真结果和计算结果

Table 2 Simulative and calculated results of zero-sequence current of different phase grounding fault of multi-feeders

故障类型	对比	$I_{n1}^{0(1)}/A$	$I_{n2}^{0(1)}/A$	$I_{n3}^{0(1)}/A$
B,C	仿真	$35.07 \angle 134.3^\circ$	$35.27 \angle -50.6^\circ$	—
	计算	$35.15 \angle 134.5^\circ$	$35.42 \angle -50.3^\circ$	—
A,B,C	仿真	$40.01 \angle 114.8^\circ$	$40.01 \angle -125.5^\circ$	$40.0 \angle -5.1^\circ$
	计算	$39.97 \angle 113.6^\circ$	$39.97 \angle -126.5^\circ$	$40.1 \angle -6.3^\circ$

对比表 2 和表 1 可知,当发生多回线异相接地故障时,每条馈线的零序电流远大于发生单回线单相故障时的零序电流,零序保护可能越级误动。

4.2 保护方案测试

为了验证本文所提自适应零序保护方案的选择性和灵敏性,基于 RTDS、实时数字仿真功率放大器和自主研发的 DPMC-21 线路保护装置搭建了闭环测试系统,对所提保护方案进行测试。测试所用线路保护装置采用双核处理器 OMAPL138;具有双光纤以太网通信端口,支持 IEC61850 通信规约;具有 16 位高精度 AD 采样,采样频率为每周周期 80 个点。测试中自适应零序保护 I 段的定值为 $I_{set}^0 = 4 A$, $I_{start}^0 = 1 A$, $T_{set}^0 = 0.3 s$, $Z_{s\Sigma} = 36 + j37 \Omega$, $k_0 = 1.40 - j1.08$ 。

4.2.1 单回线故障测试

为验证本文所提保护方案在单回线故障时的可靠性,分别对不同负载率下馈线 L_1 发生 A 相和 BC 两相金属性接地故障时的零序电流测量值、修正值以及保护动作情况进行记录,结果如附录 B 中的表 B1 所示。此外,表 B1 中还记录了文献[13]中所提方法的测试结果,表中零序电流的相角为零序电流相对于零序电压的角度。

由表 B1 可知,发生单回线接地故障时零序电流

受负荷影响较大,在距母线 8.5 km 处发生故障时,负载率为 100% 情况下的零序电流比负载率为 100% 情况下的零序电流减小了 13.8%,零序保护的灵敏性降低。而所提保护方案能够使零序电流修正值更加接近线路空载情况下发生单相接地故障时的零序电流测量值。线路满载故障发生于距母线 8.5 km 处时修正误差最大,为 4.1%,且线路末端的架空线不会显著影响修正精度。由此可见,本文所提保护方案适用于单回线接地故障,能有效减少负荷以及故障类型对零序保护的影响。此外,本文所提保护方案的零序电流修正值均不会大于线路空载发生单相金属性接地故障时的零序电流,因此,当馈线分段处装设保护时所提保护方案不会出现越级误动作的情况。而文献[13]所提保护方案的零序电流修正精度受负荷影响较大,且该方案无法修正两相接地故障时的零序电流。

4.2.2 多回线故障测试

为验证本文所提自适应零序保护方案在发生同母多回线同名相接地故障时的有效性,分别对不同负载率下馈线 L_1 和 L_2 同时发生金属性接地故障时的零序电流测量值、修正值以及保护动作情况进行记录,结果如附录 B 中的表 B2 所示。

由表 B2 可知,当发生不同类型多回线同名相接地故障时,本文所提保护方案均能够将零序电流修正至接近相同距离单回线空载单相接地故障时的零序电流,保护快速可靠动作。此外,比较表 B1 和表 B2 可知,本文所提方案的零序电流修正值不会大于单回线空载单相接地时的零序电流,当馈线分段处装设保护时所提保护方案不会出现越级误动作的情况。文献[13]所提保护方案的零序电流修正精度受负荷影响较大,尤其在两回线负荷相差较大时,负荷较大的馈线零序电流修正值可达 21.57 A,远大于单回线空载单相接地故障时的零序电流,此时若馈线分段处装设保护,文献[13]所提保护方案会出现越级误动作的情况。此外,当发生多回线异相接地故障时,本文所提保护方案能够将零序电流修正至接近相同距离单回线空载单相接地故障时的零序电流,消除了零序保护误动作的可能。

