

# 一种输电线路特殊接线方式对线路距离保护影响研究

赵青春<sup>1</sup>, 李志宏<sup>2</sup>, 谢华<sup>1</sup>, 吴懿雯<sup>2</sup>, 李园园<sup>1</sup>, 朱晓彤<sup>1</sup>, 刘奎<sup>1</sup>

(1. 南京南瑞继保电气有限公司, 江苏 南京 211102; 2. 国网江西省电力公司电力调度控制中心, 江西 南昌 330077)

**摘要:** 建立了同杆双回输电线路串接单回输电线路的数学模型, 分析了常用的线路距离保护受到的影响。分析结果表明: 距离保护会受到一定程度的影响, 其影响程度与系统方式、线路参数以及故障点位置有关, 定值整定时需对距离保护灵敏度进行校核。编制了全线故障点扫描软件, 图形化展示灵敏度情况, 供定值整定人员参考。针对距离保护灵敏度问题提出了两种解决方案。根据实际工程参数建立RTDS仿真模型并接入了实际使用线路保护装置, 进行了验证性测试。测试表明, 超范围整定的距离II段或者纵联距离灵敏度整定不合适时, 有可能出现保护拒动的情况。最后再次强调了应尽量从一次系统规划上避免出现这种特殊的接线方式。

**关键词:** 同杆双回输电线路; 单回输电线路; 串接; 线路距离保护; 灵敏度

## Effect on the line distance protection when the transmission lines are connected in a special mode

ZHAO Qingchun<sup>1</sup>, LI Zhihong<sup>2</sup>, XIE Hua<sup>1</sup>, WU Yiwen<sup>2</sup>, LI Yuanyuan<sup>1</sup>, ZHU Xiaotong<sup>1</sup>, LIU Kui<sup>1</sup>

(1. Nari-relays Electric Co., Ltd., Nanjing 211102, China; 2. Dispatching and Control Center of State Grid Jiangxi Electric Power Company, Nanchang 330077, China)

**Abstract:** A mathematical model that double-circuit line in the same tower is connected to a single-circuit line in series is established. The effect on the common distance protection is analyzed. The result indicates that the effect is relevant to system operation mode, line parameters and the fault location, and the sensitivity of distance protection should be verified when setting the settings. Sensitivity check software is compiled, which can provide the calculation and display of measurement impedance trajectory, and the sensitivity displayed as a graphical mode can be referred. Two solutions for the sensitivity of the distance protection are proposed. A RTDS simulation model based on the actual parameters on site and connected with real line distance relays is established. The confirmatory test based on the RTDS simulation indicates that overreached zone 2 and pilot distance relay maybe not operate if the sensitivity is incorrect. Finally, it is emphasized that the special connecting mode should be avoided when planning and designing primary system.

**Key words:** double-circuit transmission line; single-circuit transmission line; connecting in series; line distance protection; sensitivity

中图分类号: TM77 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2015)08-0115-09

## 0 引言

随着我国工业和居民用电需求日益增长, 原有输电线路的输送容量越来越接近输送极限, 而新增输电走廊的代价却越来越高。为尽量利用现有输电走廊, 尽可能节约成本和耕地, 部分地区选择对现有输电线路进行改造和扩建。改造和扩建过程中, 由于后期投资的限制, 只能采取对原线路整体或部分线路改造为双回线路, 以增加输电线路的输送能力, 但不增加相应断路器, 此时, 出现了单回线中间串入双回线的输电线路接线方式。

这种接线方式在缓解输电容量问题的同时, 却给继电保护带来了挑战。在双回线其中一回线路发生故障时, 由于相邻线电流吸入或流出影响了单回线和双回线串接点处电压, 基于单回线电气量测量的距离保护, 此时感受到的测量阻抗并不能真实地反应故障电气距离, 从而影响距离保护性能。而相电流差动保护则会因为健全线路的负荷电流, 其灵敏度受到影响。

一次系统规划时, 应尽量避免出现此接线方式, 然而, 由于投资限制等方面的原因, 实际应用中确实已出现了这种情况。目前, 关于同杆双回线

的继电保护相关问题已有大量且深入的研究<sup>[1-7]</sup>,但对此种接线方式,相关继电保护整定和运行规程未有明确说明,亦未见国内外对此情况的分析或研究报道。常见的定值整定软件无法输入此种接线方式的线路参数,同时由于计算复杂,定值整定人员亦无法进行人工计算以校核定值。若不进行保护定值相关校验,此接线方式有可能为系统的安全稳定运行引入一定的隐患。

对于电流差动保护而言,主要是邻线负荷电流对比率制动系数的影响,而目前系统中大量使用的线路纵联差动保护,通常会配置有基于不反应负荷电流的故障分量差动保护,如工频变化量差动保护或者零序差动保护等<sup>[8-10]</sup>,应用在这种接线方式下,电流差动保护受到的影响并不大。因此,本文重点分析线路距离保护受到的影响。

为明确此种接线对系统中常用距离保护的影响,建立了同杆双回输电线路串接单回输电线路的数学模型,分析了各种故障情况下距离保护受到的影响。编制了全线故障点扫描软件,图形化展示距离保护灵敏度情况,根据实际工程参数建立了 RTDS 仿真模型,并接入实际保护装置到 RTDS 仿真系统中,验证理论推导结果。基于上述研究情况提出两种解决办法,并从系统安全角度出发,再次强调应在一次系统规划时避免输电线路出现此接线方式。

### 1 双回线串接单回线的典型结构

双回线串接单回线时,其统一系统结构如图 1 所示。R 和 S 分别为两变电站,亦为线路保护安装处,M 和 N 分别为双回线串接单回线的节点处。根据实际双回线的具体电气位置又有若干特殊情况。如双回线和单回线分别位于线路的两端,如图 2 所示。又如整条线路全部为双回线,如图 3 所示。甚至线路分为几部分,双回线和单回线交错分布,如图 4 所示。

