

DOI: 10.7667/PSPC180362

## 提升距离保护抗过渡电阻能力的研究综述

裘愉涛<sup>1</sup>, 马伟<sup>2</sup>, 丁冬<sup>2</sup>, 王昀昀<sup>3</sup>, 陈琦<sup>4</sup>

(1. 国网浙江省电力有限公司, 浙江 杭州 310009; 2. 国网浙江省电力有限公司杭州供电公司, 浙江 杭州 310009;  
3. 华北电力大学, 北京 昌平 102206; 4. 南京国电南自电网自动化有限公司, 江苏 南京 211153)

**摘要:** 距离保护作为输电线路保护的重要组成部分, 在高压及超高压电网中获得了广泛应用。然而, 故障时过渡电阻的存在严重威胁着距离保护动作正确性, 易导致保护误动或拒动行为。结合现有研究成果, 首先, 着重阐述了距离保护分类、配置、整定原则, 以及过渡电阻对其动作性能的影响。然后, 全面总结了具有抗过渡电阻能力的阻抗继电器、距离继电器和测距式保护研究成果, 分析了应用到实际电网中可能面临的问题。最后, 结合电网现状和科学技术发展成果, 展望了距离保护的发展方向, 以期对距离保护抗过渡电阻能力的进一步研究提供参考。  
**关键词:** 距离保护; 阻抗继电器; 距离继电器; 过渡电阻; 不正确动作

### Overview of research on distance protection against transition resistance

QIU Yutao<sup>1</sup>, MA Wei<sup>2</sup>, DING Dong<sup>2</sup>, WANG Yunyun<sup>3</sup>, CHEN Qi<sup>4</sup>

(1. State Grid Zhejiang Electric Power Company, Hangzhou 310009, China; 2. Hangzhou Power Supply Company, State Grid Zhejiang Electric Power Company, Hangzhou 310009, China; 3. North China Electric Power University, Beijing 102206, China; 4. Nanjing SAC Power Grid Automation Co. Ltd., Nanjing 211153, China)

**Abstract:** As an important part of transmission line protection device, distance protection has been widely applied in high voltage and ultra-high voltage power grid. However, the existence of transition resistance seriously threatens the correctness of distance protection action, which may cause mal-operation or miss operation easily. In the light of the existing research results, firstly, this paper emphasizes the classification, configuration, setting principles and the influence of transition resistance on the performance of distance protection. Secondly, it summarizes the current research achievements of impedance relay, distance relay and ranging protection with resistance to transition resistance and analyzes the problems that may be faced in practical application. Thirdly, it discusses the development trend of distance protection based on the current situation of power grid and electrical technology, which hope to provide a reference for further research on the resistance to transition resistance of distance protection.

This work is supported by Science and Technology Project of State Grid Corporation of China (No. 521104170012 and No. 521101180004).

**Key words:** distance protection; impedance relay; distance relay; transition resistance; incorrect action

## 0 引言

在高压及超高压输电线路, 利用本地电气量实现的保护方案作为纵联主保护的关键补充, 对保障电网安全稳定运行至关重要。相比于其他保护, 距离保护范围和灵敏度受运行方式变化影响较小, 且能满足复杂网络快速、有选择性地切除故障元件

的要求, 获得了最广泛应用<sup>[1-2]</sup>。

影响距离保护动作性能的因素包括系统振荡、互感器断线及误差、过渡电阻、零序互感等<sup>[3]</sup>。然而, 与其他因素相比, 过渡电阻的解决措施尚不理想<sup>[4-5]</sup>, 严重影响着距离保护的動作正确性。统计表明, 单相接地作为电力系统中最常见的故障, 除人为金属性接地故障外, 短路点均存在过渡电阻, 最大可达到 100 Ω(220 kV)、300 Ω(500 kV)和 600 Ω(1 000 kV)。