4.2.3 非金属性接地故障测试

为了验证所提自适应零序电流保护方案对过渡电阻的耐受能力,测试并记录了所有馈线负载率均为 50% 时,在距母线 4 km 处发生非金属性接地故障时的零序电流修正结果和保护动作情况,测试结果如附录 B 中的表 B3 所示。对比表 B1 和表 B3 可知,虽然过渡电阻的存在会影响本文所提零序电流修正算法的精度,但是所提算法能够有效补偿零序电流,显著提高零序保护对过渡电阻的耐受能力。而且当过渡电阻存在差异时,本文所提方法能够在

一定程度上弥补过渡电阻差异导致的零序电流差异。对于多回线异相故障,当过渡电阻存在差异时,本文所提方法仍能够将零序电流修正至接近单回线故障时的零序电流,防止保护误动作。而文献[13]所提保护方案在有过渡电阻的情况下对零序电流的补偿效果较差。

4.2.4 相继故障测试

配电网中多回线故障通常相继发生,为了验证本文所提保护方案在多回线相继故障时的动作情况,测试了在馈线 L_1 、 L_2 和 L_3 的负载率分别为 100%、50% 和 10% 时, A 相和 BC 相发生相继金属性接地故障时馈线 L_1 的零序电流修正情况, RTDS 仿真测试结果如附录 C 中的图 C1 所示。

图 C1 中, 馈线 L_1 、 L_2 和 L_3 相继发生 A 相或 BC 相金属性接地; I_{0_m} 为零序电流测量值; I_{0_Fix1} 和 I_{0_Fix2} 分别为本文和文献[13]所提保护方案的零序电流修正值。由图可知, 发生多回线相继接地故障时, 零序电流会随着故障线路的增加而显著减小, 不满足定值, 本文所提保护方案能够将零序电流补偿为接近单回线故障时的零序电流, 而文献[13]所提保护方案的修正精度较差, 且无法适用于两相接地故障的情况。

5 结论

小电阻接地配电网发生同母多回线同相或异相接地故障时, 馈线零序保护可能会出现不正确动作的情况。为此, 本文首先对小电阻接地配电网单回线及多回线接地故障进行了分析, 得出了多回线与单回线发生接地故障时馈线零序电流关系。提出了一种考虑负荷且能适用于不同类型多回线接地故障的零序电流计算方法, 所提多回线故障零序电流计算方法相比于传统多重故障计算方法更加简单, 且具有较高的精度。在此基础上, 提出了自适应馈线零序电流保护方案。该保护方案可在发生同母多回线接地故障时将每条馈线的零序电流实时修正为该馈线单独发生接地故障时的零序电流, 从而在不改变原有保护定值的情况下使馈线零序电流保护能够自主地适应不同类型的多回线接地故障。

基于 RTDS 的仿真测试验证了本文所提保护方案的有效性。且本文所提保护方案可有效减少负荷及过渡电阻对零序电流保护的影响, 提高零序电流保护的灵敏性和选择性, 具有较好的工程应用价值。基于本文所提自适应馈线零序电流保护方案所研发的 DPMC-21 线路保护装置已在东莞市某变电站投入运行。

附录见本刊网络版 (<http://www.epae.cn>)。

参考文献:

[1] 薛永端, 郭丽伟, 张林利, 等. 有源配电网中性点接地方式的选

择问题[J]. 电力系统自动化, 2015, 39(13): 129-136.

XUE Yongduan, GUO Liwei, ZHANG Linli, et al. Selection problem of neutral grounding mode in active distributed networks[J]. Automation of Electric Power System, 2015, 39(13): 129-136.

[2] 郭丽伟, 薛永端, 徐丙垠, 等. 中性点接地方式对供电可靠性的影响分析[J]. 电网技术, 2015, 39(8): 2340-2345.

GUO Liwei, XUE Yongduan, XU Bingyin, et al. Research on effects of neutral grounding modes on power supply reliability in distribution networks[J]. Power System Technology, 2015, 39(8): 2340-2345.