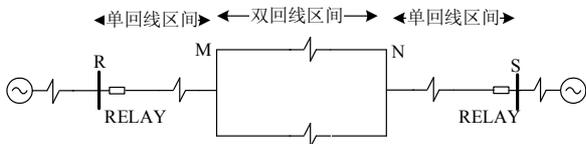


图 1 典型系统结构图

Fig. 1 Typical system structure chart

图 2 和图 3 是图 1 的特殊应用情况,故障分析时,可很容易地归纳到如图 1 的分析方法下。图 4 是图 1 的通用情况。实际分析双回线部分故障时,如分析 MN 段故障时,可将 M'N' 段双回线等值为

单回线处理,此时与图 1 情况完全一致。因此,本文故障分析时主要以图 1 所示典型系统结构为主。

图 5 描述了系统中可能出现故障的位置,故障大致可分为三类:单回线部分故障,双回线部分的单回线故障和双回线部分的跨线故障。

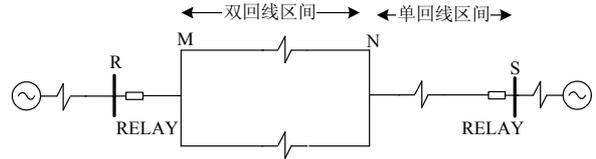


图 2 双回线和单回线分别位于线路两侧

Fig. 2 Double circuit line and single loop at the line on both sides

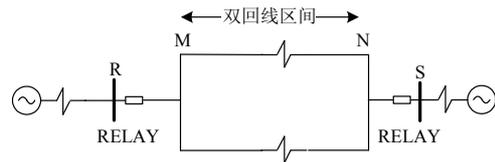


图 3 全线均为双回线

Fig. 3 All are double circuit line

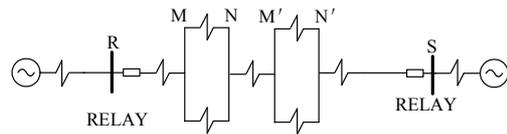


图 4 双回线和单回线交错分布

Fig. 4 Double circuit lines and single loop staggered distribution

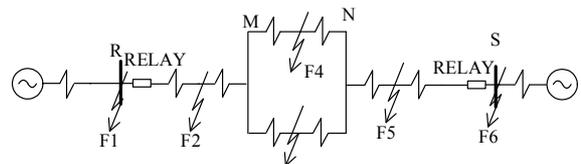


图 5 典型故障点分布

Fig. 5 Typical fault point distribution

### 2 测量阻抗分析

从阻抗平面观察测量阻抗的情况,对于大部分距离保护而言是最直观的方式,因此,本文从测量阻抗出发分析距离保护受到的影响。

#### 2.1 单回线部分故障

典型的单回线部分故障如图 5 所示的 F1、F2、F5、F6 故障点。在单回线部分发生故障时,将双回线部分等值为单回线后,则与常规单回线故障分析完全一致,此处不再赘述。但需要留意的是,双回

线区外发生接地故障, 对双回线等值时, 需考虑双回线零序互感的影响。

## 2.2 双回线部分的单回线故障

典型的双回线部分的单回线故障如图 5 所示的 F3 和 F4 故障点。以 F3 点的三相故障、相间和单相故障为例进行故障分析说明。

F3 点的三相故障分析, 如图 6 所示。

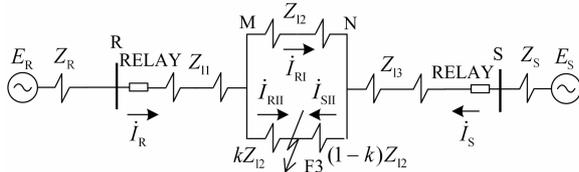


图 6 双回线部分单回线三相故障示意图

Fig. 6 Three-phase fault on one single loop of the double circuit line

设两侧系统电源分别为  $\dot{E}_R$  和  $\dot{E}_S$ , 对应系统阻抗分别为  $Z_R$  和  $Z_S$ 。线路各段阻抗分别为  $Z_{11}$ 、 $Z_{12}$  和  $Z_{13}$ , 一般而言同杆双回线两条线路参数基本一致, 计算过程中按此原则考虑。当 II 回线路发生三相故障时, 对 R 侧而言有方程:

$$\dot{E}_R = \dot{I}_R Z_R + \dot{I}_R Z_{11} + \dot{I}_{RII} k Z_{12} \quad (1)$$

式中,  $k$  为故障点位置系数,  $0 \leq k \leq 1$ 。

可以得到保护 R 感受到的电流和电压分别如式(2)、式(3)。

$$\dot{I}_R = \frac{\dot{E}_R}{Z_R + Z_{11} + \frac{\dot{I}_{RII}}{\dot{I}_R} k Z_{12}} \quad (2)$$

$$\dot{U}_R = \dot{I}_R Z_{11} + \dot{I}_{RII} k Z_{12} \quad (3)$$

同理, 可以得到保护 S 感受到的电流和电压, 此处不再赘述。

从三相故障分析可以看到, 其特征与单回线基本一致, 只是增加了相邻线路的分支影响。

计算保护 R 侧测量阻抗如式(4)。

$$Z_{JR} = \frac{\dot{U}_R}{\dot{I}_R} = Z_{11} + (1 - \frac{\dot{I}_{RI}}{\dot{I}_R}) k Z_{12} \quad (4)$$