在现有输电线路保护装置中, 经过渡电阻发生

接地故障时可允许距离保护不动作, 由零序电流保护动作来切除故障。但与距离保护相比, 零序保护范围和灵敏度受系统运行方式影响大, 且无法从根本上协调灵敏性与选择性之间的矛盾<sup>[4]</sup>。另一方面, 随着短输电线路的出现, 担当高阻接地故障保护重任的零序电流保护对高阻接地故障的反映能力亦大为降低。因此, 提升距离保护抗过渡电阻能力一直是线路保护研究的重要内容。

本文总结了现有的关于距离保护抗过渡电阻能力的研究技术, 旨在帮助读者全面了解研究进展与成果。首先, 阐述了距离保护的分类、配置、整定原则, 以及过渡电阻对其动作正确性的影响; 然后, 评述了现有的抗过渡电阻的距离保护技术, 并分析了挂网运行时可能面临的问题; 最后, 结合电网现状和科学技术发展成果, 对距离保护的发展方向进行了展望。

## 1 距离保护的分类、配置与整定

阻抗继电器(第 I 类距离保护)与距离继电器(第 II 类距离保护)是当前线路保护中应用程度最高的距离保护技术。其中, 阻抗继电器主要作为阶段式保护, 其动作方程既可以用阻抗形式表示, 也可以用电压形式表示; 距离继电器主要用作快速保护, 其动作方程一般仅通过电压形式给出。

### 1.1 距离保护的分类

#### 1) 阻抗继电器

阻抗继电器是反映测量阻抗变化的距离保护, 通过判断测量阻抗是否落入其动作区域来判定是否动作: 当落入保护动作区域时, 保护动作; 否则, 不动作。其中, 保护安装处的测量阻抗表达式为

$$Z_m = \frac{\dot{U}_m}{\dot{I}_{m\varphi} + 3KI_0} = \alpha Z_l + \frac{\dot{U}_f}{\dot{I}_{m\varphi} + 3KI_0} = \alpha Z_l + \frac{\dot{I}_f R}{\dot{I}_{m\varphi} + 3KI_0} \quad (1)$$

式中:  $\dot{U}_m$ 、 $\dot{I}_{m\varphi}$  和  $\dot{I}_0$  分别表示保护安装处的电压、电流和零序电流, 且  $\varphi=A,B,C$ ;  $K$  表示零序电流补偿系数;  $\alpha$  表示故障点到保护安装处的距离百分比;  $Z_l$  表线路阻抗;  $\dot{U}_f$  和  $\dot{I}_f$  分别表示故障点的电压和

电流;  $R$  表示过渡电阻;  $\Delta Z = \frac{\dot{I}_f R}{\dot{I}_{m\varphi} + 3KI_0}$  表示过渡电阻引起的故障附加阻抗。

阻抗继电器常见的动作特性有方向圆、四边形、偏移圆和全阻抗等。

#### 2) 距离继电器

距离继电器是按照故障点的电压边界条件建立动作判据, 即利用故障相补偿电压在保护范围临

界点存在相位突变  $180^\circ$  的特点, 来判别区内与区外故障: 当判定为区内故障时, 保护动作; 否则, 不动作。其中, 补偿电压表达式为

$$\dot{U} = \dot{U}_m - (\dot{I}_{m\varphi} + 3KI_0) Z_{set} \quad (2)$$

式中:  $Z_{set}$  表示整定阻抗; 其他符号定义与式(1)中相同。

补偿电压在正常运行态、振荡、两相运行和区外故障时, 均能够正确反映整定点电压; 唯有在保护区内故障时, 方不能准确反映整定点的电压。为判断补偿电压相位是否存在突变, 距离继电器需引入起参考作用的极化量(可以是电压、电流, 或电压与电流构成的复合量)来比相。在保护判据中选择不同的极化量, 可构成具有不同动作特性的保护方案, 如极化距离继电器、工频变化量距离继电器、多相补偿距离继电器、电抗继电器等。

