

# 零序互感对距离保护的影响与自适应补偿方法

张洪喜 徐晓春 谢华 黄涛 徐海洋

(南京南瑞继保电气有限公司, 南京 211102)

**摘要** 针对一起同塔双回线发生跨线接地故障时欠范围纵联距离保护拒动事件, 本文分析同塔双回线单相接地故障与跨线接地故障的特征, 以及零序互感对接地距离保护的影响, 得出零序互感带来的附加阻抗是引起接地距离保护范围缩小并导致欠范围纵联距离保护拒动的根本原因。为避免零序互感对同塔双回线接地距离保护范围的影响, 须对零序互感进行补偿, 因此本文提出一种自适应补偿方法, 通过引入邻线零序电流, 结合本线零序电流方向和相电流方向, 实现对零序互感的自适应补偿。最后, 利用实时数字仿真系统对本文所提补偿方法进行评估, 仿真结果证明了所提方法的有效性。

**关键词:** 零序互感; 跨线故障; 距离保护; 自适应补偿; 5G通信

## Impact of zero sequence mutual inductance on distance protection and its adaptive compensation method

ZHANG Hongxi XU Xiaochun XIE Hua HUANG Tao XU Haiyang

(NR Electric Co., Ltd, Nanjing 211102)

**Abstract** This article analyzes the characteristics of single phase grounding faults and cross line grounding faults in the same tower double circuit line, as well as the impact of zero sequence mutual inductance on grounding distance protection, in response to the misoperation fault of under range longitudinal distance protection during a cross line grounding fault on the same tower double circuit line. It is concluded that the additional impedance caused by zero sequence mutual inductance is the fundamental reason for the reduction of grounding distance protection range and the refusal of protection. In order to solve the problem, an adaptive zero sequence mutual inductance compensation method is proposed. The new method based on the adjacent zero sequence current injection and local auxiliary judgement can enable the compensation adaptively. The performance of the proposed method is evaluated based on the real time digital simulation system, and results show that this method is valid.

**Keywords:** zero sequence mutual inductance; cross-country fault; distance protection; adaptive compensation; 5G communication

## 0 引言

同塔双回线路共用杆塔, 出线走廊窄, 能够充分利用有限的土地资源<sup>[1-3]</sup>, 减少土地占用面积, 同时具有建设速度快、输送能力强、节省投资等优势, 能够很好地满足现代电力系统对供电可靠性和大容量输电的要求<sup>[4-7]</sup>, 因而在工程中得到了广泛应用。

目前, 纵联光纤差动保护作为线路的主保护得到普遍应用<sup>[8]</sup>, 但在某些落后国家或地区, 光纤通道尚不健全, 阻碍了差动保护的推广应用; 同时,

某些输电线路两侧变电站分属不同电力公司, 差动装置无法互通。作为差动保护通道异常时的一种补充保护, 纵联距离保护仍然具有不可或缺的应用价值。鉴于以上原因, 纵联距离保护作为线路主保护仍得到广泛应用<sup>[9-14]</sup>。

当同塔双回线发生接地故障时, 两条线路之间存在零序互感<sup>[3-7]</sup>。零序互感会严重影响保护, 尤其是接地距离保护的動作行为<sup>[6-10]</sup>, 因此必须采取相应的措施, 否则容易引起接地距离保护的保護范围扩大或缩小, 从而导致保护误动或拒动。为此, 许

多电力工作者进行了大量的研究和探索,并取得了相应成果<sup>[7-17]</sup>。

当双回线中的一回线路发生接地故障时,需要考虑零序互感对故障线路的影响,而非故障线路无需补偿;当两回线路发生跨线接地故障时,需要考虑零序互感对两回线路的影响,均需补偿。同时,距离保护应适应双回线不同的运行方式。因此,接地距离保护,尤其是欠范围接地距离保护亟需一种自适应零序互感补偿方法。

本文对一起同塔双回线发生同名相跨线接地故障时欠范围纵联距离保护(permissive underreach transfer trip, PUTT)拒动事件进行分析,得出零序互感带来的附加阻抗是引起接地距离保护范围缩小并导致欠范围纵联距离保护拒动的根本原因。为了解决这一问题,本文深入分析同塔双回线单相接地故障和跨线接地故障时,零序互感对接地距离保护的影响,并考虑误补偿和漏补偿问题,提出自适应零序互感补偿方法。基于所提方法,再次分析本次故障中纵联距离保护的动作为,并基于实时数字仿真(real time digital simulation, RTDS)系统验证所提方法的正确性。

## 1 距离保护动作行为分析

本文针对东南亚某国 230kV 同塔双回线发生同名相跨线接地故障时欠范围纵联距离保护动作行为进行分析。该双回线采用欠范围纵联距离保护作为主保护,当发生同名相跨线接地故障时,纵联距离保护拒动。

### 1.1 欠范围纵联距离保护逻辑

纵联距离保护包括三种主要模式,分别为 PUTT 模式、超范围纵联距离(permissive overreach transfer trip, POTT)模式和闭锁(blocking)式<sup>[8]</sup>。对于同塔双回输电线路,纵联距离保护应考虑功率倒向的影响,但欠范围纵联距离保护不受功率倒向影响,因而得到了使用者的青睐。