测量阻抗受到相邻线分支系数  $\frac{\dot{I}_{RI}}{\dot{I}_R}$  的影响, 解故障网络有, 分支系数如下:

$$\frac{\dot{I}_{RI}}{\dot{I}_R} = \frac{Z_{12} k (1-k) (\dot{E}_R - \dot{E}_S) - \dot{E}_S (1-k) (Z_R + Z_{11}) + (Z_{13} + Z_S) \dot{E}_R k}{Z_{12} (1-k) (\dot{E}_R (1+k) - \dot{E}_S \times k) + 2 \dot{E}_R (Z_{13} + Z_S)} \quad (5)$$

可以看到, 当线路结构确定时, 分支系数与运行方式 ( $Z_R, Z_S$ ), 故障点位置 ( $k$ ), 以及负荷情况有

关 ( $\dot{E}_R, \dot{E}_S$ )。从式(5)可以看到, 当运行方式及负荷确定时, 分支系数呈现故障位置  $k$  二次函数特征。

F3 点相间故障时, 其结构图与图 6 相似, 其测量阻抗与式(4)相似, 此处不再赘述。

以 A 相为例分析 F3 点单相故障, 其零序网络如图 7 所示。

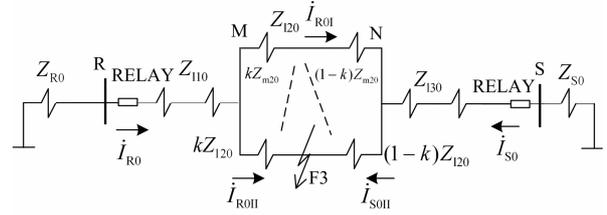


图 7 双回线部分单回线单相故障时零序网络

Fig. 7 Zero sequence network when single-phase fault on one single loop of the double circuit line

$Z_{1n0}$  ( $n=1,2,3$ )、 $Z_{R0}$ 、 $Z_{S0}$  分别为各段单回线路、R 侧系统、S 侧系统的零序阻抗,  $Z_{m20}$  为线路 12 段两回线之间的零序互感,  $I_{R0II}$ 、 $I_{S0II}$ 、 $I_{R0I}$  分别为线路 12 段 II 回线 M 侧、II 回线 N 侧、I 回线流过的零序电流。

故障后 M 点 A 相电压:

$$\dot{U}_{MA} = k Z_{12I} \dot{I}_{R0II} + k Z_{122} \dot{I}_{R2II} + k Z_{120} \dot{I}_{R0II} + k Z_{m20} \dot{I}_{R0I} \quad (6)$$

再假定线路各处零序补偿系数相同:

$$K_0 = \frac{Z_{110} - Z_{111}}{3Z_{111}} = \frac{Z_{120} - Z_{121}}{3Z_{121}} = \frac{Z_{130} - Z_{131}}{3Z_{131}} \quad (7)$$

于是,

$$\dot{U}_{MA} = k Z_{12} (\dot{I}_{AII} + K_0 3 \dot{I}_{R0II}) + k Z_{m20} \dot{I}_{R0I} \quad (8)$$

R 侧保护测量到 A 相电压为

$$\dot{U}_{RA} = Z_{11} (\dot{I}_A + K_0 3 \dot{I}_{R0}) + \dot{U}_{MA} \quad (9)$$

代入式(9), 可得到 R 侧保护测量到的 A 相电压为

$$\dot{U}_{RA} = Z_{11} (\dot{I}_A + K_0 3 \dot{I}_{R0}) + k Z_{12} (\dot{I}_{RAII} + K_0 3 \dot{I}_{R0II}) + k Z_{m20} \dot{I}_{R0I} \quad (10)$$

上式与单回线故障相比, 引入相邻线的分支影响和零序互感影响。S 侧保护计算方法完全相同, 此处不再赘述。

计算保护 R 侧测量阻抗如式(11)。

$$Z_J = \frac{\dot{U}_{RA}}{\dot{I}_A + K_0 3 \dot{I}_{R0}} = Z_{11} + (1 - \frac{\dot{I}_{RAI} + K_0 3 \dot{I}_{R0I}}{\dot{I}_A + K_0 3 \dot{I}_{R0}} + \frac{Z_{m20}}{Z_{12}} \frac{\dot{I}_{R0I}}{\dot{I}_A + K_0 3 \dot{I}_{R0}}) k Z_{12} \quad (11)$$

对比式(4)可以看到, 与三相和相间故障类似, 单相接地故障时, 测量阻抗中亦有误差引入, 其误差由两部分组成: 相邻线电流的分支系数

$\frac{I_{RAI} + K_0 3I_{R0I}}{I_{RA} + K_0 3I_{R0}}$  和相邻线零序互感影响系数

$\frac{Z_{m20}}{Z_{12}} \frac{I_{R0I}}{I_{RA} + K_0 3I_{R0}}$ 。分支系数解析表达式与式(5)类

似, 同时相邻线零序互感影响系数与分支系数情况表达式比较相近, 其影响因数亦应相似, 双回线部分单回线发生单相接地故障时, 保护测量阻抗与运行方式、故障点位置、线路之间的零序互感以及负荷情况有关。

### 2.3 双回线部分的跨线故障

先对双回线部分采用六序分量法<sup>[11]</sup>进行分析, 计算得到 M 点或者 N 点的电压, 以及双回线上对应故障相电流, 进而推导出 R 侧或者 S 侧的保护测量电压和电流。