[3] 刘渝根, 王建南, 米宏伟, 等. 10 kV 配电网中性点接地方式的优化研究[J]. 高电压技术, 2015, 41(10): 3355-3362.

LIU Yugen, WANG Jiannan, MI Hongwei, et al. Optimization research on neutral grounding mode of 10 kV distribution network[J]. High Voltage Engineering, 2013, 33(34): 3355-3362.

[4] 刘明岩. 配电网中性点接地方式选择[J]. 电网技术, 2004, 28(16): 86-89.

LIU Mingyan. Selection of neutral grounding modes in power distribution network[J]. Power System Technology, 2004, 28(16): 86-89.

[5] 王辉. 10 kV 配电网小电阻接地方式的研究[D]. 天津: 天津大学, 2006.

WANG Hui. Study on neutral grounding mode for 10 kV power distribution network[D]. Tianjin: Tianjin University, 2006.

[6] MITOLO M. Grounding the neutral of electrical systems through low-resistance grounding resistors: an application case[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2008, 44(5): 1311-1316.

[7] 郭丽伟, 薛永端, 徐丙垠, 等. 中性点接地方式对供电可靠性的影响分析[J]. 电网技术, 2015, 39(8): 2340-2345.

GUO Liwei, XUE Yongduan, XU Bingyin, et al. Research on effects of neutral grounding modes on power supply reliability in distribution networks[J]. Power Systems Technology, 2015, 39(8): 2340-2345.

[8] 吴争荣, 蔡颖倩, 张俊潇, 等. 消弧线圈接地系统同母多回线相继故障分析[J]. 高电压技术, 2017, 43(7): 2402-2409.

WU Zhengrong, CAI Yingqian, ZHANG Junxiao, et al. Fault analysis on successive fault of multi-feeders connected to the same bus in resonant grounding system[J]. High Voltage Engineering, 2017, 43(7): 2402-2409.

[9] HUANG J K, WU J Y, WANG G, et al. Study on zero-sequence current distribution characteristics in low resistance grounding mode[C]//2011 International Conference on Advanced Power System Automation and Protection (APAP). Beijing, China: IEEE, 2011: 1039-1043.

[10] 袁勇, 李凌. 10 kV 小电阻接地系统接地变压器零序电流保护误动作分析[J]. 华东电力, 2003, 31(6): 31-33.

YUAN Yong, LI Ling. Analysis of malfunction of grounding transformers's zero-sequence current protection in 10 kV low resistance grounding system[J]. East China Electric Power, 2003, 31(6): 31-33.

[11] 宁国丽, 房亚因, 邢立功, 等. 小电阻接地系统中接地变压器零序电流保护改进[J]. 电力自动化设备, 2011, 31(5): 141-144.

NING Guoli, FANG Yanan, XING Ligong, et al. Improvement of zero-sequence over-current protection for grounding transformers in low-resistance grounding power system[J]. Electric Power Automation Equipment, 2011, 31(5): 141-144.

[12] 江文东. 10 kV 小电阻接地系统零序过流定值的探讨[J]. 电力自动化设备, 2002, 22(10): 73-75.

JIANG Wendong. Discussion on zero sequence overcurrent setting

for 10 kV low resistance grounding system[J]. Electric Power Automation Equipment, 2002, 22(10): 73-75.

- [13] 喻磊, 郭晓斌, 韩博文, 等. 小电阻接地系统馈线自适应零序电流保护原理及装置实现[J]. 电力自动化设备, 2017, 37(11): 125-137.

YU Lei, GUO Xiaobin, HAN Bowen, et al. Principle of adaptive zero-sequence current protection and implementation of its device for feeder of low resistance grounding system[J]. Electric Power Automation Equipment, 2017, 37(11): 125-137.

- [14] 刘万顺, 黄少锋, 徐玉琴. 电力系统故障分析[M]. 3版. 北京: 中国电力出版社, 2010: 275-279.

- [15] 范春菊, 丁蕾, 郁惟镭. 电力电缆的零序电流保护方案[J]. 电力系统自动化, 2006, 30(8): 61-64.

FAN Chunju, DING Lei, YU Weiyong. Zero sequence current protection for power cable[J]. Automation of Electric Power Systems, 2006, 30(8): 61-64.