欠范围纵联距离保护的发信和动作逻辑<sup>[8]</sup>如图 1 所示。图 1 表明,当纵联距离保护功能投入且选择 PUTT 模式时,保护装置起动、距离 I 段动作并展宽 100ms 发允许信号给对侧。当保护装置起动,正向纵联距离元件动作,且收到对侧允许信号时,经 8ms 延时确认后,纵联距离保护动作跳闸<sup>[8]</sup>。

距离 I 段属于欠范围距离保护,一般按线路全长的 80%整定。在同塔双回输电线路应用场景中,欠范围距离保护受零序互感的影响易造成保护范围

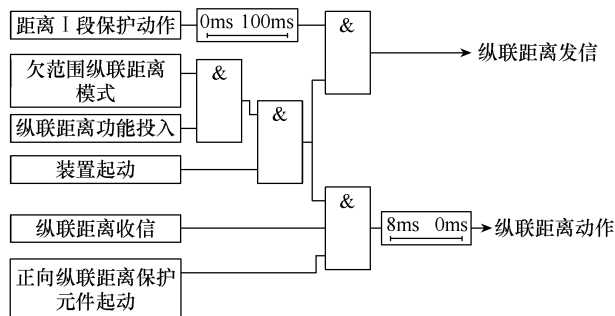


图 1 欠范围纵联距离保护发信和动作逻辑

扩大或缩小。考虑到运行方式复杂多变,为保险起见,一般通过减小接地距离零序补偿系数或阻抗定值的方法实现防超越的目的<sup>[9-13]</sup>。这种方法本质上缩小了接地距离保护的范,虽然提高了保护的选择性,但牺牲了保护的灵敏性,易导致区内接地故障距离 I 段保护拒动<sup>[18-21]</sup>。

### 1.2 欠范围纵联距离保护动作行为分析

实际工程中所用同塔双回线路参数见表 1。零序补偿系数定值为 0.6,接地距离保护 I 段阻抗定值为 5.76Ω。

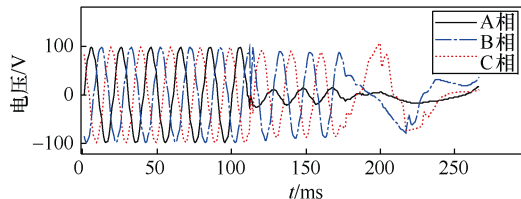
表 1 同塔双回线路参数

参数	数值
线路长度 $L/\text{km}$	13.95
正序阻抗 $Z_1/\Omega$	$0.61+j8.21$
零序阻抗 $Z_0/\Omega$	$7.63+j28.30$
零序互阻抗 $Z_{m0}/\Omega$	$6.17+j21.10$

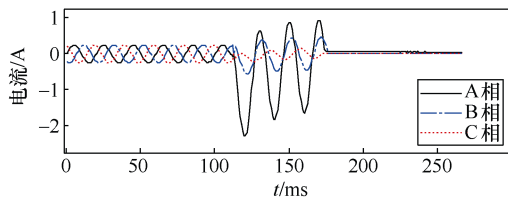
同塔双回线中两条线路的保护配置相同,主保护均为欠范围纵联距离保护,后备保护为四段距离保护(前三段正向,第四段反向)和一段正向零序过电流保护。

同塔双回线发生同名相 A 相跨线接地故障,两回线路的故障特征及保护装置的动作为相同,选取其中线路 1 进行分析。下面以 A 相测量阻抗为基础进行分析。

故障时线路 1 两侧的电压、电流录波分别如图 2 和图 3 所示。由图 2 和图 3 可以看出,故障时 A 相电流增加,A 相电压降低,其他两相电压和电流基本不变,说明系统中发生 A 相接地故障。

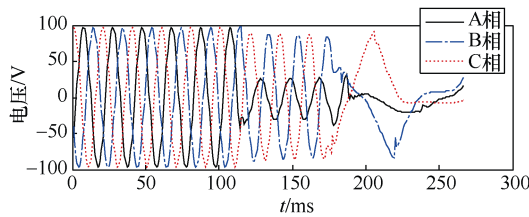


(a) 故障相电压

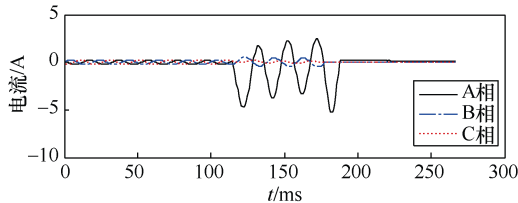


(b) 故障相电流

图2 故障时线路1左侧电压、电流录波



(a) 故障相电压



(b) 故障相电流

图3 故障时线路1右侧电压、电流录波

欠范围纵联距离保护采用四边形特性，故障时线路1两侧装置的测量阻抗轨迹分别如图4和图5所示。图4和图5为阻抗平面坐标，其中横坐标为电阻，纵坐标为电抗，图中四边形（蓝色）所包围的区域为接地距离保护I段动作区，曲线（红色）为A相测量阻抗轨迹。图4和图5表明，当同名相跨线接地故障发生时，线路两侧故障相A相测量阻抗均未进入接地距离保护I段动作区，距离保护I段动作条件未满足。