此处以 IBII 故障为例说明双回线部分跨线故障的计算方法。

根据六序分量法, 可得到 M 侧两回线 B、C 两相电流分别为

$$\begin{cases} I_{RB I} = a^2 C_{1mT} i_{1T} + a C_{1mT} i_{2T} + C_{0mT} i_{0T} + a^2 C_{1mF} i_{1F} + \\ \quad a C_{1mF} i_{2F} + C_{0mF} i_{0F} \\ I_{RC I} = a C_{1mT} i_{1T} + a^2 C_{1mT} i_{2T} + C_{0mT} i_{0T} + a C_{1mF} i_{1F} + \\ \quad a^2 C_{1mF} i_{2F} + C_{0mF} i_{0F} \\ I_{RB II} = a^2 C_{1mT} i_{1T} + a C_{1mT} i_{2T} + C_{0mT} i_{0T} - (a^2 C_{1mF} i_{1F} + \\ \quad a C_{1mF} i_{2F} + C_{0mF} i_{0F}) \\ I_{RC II} = a C_{1mT} i_{1T} + a^2 C_{1mT} i_{2T} + C_{0mT} i_{0T} - (a C_{1mF} i_{1F} + \\ \quad a^2 C_{1mF} i_{2F} + C_{0mF} i_{0F}) \end{cases} \quad (12)$$

两回线 B、C 两相故障点电压为

$$\begin{cases} U_{fB I} = a^2 U_{1T} + a U_{2T} + U_{0T} + a^2 U_{1F} + a U_{2F} + U_{0F} \\ U_{fB II} = a^2 U_{1T} + a U_{2T} + U_{0T} - a^2 U_{1F} - a U_{2F} - U_{0F} \\ U_{fC I} = a U_{1T} + a^2 U_{2T} + U_{0T} + a U_{1F} + a^2 U_{2F} + U_{0F} \\ U_{fC II} = a U_{1T} + a^2 U_{2T} + U_{0T} - a U_{1F} - a^2 U_{2F} - U_{0F} \end{cases} \quad (13)$$

式中:  $I_{RB I}$ 、 $I_{RC I}$ 、 $I_{RB II}$ 、 $I_{RC II}$  为 I 回线流过 M、N 侧保护的 B、C 相电流;  $C_{1mT}$ 、 $C_{0mT}$ 、 $C_{1mF}$ 、 $C_{0mF}$  为正序、零序同反序序网 M 侧的分配系数。

而 M 处 B、C 相电压为

$$\begin{cases} U_{MB} = kZ_{12}(I_{RBI} + K3I_{R0I} + K'3I_{R0II}) + U_{fBI} = \\ \quad kZ_{12}(I_{RBII} + K3I_{R0II} + K'3I_{R0I}) + U_{fBII} \\ U_{MC} = kZ_{12}(I_{RCI} + K3I_{R0I} + K'3I_{R0II}) + U_{fCI} = \\ \quad kZ_{12}(I_{RCII} + K3I_{R0II} + K'3I_{R0I}) + U_{fCII} \end{cases} \quad (14)$$

R 侧保护测量到 B、C 相电压和电流为

$$\begin{cases} U_{RB} = U_{MB} + Z_{II} I_{RB} \\ U_{RC} = U_{MC} + Z_{II} I_{RC} \\ I_{RB} = I_{RBI} + I_{RBII} \\ I_{RC} = I_{RCI} + I_{RCII} \end{cases} \quad (15)$$

将式(12)~式(14)代入到式(15)中, 即可求得双回线部分发生 IBII 故障时, R 侧保护感受到的故障相电压和电流。

可求得线路空载时, R 侧保护 BC 相间测量阻抗如式(16)。

$$Z_{JR} = Z_{II} + \frac{kZ_{12}}{2} + \frac{1}{2} \frac{k(1-k)(Z_{12} + 2(Z_m - Z'_m))}{C_{1mT}} \quad (16)$$

式中:  $Z_m$  为每回线的相间互感;  $Z'_m$  为两回线路之间的零序互感。

从式(16)可以看到, 当线路结构确定后, 测量阻抗主要与故障点位置和系统方式有关, 当方式确定时, 测量阻抗明显呈现故障位置  $k$  二次函数特征。

## 3 距离保护受到的影响分析及解决方案

### 3.1 测量阻抗轨迹计算

从上节的测量阻抗分析可以看到, 在线路结构确定的情况下, 测量阻抗的误差与负荷情况、系统方式以及故障点位置有关, 是由多维度参数决定的。为友好展示沿线故障时测量阻抗轨迹, 给定值整定提供参考依据, 编制了计算沿线故障测量阻抗轨迹的软件, 该软件假定线路结构如图 1 所示, 其输入参数如表 1、表 2 所示。

表 1 线路及系统阻抗参数输入表

物理对象	线路长度/km	正序阻抗/ $\Omega$	正序阻抗角/( $^\circ$ )	零序阻抗/ $\Omega$	零序阻抗角/( $^\circ$ )	零序互感阻抗/ $\Omega$	零序互感阻抗角/( $^\circ$ )
$Z_{II}$						N/A	N/A
$Z_{12}$						N/A	N/A
$Z_{13}$							
$Z_s$						N/A	N/A
$Z_r$						N/A	N/A

表 2 系统电势参数输入表

物理对象	电势/V	电势角/( $^\circ$ )
$E_s$		
$E_r$		

软件接收上述参数后, 即可根据设定的故障类型, 固定以线路全长 1% 为步长, 扫描沿线各点故

障时, 保护测量阻抗轨迹图。

以图 8 所示线路为例, 该线路长 100 km, 其中单回线路 50 km, 双回线路 50 km, R 侧小方式, S 侧大方式, 线路空载运行。图 9~图 12 分别描述了 A 相接地(图 9)、ABC 故障(图 10)、BC 故障(图 11)和双回线部分 IBIIC 跨线故障时(图 12), 沿线各点故障时 R 侧保护的对应测量阻抗轨迹。图中虚线  $Z_{reference}$  为线路均匀化后的理论沿线阻抗轨迹图, 实线  $Z_j$  为沿线各点故障时保护测量阻抗轨迹图。图 9~图 12 中曲线含义相同。