### 1.2 距离保护的配置

按照国标要求, 在 110 kV 电压等级的输电线路<sup>[6]</sup>, 三段式距离保护作为主保护配置(只有对主设备或稳定有要求需快速切除线路的情况下, 才考虑配置纵联主保护); 在 220 kV 及以上电压等级输电线路<sup>[7-8]</sup>, 保护装置应配置完整的三段式距离保护, 以及能够反映近端严重故障的、不依赖于通道的快速距离保护。例如: 南瑞继保 PCS-931G 系列线路保护中, 快速距离保护采用工频变化量距离继电器, 三段式距离保护采用电压极化距离继电器; 国电南自 PSL-603U 系列线路保护中, 快速距离保护采用工频变化量距离继电器, 三段式距离保护采用阻抗继电器。

同时, 为防止接地故障时接地距离保护的超越问题, 在实际应用中通常与零序电抗继电器配合使用。

### 1.3 距离保护的整定

距离保护整定原则是按金属性故障来校验灵敏度, 且不计及弧光电阻的影响。

#### 1) 阻抗继电器

在符合逐级配合原则的前提下, 尽可能提高距离保护的灵敏度。对于配合有困难时, 采用不完全配合, 即后备保护之间定值不配, 按时间段相配的原则整定, 时间级差采用 0.3~0.4 s。

距离 I 段: 按可靠躲过本线路末端故障整定。如 500 kV 输电线路可靠系数取 0.6~0.8; 220 kV 输电线路可靠系数取 0.6~0.7; 同杆或部分同杆的平行双回线可靠系数取 0.5~0.6。对于超短线路(如小于 5 km), 为防止超越应停用距离 I 段。

距离 II 段: 按本线路末端发生金属性故障有足够灵敏度整定, 并与相邻线路距离 I 段或 II 段配合, 也可以与相邻线路主保护配合。

距离 III 段: 按可靠躲过本线路最大事故过负荷电流对应的最小阻抗整定, 并与相邻线路距离 II 段配合。配合有困难可与相邻线路距离 III 段配合整定。

### 2) 距离继电器

距离继电器的定值默认与阻抗继电器 I 段一致, 在国内保护厂家研发的线路装置中, 通常无需单独整定。对于超短线路, 为避免距离继电器灵敏度降低导致的误动问题, 相应保护功能应停用。

## 2 过渡电阻对距离保护的影响

由于构成原理不同, 过渡电阻对阻抗继电器与距离继电器动作性能的影响不同。

### 2.1 对阻抗继电器的影响

测量阻抗  $Z_m$  由真实故障阻抗  $\alpha Z_f$  和故障附加阻抗  $\Delta Z$  两部分共同构成, 而  $\Delta Z$  的大小将直接决定阻抗继电器是否能够正确动作。但故障点电压、电流和过渡电阻均难以测量, 在  $Z_m$  中无法直接消除  $\Delta Z$ 。

对于单电源系统, 由于故障点电流等于保护安装处电流, 因此  $\Delta Z$  呈阻性, 会引起区内故障时保护拒动。对于双电源系统, 由于线路两端电源存在相位差, 故障点电流与保护安装处电流不再同相, 在送电端  $\Delta Z$  多呈阻容性, 会引起区外故障时保护误动; 在受电端  $\Delta Z$  多呈阻感性, 会引起区内故障时保护拒动, 或反向出口故障时失去方向性。以圆特性的阻抗继电器为例,  $\Delta Z$  引起的不正确动作行为如图 1 所示。

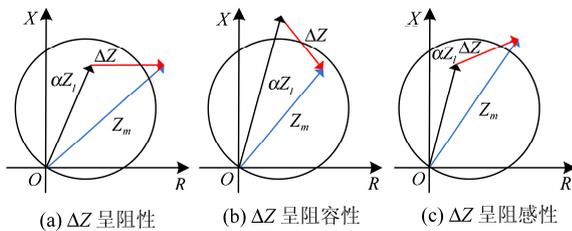


图 1 故障附加阻抗引起的阻抗继电器不正确动作

Fig. 1 Incorrect action of impedance relay caused by fault supplementary impedance

### 2.2 对距离继电器的影响

由于距离继电器不再反应单一的电压量, 因此其耐过渡电阻的能力不仅与极化量、比相条件有关, 同时受系统参数和运行方式的影响, 保护失效边界求解繁杂<sup>[9-10]</sup>。用“支接阻抗”分析得到的某距离继电器动作失效边界<sup>[11]</sup>如图 2 所示。