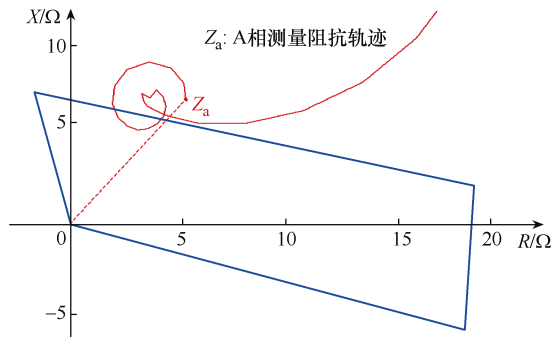


图4 线路1左侧装置测量阻抗轨迹

根据图1中欠范围纵联距离保护的发信逻辑，发信条件不成立。因此，不向对侧发送允许信号，进而导致纵联距离保护拒动。

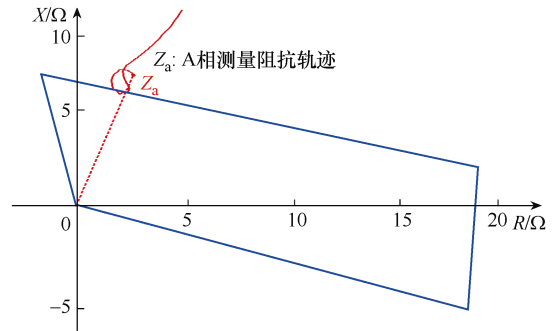


图5 线路1右侧装置测量阻抗轨迹

距离保护零序补偿系数  $K_0$  计算公式<sup>[14-15]</sup>为

$$K_0 = \frac{Z_0 - Z_1}{3Z_1} \quad (1)$$

将表1中线路参数代入式(1)可得  $K_0 = 0.832 - j0.223$ ，与装置定值0.6不符，且装置定值小于计算结果。根据表1，线路正序阻抗的幅值为  $8.233\Omega$ ，而接地距离保护I段的阻抗定值为  $5.76\Omega$ ，仅为整条线路阻抗的70%左右，不符合距离保护I段按线路全长阻抗80%整定的原则，装置阻抗定值明显偏小。

根据二次回路接线，相邻线零序电流未接入本保护装置，即未采取零序互感补偿措施。结合距离保护I段定值整定情况可知，接地距离保护I段通过零序补偿系数和阻抗定值回缩来防超越，这是造成纵联距离保护拒动的根本原因。

对距离保护而言，超越和回缩问题是相互矛盾和统一的整体。如果仅考虑超越问题，会加剧保护范围回缩带来的风险，极端情况下会导致距离保护拒动。因此，最有效的解决方法是对零序互感进行补偿<sup>[16-18]</sup>。

## 2 零序互感的影响

为了分析零序互感对接地距离保护动作行为的影响，采用简单的两节点同塔双回线单相接地等效模型，如图6所示。

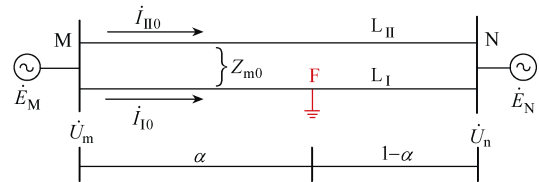


图6 两节点同塔双回线单相接地等效模型

假设同塔双回线两条线路参数完全相同，线路  $L_1$  发生单相接地故障，M侧线路  $L_1$  的故障相电压通

过式 (2) 进行计算。

$$\dot{U}_{1\Phi} = \alpha Z_1 \dot{I}_{1\Phi} + \alpha (Z_0 - Z_1) \dot{I}_{10} + \alpha Z_{m0} \dot{I}_{1\text{I}0} \quad (2)$$

式中:  $\dot{U}_{1\Phi}$  和  $\dot{I}_{1\Phi}$  分别为线路  $L_I$  故障相电压和电流;  $Z_1$  和  $Z_0$  分别为线路的正序阻抗和零序阻抗;  $Z_{m0}$  为双回线之间的零序互阻抗;  $\alpha$  为 M 侧到故障点距离与线路全长的比例;  $\dot{I}_{10}$  和  $\dot{I}_{1\text{I}0}$  分别为 M 侧保护装置测得的线路  $L_I$  和  $L_{\text{II}}$  零序电流。

对式 (2) 进行推导, 将  $\alpha Z_1$  作为公共因子提取出来得到式 (3)。

$$\dot{U}_{1\Phi} = \alpha Z_1 \left( \dot{I}_{1\Phi} + 3 \frac{Z_0 - Z_1}{3Z_1} \dot{I}_{10} + 3 \frac{Z_{m0}}{3Z_1} \dot{I}_{1\text{I}0} \right) \quad (3)$$