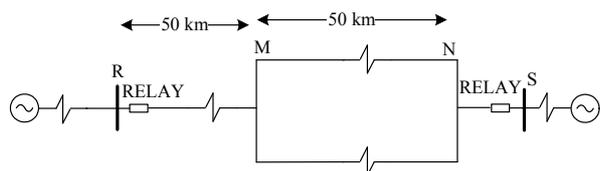


图 8 结构示意图

Fig. 8 Structure diagram

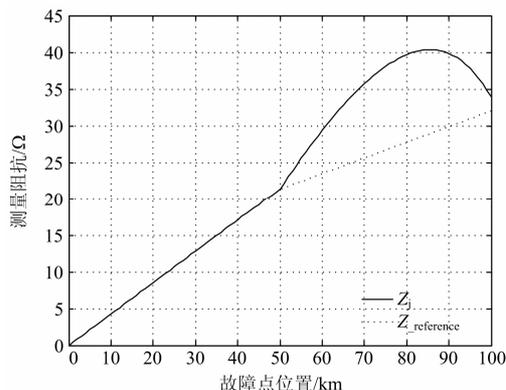


图 9 沿线 A 相故障 A 相测量阻抗轨迹图

Fig. 9 Measurement impedance trajectory of phase A when phase-A fault

图 9 中, 100 km 之后测量阻抗轨迹与线路阻抗不重合, 其原因在于双回线部分存在零序互感, 导致测量阻抗变大, 此现象在前文已有描述。

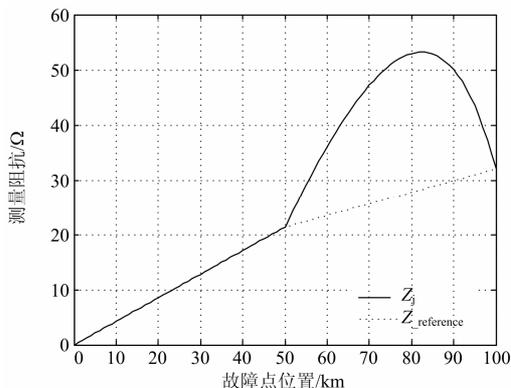


图 10 沿线 ABC 故障 BC 相间测量阻抗轨迹图

Fig. 10 Measurement impedance trajectory of phase BC when three-phase fault

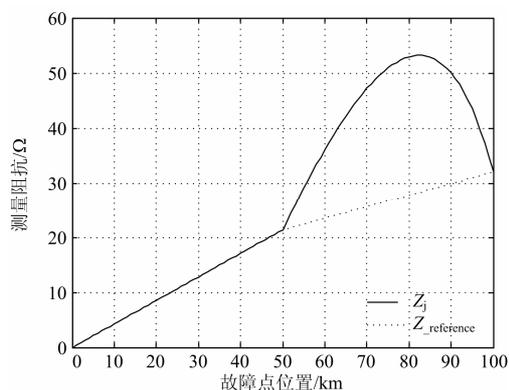


图 11 沿线 BC 故障 BC 相间测量阻抗轨迹图

Fig. 11 Measurement impedance trajectory of phase BC when BC fault

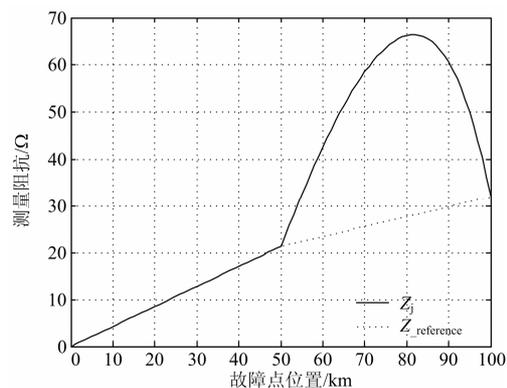


图 12 沿线 IBIIC 跨线故障 BC 相间测量阻抗轨迹图

Fig. 12 Measurement impedance trajectory of phase BC when IBIIC fault

从测量阻抗轨迹可以看到, 不同故障类型时, 故障相测量阻抗反映并不一样, 但总的来看, 在双回线部分发生故障时, 由于串接点部分电压变化, 导致测量阻抗不再线性变化, 在双回线部分某处发生短路时, 测量阻抗将会大于全线阻抗, 特别地, 在线路约 80 km 处发生 IBIIC 跨线故障时, 测量阻抗超过了线路阻抗全长 2 倍。

当 R、S 两侧系统处于不同运行方式下时, 测量阻抗轨迹也随之变化, 图 13 展示了 R、S 两侧方式在不同的组合方式下, R 侧装置沿线 A 相故障时 A 相测量阻抗轨迹。

该软件的输出测量阻抗轨迹与通过 PSCAD/EMTDC 仿真数据计算的测量阻抗轨迹进行了对比, 其结果基本一致, 可证实该软件输出结果基本可信, 限于本文篇幅和主要目的, 此处不展示具体数据对比。

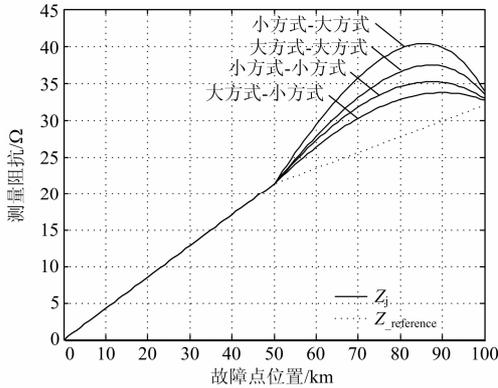


图 13 各种运行方式下沿线 A 相故障 A 相测量阻抗轨迹图  
 Fig. 13 Measurement impedance trajectory of phase A when phase-A fault in various operation modes