- [16] 陈念, 吕艳萍, 周凯, 等. 110 kV 电阻接地系统零序方向电流保护的整定研究[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(13): 91-96.

CHEN Nian, LÜ Yanping, ZHOU Kai, et al. Research on setting calculation of zero sequence directional overcurrent protection for 110 kV neutral point grounding via resistance system[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(13): 91-96.

作者简介:



曾德辉

曾德辉(1988—),男,河南焦作人,博士后,主要从事电力系统故障分析与继电保护理论研究和保护测控装置开发工作(E-mail: zengdh@scut.edu.cn);

王 钢(1966—),男,福建连江人,教授,博士研究生导师,博士,主要从事电力系统控制与保护、电网规划与可靠性、高压直

流输电技术方面的研究工作(E-mail: wangg@scut.edu.cn);

李海锋(1976—),男,广东广州人,副教授,博士,主要从事电力系统继电保护及自动化、高压直流输电技术方面的研究工作(E-mail: lihfh@scut.edu.cn);

刘胤良(1993—),男,河南巩义人,硕士,主要从事电力系统继电保护原理研究与继电保护装置开发工作(E-mail: 827236122@qq.com)。

郭敬梅(1987—),女,河北秦皇岛人,博士后,主要从事电力系统继电保护及自动化、高压直流输电技术方面的研究工作(E-mail: gjm_scut@163.com)。

Fault analysis of multi-feeder grounding fault and self-adaptive zero-sequence current protection scheme for low-resistance grounding distribution network

ZENG Dehui¹, WANG Gang¹, LI Haifeng¹, LIU Yinliang¹, GUO Jingmei²

(1. School of Electric Power, South China University of Technology, Guangzhou 510640, China;

2. Electric Power Research Institute of Guangdong Power Grid Co., Ltd., Guangzhou 510080, China)

Abstract: When grounding fault occurs on multiple feeders of the same bus, the zero-sequence current of each feeder will be greatly different from that when single-feeder grounding fault occurs. Therefore, the zero-sequence current relay protection of feeder may operate improperly. The relationship of zero-sequence current between single-phase grounding fault of same phase on multi-feeder and single-phase grounding fault on single-feeder is deduced to reveal the mechanism of improper operation of protection. A zero-sequence current calculation method considering load and suitable to various types of multi-feeder grounding fault is proposed. Then, the influence of multi-feeder grounding fault on zero-sequence current protection is analyzed by RTDS simulation model based on parameters of actual substation. On this basis, a self-adaptive zero-sequence current protection scheme of feeder is proposed, which modifies the zero-sequence current under multi-feeder grounding fault to the zero-sequence current under single-feeder grounding fault by using the pre-fault voltage and other parameters. This self-adaptive zero-sequence current protection scheme can autonomously adapt to different types of multi-feeders grounding faults without changing the original protection settings. Test results based on RTDS and the self-designed protection device show that the proposed protection scheme is immune to load current, and can operate correctly when different types of multi-feeder grounding faults occur. In addition, the fault resistance endurance of zero-sequence current protection can be improved by the proposed protection scheme.

Key words: distribution network; low-resistance grounding; multi-feeders fault; zero-sequence current protection; fault analysis; relay protection

附录 A

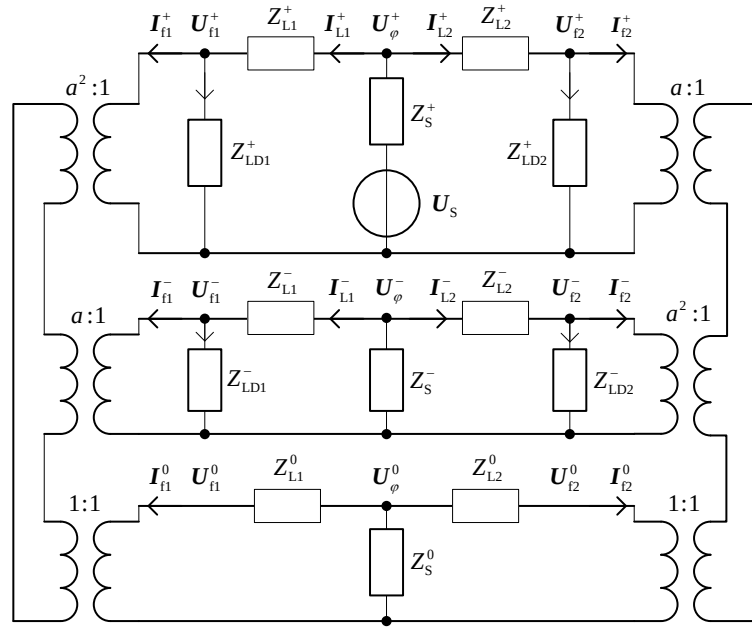


图 A1 两回线异相接地故障复合序网

Fig.A1 Complex-sequence network of different phase grounding fault of two feeders