令  $K_0 = \frac{Z_0 - Z_1}{3Z_1}$  为本线路的零序补偿系数,

$K_{m0} = \frac{Z_{m0}}{3Z_1}$  为零序互阻抗补偿系数, 则式 (3) 可以表示为

$$\dot{U}_{1\Phi} = \alpha Z_1 (\dot{I}_{1\Phi} + 3K_0 \dot{I}_{10} + 3K_{m0} \dot{I}_{1\text{I}0}) \quad (4)$$

M 侧线路  $L_I$  保护装置测量阻抗为

$$Z_{1\Phi M} = \frac{\dot{U}_{1\Phi}}{\dot{I}_{1\Phi} + 3K_0 \dot{I}_{10}} = \alpha Z_1 \left( 1 + \frac{3K_{m0} \dot{I}_{1\text{I}0}}{\dot{I}_{1\Phi} + 3K_0 \dot{I}_{10}} \right) \quad (5)$$

与单回线接地故障相比, M 侧保护装置的测量阻抗增加了附加测量阻抗, 即

$$\Delta Z_{1\Phi M} = \alpha Z_1 \frac{3K_{m0} \dot{I}_{1\text{I}0}}{\dot{I}_{1\Phi} + 3K_0 \dot{I}_{10}} \quad (6)$$

当零序电流  $\dot{I}_{10}$  和  $\dot{I}_{1\text{I}0}$  的方向相同时, 附加阻抗为正值, 总测量阻抗增大, 从而导致保护范围缩小; 当零序电流  $\dot{I}_{10}$  和  $\dot{I}_{1\text{I}0}$  的方向相反时, 附加阻抗为负值, 总测量阻抗变小, 从而导致保护范围扩大。因此, 零序互感引起的附加阻抗是接地距离保护不能正确计算故障位置的根本原因。

大量电力工作者从不同的接线方式、不同的运行方式和不同的故障位置等方面针对零序互感对接地距离保护的影响进行了研究<sup>[3-15]</sup>, 根据研究结果, 线路上存在一个平衡点, 当在该点处发生故障时, 零序互感电流为零, 不会对接地距离保护产生影响。

当故障发生在平衡点左侧时, 两回线的零序电流  $\dot{I}_{10}$  和  $\dot{I}_{1\text{I}0}$  反向; 当故障发生在平衡点右侧时, 两回线的零序电流  $\dot{I}_{10}$  和  $\dot{I}_{1\text{I}0}$  同向。因此, 除平衡点外,

相邻线路均会产生零序电流并对本线路测量阻抗产生影响, 需要对相邻线路零序电流进行补偿。补偿后的测量阻抗为

$$Z_{1\Phi M} = \frac{\dot{U}_{1\Phi}}{\dot{I}_{1\Phi} + 3K_0 \dot{I}_{10} + 3K_{m0} \dot{I}_{1\text{I}0}} = \alpha Z_1 \quad (7)$$

进行补偿之后, 对于故障线路, 测量阻抗能够反映真实的故障位置; 但对于非故障线路, 当邻线出口发生接地故障时, 存在过补偿问题, 易造成欠范围纵联距离保护误动, 需要避免<sup>[15-17]</sup>。

### 3 发生跨线接地故障时零序互感的影响分析

同塔双回线发生跨线接地故障的概率较高, 有必要对发生跨线接地故障时零序互感对测量阻抗的影响进行分析<sup>[13-18]</sup>。

跨线接地故障发生在同塔双回线不同位置时的分析结论, 同样适用于故障发生在同塔双回线相同位置时。这里以跨线接地故障发生在两回线路不同位置为例进行分析, 双回线单相跨线接地故障模型如图 7 所示, 对应的零序网络如图 8 所示。其中, 线路  $L_I$  发生跨线接地故障的位置到 M 侧的距离占线路全长的百分比为  $\alpha$ , 线路  $L_{\text{II}}$  发生跨线接地故障的位置到 M 侧的距离占线路全长的百分比为  $\beta$ ,  $Z_{M0}$  和  $Z_{N0}$  分别为两侧系统阻抗,  $\dot{U}_{10}$  为线路  $L_I$  故障点零序电压,  $\dot{U}_{1\text{I}0}$  为线路  $L_{\text{II}}$  故障点零序电压,  $\lambda$  为