### 3.2 距离保护受到的影响

从上一节测量阻抗分析可以看到，由于线路中串接入双回线后，线路的均匀性被破坏。在双回线部分发生故障后，由于双回线的分支系数、零序互感系数的影响，导致保护测量阻抗不再呈现线性特征。而双回线的分支系数又与两侧系统方式、负荷大小以及线路结构有关。这种特征与常规单回线路上测量阻抗与系统方式无关的特征有差异。由于测量阻抗呈现非线性特征，以下分别针对系统常用的欠范围距离保护和超范围距离保护分别进行说明。

#### 1) 欠范围距离保护

欠范围距离保护其保护范围仅为线路一部分，因此，欠范围距离保护必须要求线路区外故障时保护不发生超越，强调其安全性。从这个角度来看，线路区外发生故障，双回线部分可等值为单回线，此时欠范围距离保护不会发生超越动作。

另一方面，从上一节测量阻抗分析情况来看，由于双回线部分故障时测量阻抗呈非线性特征，有可能导致欠范围距离保护其保护范围内灵敏度不够。

#### 2) 超范围距离保护

超范围距离保护其保护范围通常为线路全线，特殊情况下，甚至保护下级线路全线，因此，超范围距离保护主要强调其灵敏性。从上一节的分析结果可以看到，双回线部分发生故障时，测量阻抗有可能偏大，甚至大于线路全长阻抗的 2 倍以上，有可能导致本线故障时，超范围距离元件不能动作。

### 3.3 距离保护的解决方案

针对不同的需求，提出两种解决方案如下。

#### 1) 定值整定优化方案

在不进行保护改造的情况下，可通过优化定值

整定来部分消除串入双回线后的影响。

使用设计的灵敏度校验软件，输入线路及系统参数，扫描各种可能方式及负荷情况下的测量阻抗极值，根据实际情况对定值进行调整以满足不同保护的需求。

对于欠范围距离保护，可仍然按线路 70%~80% 范围整定；对于个别长线，为保证双回线部分故障灵敏度，可将定值适当放大。

对于超范围距离保护，特别是本线路近后备保护，需严格确保本线全线故障时均有灵敏度。通过扫描全线故障时的测量阻抗极大值，按最大值并考虑一定的裕度整定，以实现超范围距离元件的可靠动作，当与下级线路的后备保护灵敏度不能配合时，则需通过时间加以配合。

#### 2) 保护改造方案

若要求取得较真实的电气距离以简化整定，则需对保护进行改造，改造的关键在于如何取得双回线电流。

随着目前光学互感器的快速发展，一种柔性光电流互感器在系统中得到了应用，此柔性光电流互感器安装方便，施工周期短<sup>[12]</sup>。可考虑在串接点处的双回线上均装设柔性光电流互感器。如图 14 所示。

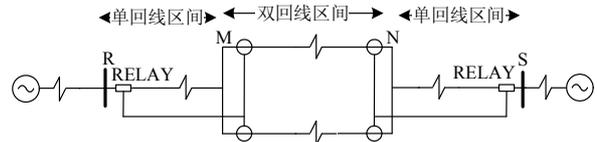


图 14 采用柔性光电流互感器的系统结构图  
 Fig. 14 System structure with the flexible optical CT

在 R 侧保护中接入 M 端装设的柔性光电流互感器。S 侧接入在 N 端装设的柔性光电流互感器。

取得两回线电流后，可使用两回线电流构成横联差动保护的差动元件<sup>[13]</sup>，确定故障点是否在双回线区外，若在双回线外，则直接使用阻抗计算，即可得到真实的电气距离；若在双回线内，则可先由保护安装处电压计算出串接点处电压，再使用横联差动保护的选择元件选出故障线路，其后使用串接点处电压和故障线路电流进行电气距离计算。对于双回线跨线故障的电气距离测量，在得到串接点处电压后，可参考文献[14]的方法，进行电气距离计算。该方案的缺点在于，若本线远后备距离保护需要得到准确电气距离，需要对本线远后备保护进行改造。

目前系统中出现双回线串接入单回线路的情况较少，且一次规划上亦应尽量减少此种方式，因

此, 推荐采用定值整定的方案。若各段定值配合存在无法回避的问题, 可考虑采用保护改造的方案。

#### 4 验证性试验

江西电网 220 kV 肖江-丰城线路出现了双回线串入单回线的情况, 综合评估后, 考虑采用定值整定优化方案。为验证优化方案的正确性, 在某 RTDS<sup>[15-16]</sup>仿真试验室中搭建了肖江-丰城输电工程仿真模型。根据肖江-丰城的杆塔物理参数, 在 RTDS 中构建相应的线路模型, 系统结构图如图 15 所示。保护分别安装在肖江侧和丰城侧。

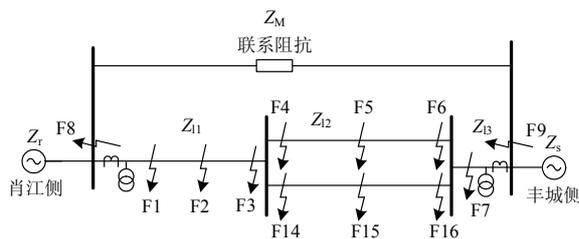


图 15 RTDS 仿真系统结构图

Fig. 15 RTDS simulation system structure

根据杆塔参数计算的线路电气参数如表 3 所示。

表 3 RTDS 线路参数表

Table 3 Circuit parameters table

物理对象	线路长度/km	正序阻抗/Ω	正序阻抗角/(°)	零序阻抗/Ω	零序阻抗角/(°)	零序互感阻抗/Ω	零序互感阻抗角/(°)
Z <sub>11</sub>	39.48	12.28	81	43.52	79	N/A	N/A
Z <sub>12</sub>	7.93	3.25	79	10.70	74	5.92	80
Z <sub>13</sub>	0.18	0.05	79	0.19	79	N/A	N/A