附录 B

表 B1 单回线金属性接地故障测试
Table B1 Test results of metal grounding fault of single feeder

保护方案	负载率/%	故障位置/km	零序电流测量值/A		零序电流修正值		零序保护动作情况	
			A 相接地	AB 相接地	A 相接地	AB 相接地	A 相接地	AB 相接地
本文	0	0.5	6.975 $\angle$ -134.2 $^{\circ}$	3.518 $\angle$ -134.2 $^{\circ}$	6.776 $\angle$ -132.9 $^{\circ}$	6.775 $\angle$ -188.8 $^{\circ}$	动作	动作
	100	0.5	6.726 $\angle$ -134.2 $^{\circ}$	3.393 $\angle$ -134.2 $^{\circ}$	6.673 $\angle$ -133.1 $^{\circ}$	6.675 $\angle$ -189.0 $^{\circ}$	动作	动作
	0	4.0	6.645 $\angle$ -134.2 $^{\circ}$	3.374 $\angle$ -134.2 $^{\circ}$	6.623 $\angle$ -132.9 $^{\circ}$	6.430 $\angle$ -186.6 $^{\circ}$	动作	动作
	100	4.0	6.105 $\angle$ -134.2 $^{\circ}$	3.044 $\angle$ -134.2 $^{\circ}$	6.340 $\angle$ -133.8 $^{\circ}$	6.372 $\angle$ -187.2 $^{\circ}$	动作	动作
	0	8.5	6.127 $\angle$ -134.2 $^{\circ}$	3.179 $\angle$ -134.2 $^{\circ}$	5.987 $\angle$ -133.0 $^{\circ}$	5.929 $\angle$ -189.0 $^{\circ}$	动作	动作
	100	8.5	5.280 $\angle$ -134.2 $^{\circ}$	2.626 $\angle$ -134.2 $^{\circ}$	5.874 $\angle$ -133.5 $^{\circ}$	5.892 $\angle$ -190.6 $^{\circ}$	动作	动作
文献[13]	0	8.5	6.127 $\angle$ -134.2 $^{\circ}$	3.179 $\angle$ -134.2 $^{\circ}$	5.976 $\angle$ -133.1 $^{\circ}$	3.529 $\angle$ -143.9 $^{\circ}$	动作	不动作
	100	8.5	5.280 $\angle$ -134.2 $^{\circ}$	2.626 $\angle$ -134.2 $^{\circ}$	5.146 $\angle$ -133.3 $^{\circ}$	3.003 $\angle$ -142.6 $^{\circ}$	动作	不动作

注：故障位置用其与母线的距离表示，后同。

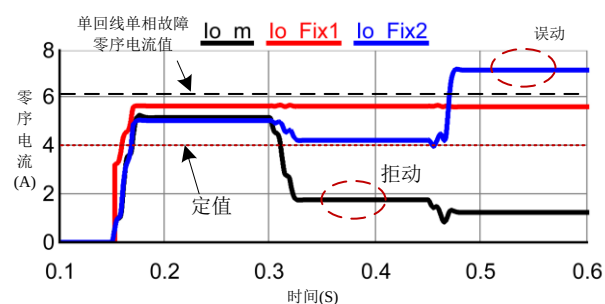
表 B2 两回线金属性接地故障测试结果
Table B2 Test results of metal grounding fault of two feeders