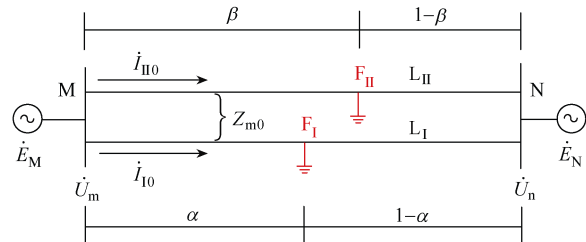


图 7 双回线单相跨线接地故障模型

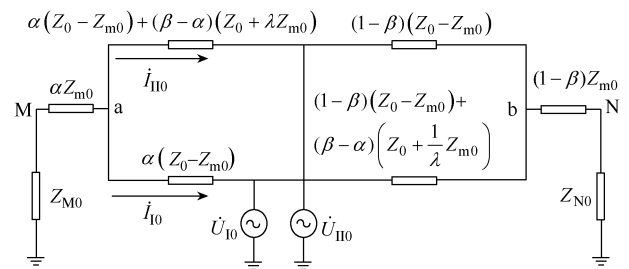


图 8 跨线接地故障零序网络

双回线不同接地故障点之间的互感系数,其他参数定义同前文一致。

令  $A=Z_{M0}+\alpha Z_{m0}$ ,  $B=\alpha(Z_0-Z_{m0})$ ,  $C=\alpha(Z_0-Z_{m0})+(\beta-\alpha)(Z_0+\lambda Z_{m0})$ , 根据基尔霍夫电压定律, 图 8 中 a 点电压为

$$\dot{U}_{a0} = \frac{AB\dot{U}_{I0} + AC\dot{U}_{II0}}{AB + BC + AC} \quad (8)$$

根据电流和电压之间的关系, 两回线的零序电流分别通过式 (9) 和式 (10) 计算得到。

$$\dot{I}_{I0} = \frac{AB(\dot{U}_{II0} - \dot{U}_{I0}) - BC\dot{U}_{I0}}{B(AB + BC + AC)} \quad (9)$$

$$\dot{I}_{II0} = \frac{AC(\dot{U}_{I0} - \dot{U}_{II0}) - BC\dot{U}_{II0}}{C(AB + BC + AC)} \quad (10)$$

由此可得

$$\frac{\dot{I}_{I0}}{\dot{I}_{II0}} = \frac{C[AB(\dot{U}_{II0} - \dot{U}_{I0}) - BC\dot{U}_{I0}]}{B[AC(\dot{U}_{I0} - \dot{U}_{II0}) - BC\dot{U}_{II0}]} = \frac{A\dot{U}_{II0} - (A+C)\dot{U}_{I0}}{A\dot{U}_{I0} - (A+B)\dot{U}_{II0}} \quad (11)$$

根据以上推导过程及式 (11) 可知, 零序电流  $\dot{I}_{I0}$  和  $\dot{I}_{II0}$  的方向不确定, 可能同向也可能反向。当故障位置相同 ( $\alpha=\beta$ ) 且同名相发生故障时, 故障点零序电压  $\dot{U}_{I0}$  和  $\dot{U}_{II0}$  相同, 从而  $\dot{I}_{I0}$  与  $\dot{I}_{II0}$  同向; 当故障位置不同 ( $\alpha \neq \beta$ ) 或异名相发生故障时, 故障点零序电压  $\dot{U}_{I0}$  和  $\dot{U}_{II0}$  不相同, 从而  $\dot{I}_{I0}$  与  $\dot{I}_{II0}$  可能反向。

根据上述分析, 发生跨线接地故障时, 两回线路接地距离保护均需进行补偿。

#### 4 自适应零序互感补偿方法

对于单相接地故障, 故障线路需要接入相邻线路零序电流来补偿零序互感的影响, 非故障线路无需进行补偿; 对于跨线接地故障, 两回线路均需进行补偿。

本文提出一种自适应零序互感补偿方法。采用零序电流方向和相电流方向作为辅助条件进行故障方向判断, 以提高自适应零序补偿方法的可靠性。零序电流方向通过零序电流和零序电压进行计算和判断, 相电流方向通过相电流和正序电压进行方向判断。

当线路  $L_1$  发生 M 侧出口单相接地故障时, 本线路 M 侧相电流方向元件判为正向, 相邻线路 M 侧相电流方向元件判为反向。

当 M 侧出口发生跨线接地故障时, M 侧两条线路的相电流方向元件同时判为正向。

对于某些特殊情形, 比如线路出口处发生跨线故障, 正序电压较低, 导致无法正确判断方向。此时, 采用记忆的正序电压作为方向判断依据, 即当正序电压小于  $0.15U_n$  ( $U_n$  为电压互感器二次额定电压) 时, 采用故障前 2 周波记忆正序电压代替当前电压进行方向判断, 提高方向判断的可靠性。自适应补偿方法流程如图 9 所示。