仿真系统中接入了三套超高压系统中常用的线路保护型号, 分别是纵联电流差动保护(RCS-931)、纵联距离保护(RCS-902)以及一套基于四边形距离的纵联距离保护。由于 RCS-902 和 RCS-931 采用基于圆特性的距离保护, 为全面考核优化方案是否普遍可用, 特增加了一套基于四边形距离的线路保护。

肖江和丰城之间系统等值联系阻抗 Z<sub>M</sub> 以及大小方式下系统阻抗(Z<sub>r-max</sub>、Z<sub>s-max</sub>、Z<sub>r-min</sub>、Z<sub>s-min</sub>)如表 4 所示。

试验部分结论如表 5、表 6 所示。从表中可以看到, 对于肖江侧保护, 在特定方式和故障类型情况下, 若超范围整定的距离 II 段或者纵联距离灵敏度整定不合适时, 确有可能出现保护拒动的情况。对于丰城侧保护, 由于双回线占比较小且靠近丰城侧, 因此对于丰城侧的超范围整定的距离元件影响

相对较小。肖江-丰城线路中串入的双回线占比较少, 两侧距离 I 段受到的影响并不明显, 两侧电流差动保护不受影响, 可正确动作。

表 4 RTDS 系统参数表

Table 4 System parameters table

物理对象	线路长度/km	正序阻抗/Ω	正序阻抗角/(°)	零序阻抗/Ω	零序阻抗角/(°)	零序互感阻抗/Ω	零序互感阻抗角/(°)
Z <sub>M</sub>	-	9.20	80	50	80	N/A	N/A
Z <sub>r-max</sub>	-	15.82	85	16.08	85	N/A	N/A
Z <sub>s-max</sub>	-	5.18	85	4.92	85	N/A	N/A
Z <sub>r-min</sub>	-	25.50	85	16.13	85	N/A	N/A
Z <sub>s-min</sub>	-	11.32	85	7.30	85	N/A	N/A

表 5 试验测试结论表(肖江侧)

Table 5 Testing result table (Xiaojiang side)

保护类型	定值/线路	动作情况	定值/线路全	动作情况
	全长比例		长比例	
距离 I 段	80%	正常	90%	部分故障灵敏度不够
距离 II 段	200%	正常	170%	出现拒动
纵联距离	200%	正常	170%	出现拒动
差动保护	按一次电流 600 A 整定, 正常动作			

表 6 试验测试结论表(丰城侧)

Table 6 Testing result table (Fengcheng side)

保护类型	定值/线路	动作情况	定值/线路全	动作情况
	全长比例		长比例	
距离 I 段	80%	正常	70%	正常
距离 II 段	200%	正常	170%	正常
纵联距离	200%	正常	170%	正常
差动保护	按一次电流 600 A 整定, 正常动作			

从验证性试验的结论来看, 与上一节分析的结论基本一致。此外, 验证性试验也基本指出, 肖江-丰城线路肖江侧距离 II 段和纵联距离灵敏度不宜低于 200%。

#### 5 结论

建立了同杆双回输电线路串接入单回输电线路的数学模型, 推导了各种故障类型下的测量阻抗, 测量阻抗特征表明: 在双回输电线路部分发生故障时, 基于单回线路电气量计算的测量阻抗会产生误差, 误差与系统方式、线路参数以及故障点位置有关, 会影响距离保护灵敏度。

编制了计算沿线故障测量阻抗轨迹的软件, 按线路结构输入线路、方式及负荷等参数, 可扫描输

出沿线各点各种故障的测量阻抗轨迹, 供校验距离灵敏度定值使用。

按正常整定原则整定的欠范围距离保护不会发生线路区外故障时超越动作, 但仍然需要关心欠范围距离保护整定点附近故障时, 欠范围距离保护的動作特性。超范围距离保护必须校核各种运行方式和负荷条件下超范围距离保护的灵敏度, 以确保能保护线路全线。

针对距离保护受到的影响提出了两种解决方案: 1) 定值整定优化; 2) 增加支路柔性光电流互感器并改造现有保护。方案 1 无需保护改造, 但需要注意定值优化后与下级线路后备保护之间的配合。方案 2 可确保正确测量电气距离, 无需修改保护定值, 但需要增加额外设备并对现有设备进行改造。

依据现场实际工程参数, 搭建了 RTDS 仿真模型, 并接入了系统中常用的纵联差动保护、基于圆特性的纵联距离保护和基于四边形特性的纵联距离保护。重点针对解决方案 1 进行验证性试验, 试验结果表明: 特定方式和故障类型情况下, 若超范围整定的距离 II 段或者纵联距离灵敏度整定不合适时, 确有可能出现保护拒动的情况。与理论分析结论一致。