与阻抗继电器相比, 距离继电器的耐过渡电阻性能较优, 但随着过渡电阻的增大仍存在拒动行为。此外, 部分距离继电器在受电侧面临“同相”问题<sup>[1]</sup>, 即在线路上任意点故障, 当过渡电阻增大到某特定值时, 存在不正确动作的风险。

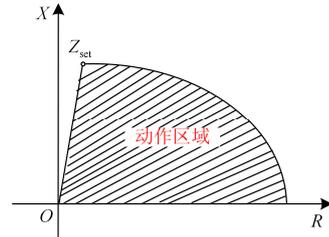


图 2 距离继电器失效边界

Fig. 2 Failure boundary of distance relay

## 3 抗过渡电阻的距离保护技术

### 3.1 阻抗继电器

为提升阻抗继电器的抗过渡电阻能力, 专家学者提出了消除故障附加阻抗或者自适应调整保护动作特性的研究思路。

#### 1) 消除过渡电阻引起的故障附加阻抗

现有方案中, 消除故障附加阻抗的阻抗距离继电器研究是利用特定的假设条件来间接求取真实故障阻抗, 主要以阻抗复数平面和电压相量平面分析为主。

##### a. 基于阻抗复数平面的分析

阻抗复数平面能够清晰地描述测量阻抗的变化轨迹和阻抗继电器的动作边界, 被广泛应用于保护性能评估和事故分析, 以及构建距离保护方案。利用保护安装处序电流与故障点电流的幅值、相位关系, 文献[12-13]根据  $Z_m$ 、 $\Delta Z$  和  $\alpha Z_f$  在阻抗复数平面上的几何分布关系, 在求解得到故障点到保护安装处的实际阻抗的基础上, 构造了距离保护方案; 文献[14]根据故障前负荷电流和故障后电流求解得到故障点到保护安装处的电抗, 构造了适用于距离 I 段的保护方案。

##### b. 基于电压相量平面的分析

电压相量平面能够定量、定性地反映输电线路的故障特征<sup>[15]</sup>, 适合于距离保护分析, 基于此, 具备较强抗过渡电阻能力的多种距离保护方案相继被提出。利用保护安装处的序电流相位近似故障点电压相位, 文献[16-17]通过保护安装处测量电压与故障点电压之间的相位关系, 求解得到保护安装处到故障点的电压降, 并依此构造了不同的距离保护判据。利用故障点电压幅值最小的特点, 文献[18]通过线路末端电压分布趋势来判别区内与区外故障,

但考虑到保护判据中采用了突变量, 难以实现阶段式保护功能。

除基于阻抗复数平面和电压相量平面的分析外, 文献[19-21]借助保护安装处序电流近似求解得到故障点电流, 通过将测量阻抗分解为实部和虚部, 构造关于故障位置  $\alpha$  和过渡电阻  $R$  的二元一次方程组, 以实现抗过渡电阻的距离保护方案。文献[22-23]利用故障后保护安装处测量的有功功率近似等于过渡电阻消耗有功的特点, 通过有功功率计算过渡电阻值, 消除了测量阻抗中故障附加阻抗以反映真实故障距离。

## 2) 自适应调整保护性能

鉴于自适应保护能够根据系统运行方式、故障状态的变化而实时调整保护特性或定值, 能有效改善保护的動作性能<sup>[24]</sup>, 抗过渡电阻的自适应保护方案应运而生。

### a. 离线训练与在线调整相结合的模式

该模式是将不同运行方式下发生故障时的仿真结果作为样本, 通过人工智能算法来离线训练得到距离保护动作性能; 当线路上发生接地故障后, 根据故障状态在线调整保护动作范围<sup>[25]</sup>。

文献[26]将保护安装处到故障点的电阻值、电抗值, 以及故障附加阻抗相位角作为输入量, 利用神经网络输出值来判断区内、区外故障。文献[27]将有功变化量、无功变化量和过渡电阻值作为输入量, 利用径向基函数神经网络的输出值来调整保护动作范围。文献[28]将线路故障时实时测量数据输入到事先训练的神经网络中估算得到过渡电阻引起的倾斜角, 通过调整保护动作范围实现抗过渡电阻。文献[29]将测量阻抗轨迹作为权重系数提出了一种距离保护决策逻辑, 并引入电流幅值来辅助提升区内故障时的动作速度。