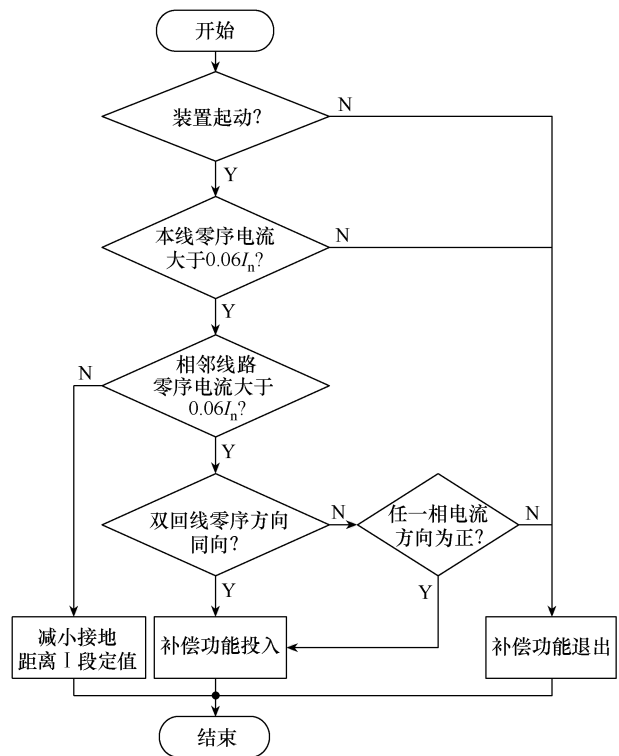


图 9 自适应补偿方法流程

当双回线中的一回线路退出运行且两端均不接地或仅一端接地时, 退出运行的线路中不会产生零序电流, 对运行线路无影响。当退出运行的线路两端均接地, 运行线路或上下级线路发生接地故障时, 退出运行的线路中会产生零序电流, 该电流会对运行线路产生影响, 需考虑补偿措施。由于无法获取退出运行的线路中的零序电流, 需要通过定值整定的方式抵消零序互感带来的超越问题, 如减小接地距离保护的阻抗定值等。

根据图 9, 保护装置起动后对本回线路和相邻线路的零序电流大小进行判断, 当二者均大于  $0.06I_n$

( $I_n$  为电流互感器二次额定电流) 时, 本回线路和相邻线路均执行零序方向判断逻辑。当二者零序电流方向相同时, 两回线均投入零序互感补偿功能; 当二者零序电流方向相反时, 继续执行相电流方向判断逻辑, 若有任一相方向判断为正向, 则仍投入零序互感补偿功能; 反之, 则不进行零序互感补偿。另外, 当相邻线路停运, 即当相邻线路零序电流小于  $0.06I_n$  时, 欠范围接地距离保护阻抗定值自动回缩为线路全长阻抗的  $60\%$ <sup>[17-24]</sup>。

基于传统接线方式的自适应补偿方法可以有效实现对零序互感的补偿, 但需要将邻线零序电流通过二次回路接入本线路保护装置, 当邻线退出运行时无法获取邻线上的互感电流。

电力技术和 5G 通信技术的发展, 使输电线路电流的采集和获取变得简单。基于此, 本文提出一种基于 5G 通信的自适应补偿方法。在输电线路上加装采集单元进行电流采集, 通过 5G 通信将采样电流传输至本线路保护装置, 保护装置接收采样电流并进行同步处理, 通过变换后获取零序互感电流, 进而实现自适应补偿<sup>[18-21]</sup>。基于 5G 通信的自适应补偿系统如图 10 所示。

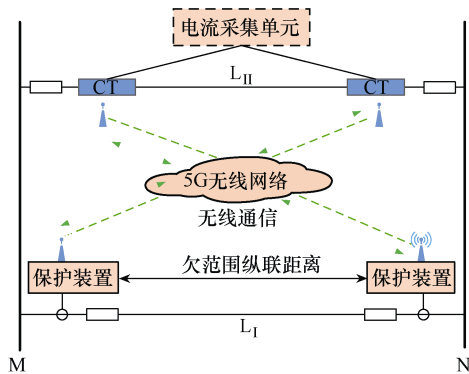


图 10 基于 5G 通信的自适应补偿系统

图 10 中, 电流采集单元安装在线路  $L_{II}$  的两端, 且位于开关的外侧, 当线路  $L_{II}$  退出运行且两侧接地时依然能正常采集感应电流。采集单元包括取能模块, 无需单独提供电源。当线路正常运行时通过线路电流感应取能, 当线路退出运行时通过备用电池取能或通过光伏取能, 最长可维持 20 天, 能够满足线路  $L_{II}$  的检修需求。另外, 电流采集单元支持外部独立电源供电, 在条件允许的情况下可以采用此供电方式。

通过 5G 网络将采集的电流传送给线路  $L_I$  的保护装置, 保护装置具备 5G 信号接收和同步功能,

实现邻线电流的采样和计算, 进而实现零序互感的自适应补偿。

考虑到 5G 流量资费问题, 以及偏远落后地区缺少 5G 信号的情况, 电流采集单元提供光纤通信功能, 以提高适应性。

## 5 自适应补偿方法性能分析

为了验证本文提出的自适应零序互感补偿方法的有效性, 再次针对现场跨线接地故障情况下的欠范围纵联距离保护动作为进行分析。

以线路  $L_I$  为例, 本线和邻线两侧零序电流均大于  $0.06I_n$ , 且其方向均为正向 (规定母线指向线路为正向)。根据设计逻辑, 零序互感补偿功能自动投入。

将邻线零序电流接入本线路保护装置, 实现自适应补偿功能。欠范围接地距离保护不再需要考虑超越问题, 定值均按正常原则整定。零序补偿系数和阻抗定值均按实际线路参数进行计算整定。接地距离保护 I 段的零序补偿系数按照式 (1) 计算, 结果为  $0.832-j0.223$ , 阻抗定值按线路全长阻抗的  $80\%$  整定, 即为  $6.59\Omega$ 。