故障类型	保护方案	负载率/%		故障位置/km		零序电流测量值/A		零序电流修正值/A		保护动作情况	
		馈线 L ₁	馈线 L ₂	馈线 L ₁	馈线 L ₂	馈线 L ₁	馈线 L ₂	馈线 L ₁	馈线 L ₂	馈线 L ₁	馈线 L ₂
A 相接地	本文	0	100	0.5	0.5	5.813 $\angle$ -147.3 $^{\circ}$	1.732 $\angle$ -84.3 $^{\circ}$	6.573 $\angle$ -133.1 $^{\circ}$	6.572 $\angle$ -133.1 $^{\circ}$	动作	动作
		50	50	0.5	0.5	3.381 $\angle$ -134.1 $^{\circ}$	3.397 $\angle$ -134.2 $^{\circ}$	6.578 $\angle$ -132.5 $^{\circ}$	6.578 $\angle$ -132.5 $^{\circ}$	动作	动作
		0	100	8.5	8.5	5.664 $\angle$ -147.1 $^{\circ}$	1.356 $\angle$ -64.3 $^{\circ}$	5.805 $\angle$ -134.8 $^{\circ}$	5.743 $\angle$ -135.2 $^{\circ}$	动作	动作
		50	50	8.5	8.5	2.982 $\angle$ -134.2 $^{\circ}$	2.987 $\angle$ -134.1 $^{\circ}$	5.778 $\angle$ -134.6 $^{\circ}$	5.778 $\angle$ -134.6 $^{\circ}$	动作	动作
		50	50	0	8.5	8.889 $\angle$ -143.1 $^{\circ}$	2.466 $\angle$ 11.9 $^{\circ}$	6.578 $\angle$ -132.5 $^{\circ}$	5.404 $\angle$ -137.2 $^{\circ}$	动作	动作
	文献[13]	0	100	8.5	8.5	5.664 $\angle$ -147.1 $^{\circ}$	1.356 $\angle$ -64.3 $^{\circ}$	5.794 $\angle$ -133.8 $^{\circ}$	21.57 $\angle$ -169.8 $^{\circ}$	动作	误动作
		50	50	8.5	8.5	2.982 $\angle$ -134.2 $^{\circ}$	2.987 $\angle$ -134.1 $^{\circ}$	5.179 $\angle$ -132.1 $^{\circ}$	5.172 $\angle$ -132.2 $^{\circ}$	动作	动作
	AB 相接地	0	100	0.5	0.5	3.315 $\angle$ -151.2 $^{\circ}$	1.023 $\angle$ -67.6 $^{\circ}$	6.572 $\angle$ -190.3 $^{\circ}$	6.572 $\angle$ -190.3 $^{\circ}$	动作	动作
		50	50	0.5	0.5	1.707 $\angle$ -134.0 $^{\circ}$	1.706 $\angle$ -133.8 $^{\circ}$	6.577 $\angle$ -190.2 $^{\circ}$	6.577 $\angle$ -190.2 $^{\circ}$	动作	动作
		0	100	8.5	8.5	3.178 $\angle$ -150.9 $^{\circ}$	0.919 $\angle$ -45.3 $^{\circ}$	5.752 $\angle$ -189.9 $^{\circ}$	5.755 $\angle$ -190.0 $^{\circ}$	动作	动作
		50	50	8.5	8.5	1.522 $\angle$ -134.0 $^{\circ}$	1.520 $\angle$ -133.8 $^{\circ}$	5.759 $\angle$ -190.3 $^{\circ}$	5.759 $\angle$ -190.3 $^{\circ}$	动作	动作
		50	50	0	8.5	5.189 $\angle$ -146.0 $^{\circ}$	1.959 $\angle$ 12.6 $^{\circ}$	6.628 $\angle$ -191.9 $^{\circ}$	5.746 $\angle$ -192.0 $^{\circ}$	动作	动作
L ₁ B 相 L ₂ C 相	本文	0	100	8.5	8.5	3.178 $\angle$ -150.9 $^{\circ}$	0.919 $\angle$ -45.3 $^{\circ}$	3.491 $\angle$ -159.3 $^{\circ}$	7.624 $\angle$ -140.0 $^{\circ}$	不动作	误动作
		50	50	8.5	8.5	1.522 $\angle$ -134.0 $^{\circ}$	1.520 $\angle$ -133.8 $^{\circ}$	2.308 $\angle$ -136.7 $^{\circ}$	2.311 $\angle$ -136.7 $^{\circ}$	不动作	不动作
		0	100	8.5	8.5	35.18 $\angle$ 141.6 $^{\circ}$	35.05 $\angle$ -43.3 $^{\circ}$	5.75 $\angle$ 172.2 $^{\circ}$	5.76 $\angle$ -67.6 $^{\circ}$	动作	动作
		50	50	8.5	8.5	35.15 $\angle$ 134.5 $^{\circ}$	35.42 $\angle$ -50.3 $^{\circ}$	5.81 $\angle$ 166.5 $^{\circ}$	5.83 $\angle$ -73.5 $^{\circ}$	动作	动作