该类方案的难点在于需要事先进行大量的仿真试验, 工作量与计算量大; 同时, 样本数量直接决定了保护动作性能, 但现代电网运行方式复杂多变, 离线训练时难以确保能够穷尽所有的样本。

### b. 完全在线调整模式

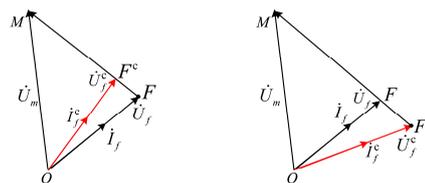
该模式是根据系统故障后采集到的故障信息, 在线自适应计算保护动作量或制动量, 以提升阻抗继电器的抗过渡电阻的能力。

以四边形特性的阻抗继电器为例, 运用于送电端时, 测量电抗随着过渡电阻的增加而减小, 易发生超越; 而在受电端, 测量电抗随着过渡电阻的增加而增加, 保护范围将缩小。为解决该问题, 文献[30]通过对测量电抗的误差进行估算, 根据误差的正负对测量电抗进行实时自适应补偿; 文献[31]在

借助保护安装处序电流求解故障附加阻抗相角的基础上, 根据故障信息自适应调整保护动作区域, 适用于阶段式距离保护; 文献[32-33]根据故障前负荷情况自适应调整电抗线倾斜角, 适用于相间故障。

与离线训练与在线调整相结合的保护方案相比, 该类方案构成模式简单、计算量小、易于实现, 应用前景广阔。

在提升阻抗继电器抗过渡电阻能力的方案研究中, 普遍利用高压及超高压系统中电流分配系数可近似认为是实数<sup>[34]</sup>的特点。实际上, 电流分配系数为一虚数, 且其相角由系统两端等值阻抗、线路阻抗和故障位置共同决定, 当作实数处理时通常在线路中部精度高, 在始端和末端故障时误差大<sup>[35-36]</sup>。具体体现为: 电流分配系数的相角为正时, 保护安装处序电流相位超前于故障点电流或电压相位, 导致计算的故障电气距离比实际值偏小, 如图 3(a)所示; 电流分配系数的相角为负时, 保护安装处序电流相位滞后于故障点电流或电压相位, 导致计算的故障电气距离比实际值偏大, 如图 3(b)所示; 电流分配系数的相角为 0 时, 保护安装处序电流与故障点电流或电压同相位, 计算的故障电气距离方不存在误差。



(a) 电流分配系数的相角为正 (b) 电流分配系数的相角为负

图 3 电流分配系数引起的误差分析

Fig. 3 Error analysis caused by current distribution coefficient

图 3 中,  $\dot{U}_m$  表示保护安装处的电压;  $\dot{U}_f$ 、 $\dot{I}_f$  分别表示故障点电压和电流;  $MF$  表示保护安装处到故障点的实际电气距离;  $\dot{U}_f^c$ 、 $\dot{I}_f^c$  分别表示将电流分配系数当实数处理后计算得到的故障点电压和电流;  $MF^c$  表示保护安装处到故障点的计算电气距离。

为减小保护安装处序电流近似故障点序电流或电压相位的误差, 文献[37]通过修正故障电流相位来提升保护动作性能, 但需要事先知道对端系统阻抗; 文献[38]借助故障前的负荷电流估算过渡电阻, 在求取故障距离后实现距离保护功能, 但需迭代求解、计算量大; 文献[39]利用故障前电源电势与负荷电流之间的相位关系来估算对端系统阻抗, 解决了对端系统阻抗难以获取的问题, 但以系统两端电源电势幅值比相等为前提。