需要特别说明的是, 尽管针对此接线方式提出了两种可供参考的解决办法, 但应尽量在一次系统规划时避免出现此接线方式。

### 参考文献

- [1] 孟远景, 鄢安河, 李瑞生, 等. 同杆双回线的六相序阻抗距离保护方案研究[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(6): 12-17.  
MENG Yuanjing, YAN Anhe, LI Ruisheng, et al. The study on six phase sequence distance relay protection scheme for double-circuit lines on the same pole[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(6): 12-17.
- [2] 李斌, 李学斌, 丁茂生, 等. 特高压同杆双回线的环流不平衡及其影响[J]. 电工技术学报, 2012, 27(4): 203-208.  
LI Bin, LI Xuebin, DING Maosheng, et al. Circulating unbalanced current and its influence of double-circuit UHV transmission lines[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2012, 27(4): 203-208.
- [3] 刘宏君, 左金泉, 岳蔚, 等. 同杆并架带弱馈线路保护问题分析[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(10): 125-127.  
LIU Hongjun, ZUO Jinquan, YUE Wei, et al. Analysis of protection problems for double-circuit transmission line with weak-infeed[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(10): 125-127.
- [4] 朱建红, 陈福锋, 魏曜, 等. 新型同杆双回线自适应重合闸方案研究[J]. 电力自动化设备, 2007, 27(4): 47-51.  
ZHU Jianhong, CHEN Fufeng, WEI Yao, et al. Study of selfadaptive reclosing for parallel lines[J]. Electric Power Automation Equipment, 2007, 27(4): 47-51.
- [5] 李博通, 李永丽. 基于故障点电压特性的同杆双回线自适应重合闸[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(11): 46-54.  
LI Botong, LI Yongli. An adaptive autoreclosure technique for double-circuit transmission line based on voltage characteristics at fault point[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(11): 46-54.
- [6] 李斌, 李学斌, 丁茂生, 等. 同杆双回线环流对方向纵联保护的影响及改进[J]. 电力系统自动化, 2011, 35(8): 103-107.  
LI Bin, LI Xuebin, DING Maosheng, et al. Influence of circulating current in same-pole double-circuit transmission lines on directional pilot protection and its improvement[J]. Automation of Electric Power Systems, 2011, 35(8): 103-107.
- [7] 刘家军, 闫泊, 姚李孝, 等. 平行平行双回线中串补电容对零序电抗型距离保护的影响[J]. 电工技术学报, 2011, 26(7): 264-270.  
LIU Jiajun, YAN Bo, YAO Lixiao, et al. Influence of series compensation capacitor on zero sequence reactance type distance protection in parallel double-circuit lines[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2011, 26(7): 264-270.
- [8] 林湘宁, 刘沛. 全电流与故障分量电流比例差动判据的比较研究[J]. 中国电机工程学报, 2004, 24(10): 27-31.  
LIN Xiangning, LIU Pei. Comparative studies on percentage differential criteria using phase current and superimposed phase current[J]. Proceeding of the CSEE, 2004, 24(10): 27-31.
- [9] 伍叶凯, 邹东霞. 分相式微机电流差动保护灵敏度的研究[J]. 上海交通大学学报, 1997, 31(12): 136-141.  
WU Yekai, ZOU Dongxia. Study on sensitivity of microprocessor-based split-phase current differential protection[J]. Journal of Shanghai Jiaotong University, 1997, 31(12): 136-141.

- [10] 张兆云, 陈卫, 张哲, 等. 一种广域差动保护实现方法[J]. 电工技术学报, 2014, 29(2): 298-303.  
ZHANG Zhaoyun, CHEN Wei, ZHANG Zhe, et al. A method of wide-area differential protection[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2014, 29(2): 298-303.
- [11] 葛耀中. 新型继电保护和故障测距的原理和技术[M]. 2版. 西安: 西安交通大学出版社, 2007.
- [12] 陈文升, 王又佳, 杜许峰. 柔性光学电流互感器在电网改造工程中的应用研究[J]. 电气应用, 2014, 33(1): 44-47.  
CHEN Wensheng, WANG Youjia, DU Xufeng. The application of flexible optical CT in a renovation project[J]. Electrotechnical Application, 2014, 33(1): 44-47.
- [13] 鄢安河, 李夏阳, 姚晴林, 等. 正序电压极化的横差保护选择元件的动作研究[J]. 继电器, 2008, 36(8): 7-10.  
YAN Anhe, LI Xiayang, YAO Qinglin, et al. Research on selectors of transverse differential protection using positive sequence polarizing voltage[J]. Relay, 2008, 36(8): 7-10.
- [14] 范春菊, 蔡华嵘, 郁惟镛. 基于六序分量法的同杆双回线精确故障测距[J]. 上海交通大学学报, 2004, 38(8): 1278-1282.  
FAN Chunju, CAI Huarong, YU Weiyong. Accurate fault location for parallel transmission line based on six-sequence fault components[J]. Journal of Shanghai Jiaotong University, 2004, 38(8): 1278-1282.
- [15] 纪尚昆, 冯彦维, 阳育德. 基于RTDS的电力系统在线无功电压优化控制评估[J]. 电网与清洁能源, 2014, 30(3): 23-29.  
JI Shangkun, FENG Yanwei, YANG Yude. Power system online reactive voltage optimal control and assessment based on RTDS[J]. Power System and Clean Energy, 2014, 30(3): 23-29.
- [16] 李罗, 朱静, 白云飞, 等. 基于RTDS的合并单元性能测试研究[J]. 高压电器, 2014, 50(7): 24-30.  
LI Luo, ZHU Jing, BAI Yunfei, et al. Research on performance test of merging unit based on RTDS[J]. High Voltage Apparatus, 2014, 50(7): 24-30.

收稿日期: 2014-10-20; 修回日期: 2015-03-09

作者简介:

赵青春(1980-), 男, 硕士, 高级工程师, 研究方向为高压线路继电保护研究与开发; E-mail: zhaoqc@nrec.com

李志宏(1978-), 男, 硕士, 高级工程师, 研究方向为继电保护运行与管理; E-mail: jxzdlichong@126.com

谢华(1983-), 男, 硕士, 工程师, 研究方向为高压线路继电保护研究与开发。

(编辑 魏小丽)