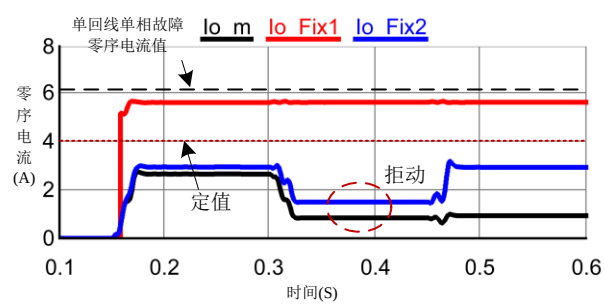
表 B3 非金属性接地故障测试结果
Table B3 Test results of nonmetallic grounding fault

故障类型	保护方案	过渡电阻/ Ω		零序电流测量值/A		零序电流修正值（A）		保护动作情况	
		馈线 L ₁	馈线 L ₂	馈线 L ₁	馈线 L ₂	馈线 L ₁	馈线 L ₂	馈线 L ₁	馈线 L ₂
A 相接地	本文	5	—	5.077 $\angle$ -134.1 $^{\circ}$	—	5.503 $\angle$ -134.1 $^{\circ}$	—	动作	—
		20	—	3.171 $\angle$ -134.3 $^{\circ}$	—	4.309 $\angle$ -127.3 $^{\circ}$	—	动作	—
		5	5	2.869 $\angle$ -134.2 $^{\circ}$	2.870 $\angle$ -134.1 $^{\circ}$	5.707 $\angle$ -134.6 $^{\circ}$	5.707 $\angle$ -134.5 $^{\circ}$	动作	动作
		5	20	4.174 $\angle$ -133.3 $^{\circ}$	2.179 $\angle$ -134.1 $^{\circ}$	5.592 $\angle$ -133.3 $^{\circ}$	5.179 $\angle$ -139.1 $^{\circ}$	动作	动作
		20	20	2.042 $\angle$ -134.2 $^{\circ}$	2.042 $\angle$ -134.1 $^{\circ}$	4.434 $\angle$ -134.2 $^{\circ}$	4.437 $\angle$ -134.1 $^{\circ}$	动作	动作
	文献[13]	20	—	3.171 $\angle$ -134.3 $^{\circ}$	—	3.205 $\angle$ -133.9 $^{\circ}$	—	不动作	不动作
		20	20	2.042 $\angle$ -134.2 $^{\circ}$	2.042 $\angle$ -134.1 $^{\circ}$	3.174 $\angle$ -140.3 $^{\circ}$	3.174 $\angle$ -140.3 $^{\circ}$	不动作	不动作
		20	20	2.042 $\angle$ -134.2 $^{\circ}$	2.042 $\angle$ -134.1 $^{\circ}$	3.174 $\angle$ -140.3 $^{\circ}$	3.174 $\angle$ -140.3 $^{\circ}$	不动作	不动作
L ₁ B 相 L ₂ C 相	本文	5	20	8.30 $\angle$ 167.1 $^{\circ}$	7.17 $\angle$ -41.1 $^{\circ}$	5.34 $\angle$ 210.4 $^{\circ}$	3.88 $\angle$ -44.2 $^{\circ}$	动作	不动作
		20	20	4.34 $\angle$ 123.5 $^{\circ}$	5.31 $\angle$ -80.5 $^{\circ}$	3.93 $\angle$ 169.2 $^{\circ}$	4.04 $\angle$ -76.65 $^{\circ}$	不动作	动作

附录 C



(a) 单相接地相继故障测试



(b) 两相接地相继故障测试

图 C1 三回线相继故障测试结果
Fig.C1 Test results of successive fault of three feeders