上述改进方案均建立在某种特定假设条件下,尚未从根本上解决将电流分配系数当作实数处理带来的误差问题,难以直接应用到实际电网中,仍需进一步深入研究。

### 3.2 距离继电器

对提升距离继电器抗过渡电阻能力的研究,归根结底是对极化量和比相条件的选择。

#### 1) 电压极化距离继电器

为反应补偿电压的相位变化,专家学者率先提出了以电压作为极化量的距离继电器,其动作方程为

$$90^\circ < \arg \left( \frac{\dot{U}'}{\dot{U}_{m|0|}} \right) < 270^\circ \quad (3)$$

式中:  $\dot{U}'$  表示故障后的补偿电压;  $\dot{U}_{m|0|}$  为极化电压,为消除三相出口故障死区问题,  $\dot{U}_{m|0|}$  宜取记忆电压。

为克服以记忆电压为极化量的距离继电器动作边界固定、抗过渡电阻能力有限的缺陷,专家学者提出多种改进方案,如采用母线电压突变量<sup>[40]</sup>、以补偿电压构成的复合电压<sup>[41]</sup>、保护安装处的序电压<sup>[42-44]</sup>等作为极化电压,其本质是利用它们的动态特性来提升过渡电阻能力。

#### 2) 工频变化量距离继电器

借鉴电压极化距离继电器的构成思路和方法,专家学者们进一步提出了工频变化量距离继电器(亦称突变量距离继电器或故障分量距离继电器),实质是反映补偿电压的幅值变化,其动作方程为

$$\left| \dot{U}' - k\dot{U}_{|0|} \right| \geq \left| k\dot{U}_{|0|} \right| \quad (4)$$

式中:  $\dot{U}_{|0|}$  表示故障前的补偿电压;  $\dot{U}'$  表示故障后的补偿电压;  $k$  为实数,取值不同时保护动作性能不同。

与电压极化距离继电器相比,工频变化量距离继电器具有灵敏度高、动作速度快、耐过渡电阻能力增强等特点<sup>[45]</sup>,是线路保护发展过程中的重要突破,且在微机保护中已获得广泛应用。过渡电阻对工频变化量距离继电器的影响,体现为会引起保护拒动,而不存在超越问题<sup>[1]</sup>。为提升工频变化量的抗过渡电阻能力和解决“同相点”不正确动作的问题,文献[46]提出了可变圆特性的保护方案,利用两组动作判据的互补性实现动作速度与抗过渡电阻能力的协调。为消除长线路上分布电容对工频变化量距离继电器的影响,文献[47]采用分布参数模型来计算补偿电压,以提升区外故障时保护的安全性。

在保持抗过渡电阻能力的同时,专家学者们针对工频变化量距离保护亦开展了抗干扰能力<sup>[48]</sup>、动

作速度<sup>[49]</sup>、外部故障误动<sup>[50]</sup>等方面研究。

#### 3) 多相补偿距离继电器

多相补偿距离继电器是利用不同相或不同相间的补偿电压作为极化量,振荡、过负荷、三相短路等情况下不会发生误动作行为,曾在机械保护时期得到广泛应用<sup>[51]</sup>。若按照动作方程中极化量进行分类,包括相间多相补偿距离继电器、接地多相补偿距离继电器和分相式多相补偿距离继电器。以相间多相补偿距离继电器为例,其动作方程为

$$\begin{cases} 360^\circ > \arg \left( \frac{\dot{U}'_A}{\dot{U}'_{BC}} \right) > 180^\circ \\ 360^\circ > \arg \left( \frac{\dot{U}'_B}{\dot{U}'_{CA}} \right) > 180^\circ \\ 360^\circ > \arg \left( \frac{\dot{U}'_C}{\dot{U}'_{AB}} \right) > 180^\circ \end{cases} \quad (5)$$

式中:  $\dot{U}'_A$ 、 $\dot{U}'_B$ 和 $\dot{U}'_C$ 分别表示A相、B相和C相的补偿电压;  $\dot{U}'_{BC}$ 、 $\dot{U}'_{CA}$ 和 $\dot{U}'_{AB}$ 分别表示BC相间、CA相间和AB相间的补偿电压。