线路  $L_I$  两侧接地距离保护 I 段零序互感补偿后的测量阻抗轨迹如图 11 和图 12 所示。故障时线路两侧测量阻抗轨迹均落入接地距离保护 I 段动作区内, 距离保护 I 段动作并向对侧发送允许信号, 因此欠范围纵联距离保护正确动作, 自适应零序互感补偿方法可以有效解决现场问题。

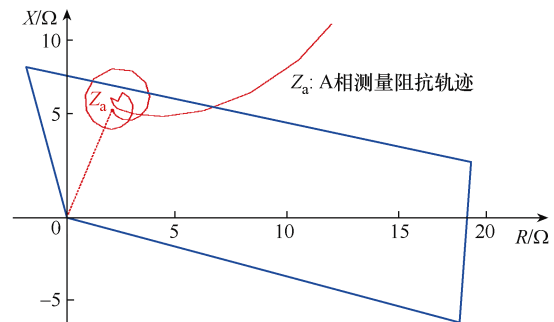


图 11 线路  $L_I$  左侧补偿后的测量阻抗轨迹

为了进一步验证所提自适应补偿方法的正确性, 基于表 1 参数, 在 RTDS 系统中搭建图 6 所示的同塔双回线模型, 分析不同系统运行方式、不同故障类型和不同故障位置情形下, 距离保护 I 段的动作行为。距离保护 I 段的保护范围按线路全长的

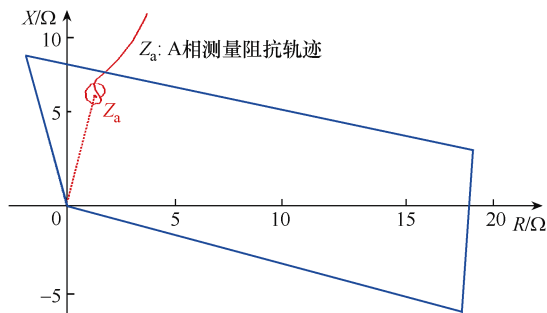


图 12 线路  $L_1$  右侧补偿后的测量阻抗轨迹

80%整定, 零序补偿系数按线路实际参数计算结果整定。重点分析 M 侧两回线路保护装置距离保护 I 段的动作行为, 尤其是动作边界附近的动作行为。部分测试结果见表 2。

表 2 中,  $L_1$  代表线路  $L_1$ ,  $L_2$  代表线路  $L_2$ ; 故

表 2 RTDS 部分测试结果

运行方式	故障类型	故障位置	补偿功能	动作结果 (距离 I 段)
L1 运行 L2 运行	L1 (AG)	L1 (10%)	投入	L1 动作
	L2 (BG)	L2 (10%)	投入	L2 动作
	L1 (BG)	L1 (50%)	投入	L1 动作
	L2 (CG)	L2 (50%)	投入	L2 动作
	L1 (CG)	L1 (75%)	投入	L1 动作
	L2 (AG)	L2 (75%)	投入	L2 动作
	L1 (AG)	L1 (85%)	投入	L1 不动作
	L2 (BG)	L2 (85%)	投入	L2 不动作
	L1 (BG)	L1 (90%)	投入	L1 不动作
	L2 (CG)	L2 (90%)	投入	L2 不动作
	L1 (AG)	L1 (10%)	投入	L1 动作
	L2 无故障	L2 无故障	不投	L2 不动作
	L1 (BG)	L1 (50%)	投入	L1 动作
	L2 无故障	L2 无故障	不投	L2 不动作
L1 运行 L2 停运 (接地)	L1 (CG)	L1 (75%)	投入	L1 动作
	L2 无故障	L2 无故障	不投	L2 不动作
	L1 (AG)	L1 (85%)	投入	L1 不动作
	L2 无故障	L2 无故障	不投	L2 不动作
	L1 (BG)	L1 (90%)	投入	L1 不动作
	L2 无故障	L2 无故障	不投	L2 不动作

(续表 2)

运行方式	故障类型	故障位置	补偿功能	动作结果 (距离 I 段)
L1 运行 L2 停运 (接地)	L1 (CG)	L1 (75%)	投入	L1 动作
	L2 无故障	L2 无故障	不投	
	L1 (BG)	L1 (85%)	投入	L1 不动作
	L2 无故障	L2 无故障	不投	
	L1 (CG)	L1 (90%)	投入	L1 不动作
	L2 无故障	L2 无故障	不投	

障类型 AG、BG 和 CG 分别表示 A 相接地故障、B 相接地故障和 C 相接地故障; 故障位置中的百分数表示故障点到 M 侧的距离占线路全长百分比。

表 2 说明, 在双回线不同运行方式、不同故障类型和不同故障位置情况下, 两回线的自适应补偿功能能够正确判断投退, 且接地距离保护 I 段的动作行为均正确。

## 6 结论

本文研究了同塔双回线零序互感对接地距离保护的影响, 提出了一种自适应零序互感补偿方法, 并基于实时数字仿真系统验证了该方法的正确性。研究表明:

1) 同塔双回线零序互感的影响是造成现场欠范围纵联距离保护拒动的根本原因, 本文提出的自适应零序互感补偿方法能够解决该问题。

2) 自适应零序互感补偿方法能够自动实现补偿功能的可靠投退, 确保在同塔双回线发生各类故障时, 接地距离保护能够可靠正确动作。

3) 基于 5G 通信的零序互感自适应补偿方法能够简化二次回路接线, 同时解决了相邻线路退出运行时无法获取零序电流的问题, 是 5G 通信技术在电力系统中的成功运用。

## 参考文献

- [1] 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.
- [2] 曲金秋, 范立海, 赵华夏, 等. 一起同塔双回线路运行号标反缺陷的分析与防范[J]. 电气技术, 2015, 16(7): 136-137.
- [3] 洪佩孙, 李九虎. 输电线路距离保护[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2008.
- [4] 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.

- [5] 李世龙, 陈卫, 邹耀, 等. 同杆并架线路阻抗比横联差动保护研究[J]. 电工技术学报, 2016, 31(21): 21-29.
- [6] 张波, 陈福锋, 王玉婷, 等. 特高压皖电东送线路零序互感对接地距离保护的影响[J]. 电力系统自动化, 2013, 37(21): 94-98.
- [7] 周春霞, 余越, 赵寒, 等. 特高压同塔双回线零序电流补偿系数整定对接地距离保护的影响研究[J]. 电网技术, 2012, 36(12): 106-111.
- [8] 赵青春, 李志宏, 谢华, 等. 一种输电线路特殊接线方式对线路距离保护影响研究[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(8): 115-123.
- [9] PCS—902 line distance relay instruction manual[Z]. Nanjing: NR Electric Co., Ltd, 2015.
- [10] 朱景富. 零序互感对线路接地距离保护的影响分析[J]. 电力系统保护与控制, 2009, 37(9): 113-115.
- [11] 曾耿晖, 蔡泽祥, 陈桥平, 等. 同塔双回线路接地故障零序电流分布特性分析[J]. 电网技术, 2011, 35(11): 212-217.
- [12] 刘欣, 黄少锋, 张鹏. 相电流差突变量选相在混压同塔输电线路跨电压故障中的适应性分析[J]. 电工技术学报, 2015, 30(21): 118-126.
- [13] 索南加乐, 王树刚, 张超, 等. 利用单端电流的同杆双回线准确故障定位研究[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(23): 25-30.
- [14] 张子衿, 丛伟, 肖静, 等. 含同杆双回线的输电网零序反时限过流保护加速配合方案[J]. 电力自动化设备, 2017, 37(9): 159-165.
- [15] 康小宁, 梁振锋, 索南加乐. 相邻线路零序互感对平行双回线电流平衡保护的影响及改进措施[J]. 继电器, 2005, 33(20): 1-4.
- [16] 孙子昌, 邓迎君, 陈昊, 等. 同塔双回线路同名相跨线短路故障分析[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(4): 154-159.
- [17] 宋国兵, 刘志良, 康小宁, 等. 一种同杆并架双回线接地距离保护方案[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(12): 102-106.
- [18] 李伟, 毕天姝, 徐振宇, 等. 同杆双回线跨线接地故障的距离保护算法研究[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(7): 131-138.
- [19] 高维良, 高厚磊, 徐彬, 等. 5G用作配电网差动保护通道的可行性分析[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(8): 1-7.
- [20] 徐晓春, 李奔, 谈浩, 等. 基于同步相量的多端电流差动保护[J]. 电气技术, 2021, 22(11): 88-92.
- [21] 黄彦钦, 余浩, 尹钧毅, 等. 电力物联网数据传输方案: 现状与基于 5G 技术的展望[J]. 电工技术学报, 2021, 36(17): 3581-3593.
- [22] 娄为, 韩学军, 韩俊, 等. 基于 5G 和光纤综合通道的输电线路差动保护方法[J]. 电力系统保护与控制, 2022, 50(1): 158-166.
- [23] 郑涛, 吴琼, 于溯, 等. 混压同塔四回线路跨电压故障选相元件动作分析与对策研究[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(8): 44-51.
- [24] 马静, 史宇欣, 马伟, 等. 基于分布参数的同杆双回线跨线及接地故障单端定位方法[J]. 电网技术, 2014, 38(9): 2525-2531.

收稿日期: 2024-06-13

修回日期: 2024-09-19

#### 作者简介

张洪喜(1983—), 男, 河南省鲁山县人, 硕士, 主要从事电力系统继电保护的研究和开发工作。

(上接第 13 页)

持向量回归的光伏最大功率点跟踪[J]. 电工技术学报, 2021, 36(9): 1771-1781.

- [24] MAHDAVI S, RAHNAMAYAN S, DEB K. Opposition based learning: a literature review[J]. Swarm and Evolutionary Computation, 2018, 39: 1-23.

收稿日期: 2024-07-18

修回日期: 2024-08-11

#### 作者简介

彭程(1999—), 男, 山东省临沂市人, 博士研究生, 主要研究方向为微电网经济低碳运行。