针对相间多相补偿距离继电器对单相接地灵敏度低、抗过渡电阻能力弱的问题,文献[52-53]分别通过在动作判据中引入偏移角或引入零序补偿电压来改善抗过渡电阻能力。

#### 4) 电抗继电器

利用正向区内故障时补偿电压滞后于故障点电压,区外故障时补偿电压超前于故障点电压的故障边界条件<sup>[54]</sup>,专家学者们提出了电抗继电器,其原理是通过保护安装处的序分量与补偿电压比相实现。考虑到零序电流易于提取,因此零序电抗继电器最早获得应用,其动作判据为<sup>[55]</sup>

$$180^\circ < \arg \left( \frac{\dot{U}'}{\dot{I}_0} \right) < 360^\circ \quad (6)$$

式中:  $\dot{U}'$  表示补偿电压;  $\dot{I}_0$  表示保护安装处的零序电流。

零序电抗继电器在送电侧,能够有效解决过渡电阻引起的保护不正确动作;而在受电侧,高阻接地时存在“同相”问题,引起保护在区外故障时误动或区内故障时拒动<sup>[1]</sup>。为解决该问题,文献[56]引入辅助姆欧阻抗继电器,与零序电抗继电器进行“逻辑与”后作为最终的保护动作结果输出;文献[57]以负序电流作为极化量,利用保护安装侧电源电压相位判定同相点,提出了改进动作判据。同时,针对应用于特高压输电线路,零序电抗继电器受分布电容和线路负荷的影响,经过渡电阻发生故障时动作性能面临保护范围缩短和灵敏度降低的问

题, 文献[58]利用负序电流比零序电流更接近故障点电流相位的特点, 在动作方程用负序电流替代了零序电流, 即负序电抗继电器。

在上述 4 类距离继电器中, 前 3 种保护的動作特性为圆, 而电抗继电器的動作特性为直线。

### 3.3 测距式距离保护

阻抗继电器和距离继电器是通过保护判据间接反映故障点是否位于保护区域内来实现跳闸, 而测距式距离保护是集保护与测距功能于一体。该类保护普遍采用故障暂态信息, 具有超高速動作特性, 其基本原理是: 通过求解故障点到保护安装处的距离来识别区内与区外故障, 即当小于保护整定距离时, 保护动作; 当大于保护整定距离时, 保护不动作。

#### 1) 行波测距式

该类方案以行波原理为基础<sup>[59]</sup>, 利用故障点产生向线路两端传输的行波在阻抗不连续点发生折射与反射特点, 通过计算正向波与反向波的时间差实现故障测距, 且要求能够准确辨识正向与反向故障。行波测距式距离保护原理如图 4 所示。

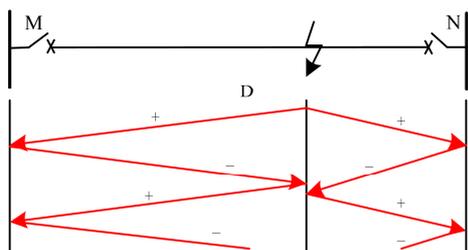


图 4 行波距离保护原理

Fig. 4 Principle of traveling wave distance protection

行波测距式距离保护不受过渡电阻的影响, 但准确识别正向区内与区外故障是保护正确动作的前提。为解决传统方案存在的不足, 文献[60-61]提出了零模测距和线模测距相结合的接地保护方案; 文献[62]提出了基于行波波前时间比较法的改进方案。

行波保护优势明显、实用价值高, 已由理论研究发展至挂网试点阶段。其难点在于波头存在时间短, 难以捕获; 且在电网中任何点故障或者操作都会产生为数众多的反射波, 保护性能面临重大考验。

#### 2) 等效 R-L 模型测距式

考虑到低通滤波器可以将线路电容产生高频分量滤除, 输电线路可等效为 R-L 模型, 且发生接地故障时存在关系, 如式(7)。

$$u = L_1 \frac{di}{dt} + R_1 i + R_f i_f \quad (7)$$

式中:  $u$ 、 $i$  分别表示保护安装处电压和电流;  $i_f$ 、 $R_f$  分别表示故障点电流和过渡电阻;  $L_1$ 、 $R_1$  分别表示保护安装处到故障点的电感和电阻。

鉴于过渡电阻  $R_f$  一般为纯阻性, 因此仅需通过间接方法求取故障点电流, 才能通过解微分方程来求取电感  $L_1$ , 实现基于等效 R-L 模型的测距式距离保护方案。

a. 基于参数识别原理, 建立以故障距离、过渡电阻等参数为未知量的方程, 通过求解由多时间断面信息构成的方程组得到故障距离<sup>[63-65]</sup>。

b. 基于输电线路等传变理论, 通过故障点电压重构、解微分方程等步骤来求取故障距离, 克服了电容式电压互感器(Capacitive Voltage Transformer, CVT)暂态特性引起的距离保护超越问题<sup>[66-67]</sup>。

该类距离保护普遍需要采用连续数个采样信息, 在经弧光高阻接地故障时电弧的动态非线性<sup>[68]</sup>可能对其动作性能产生影响。鉴于此, 文献[69-70]忽略了对端系统阻抗中的电阻后, 分别从时域和频域的角度出发, 利用工频频点和非周期频点同一时刻采样信息构造线性方程组以求得故障距离。影响该类方案在输电线路距离保护中直接应用的主要问题在于, 需采用迭代算法进行求解, 导致计算量增大。

## 4 发展方向

经过继电保护工作者的不懈努力, 距离保护研究成果丰硕, 其抗过渡电阻能力得到有力提升。但随着电网结构的发展, 对距离保护的動作性能也提出了新的要求。

#### 1) 适用于串补线路的距离保护方案

串补电容具备改善电力系统稳定性、优化系统潮流、改善电压质量、提高输送容量等优点, 在长距离输电线路获得广泛应用<sup>[71]</sup>。然而, 串补电容破坏了输电线路阻抗的均匀性, 导致故障暂态过程复杂多变, 改变了测量阻抗与补偿电压, 传统距离保护已难以满足运行要求<sup>[72-73]</sup>。截至目前, 解决方案包括缩范围整定、电平检测方案与故障点识别等, 主要集中于单串补线路, 且距离保护的動作性能仍有较大提升空间。另一方面, 其他电力电子设备也高度渗透到输电线路<sup>[74]</sup>, 如故障限流器、静止同步串联补偿器、统一潮流控制器等。开展距离保护抗过渡电阻研究时, 应计及它们离散型、非线性的动态响应特征。

#### 2) 适用于双回线的距离保护方案

同塔并架双回线以其输送容量大、节约土地、节省投资、建设速度快等优势, 在 220 kV 及以上电压等级电网获得广泛应用<sup>[75-77]</sup>。然而, 网架结构决定了双回线路之间存在着电磁耦合, 导致零序补偿系数受运行方式(包括双回线运行、本线运行邻线检修、本线单侧运行、对端母线解列运行等)影响, 给

传统接地距离保护的应用带来诸多技术挑战。截止目前, 解决方案包括引入邻线电流、近似补偿邻线零序互感、切换保护定值区等, 但大多以金属性故障研究为主, 计及过渡电阻、故障类型等因素的距离保护还需进一步深入研究。

### 3) 适用于短线路的距离保护

在城市高压电网中, 输电线路已呈短距离和电缆化特征, 故障时过渡电阻的存在对距离保护产生了新影响。一方面, 现有技术研究主要致力于解决单相接地故障, 普遍认为相间距离保护不受过渡电阻(即弧光电阻)的影响, 然而在短距离输电线路, 相间距离保护的動作范围受过渡电阻影响较大, 易导致不正确动作<sup>[78]</sup>。另一方面, 电缆线路分布电容大, 测量阻抗与故障距离呈双曲正切函数特征, 导致距离保护抗过渡电阻能力进一步降低。因此, 开展短线路距离保护研究具有重要意义。

### 4) 基于全频域故障信息的快速距离保护

现有距离保护技术研究绝大多数以工频量为基础, 其動作速度已接近极限<sup>[59]</sup>。随着我国交直流混联电网格局的形成, 故障时相互影响特征明显, 保护装置的快速動作对保障电网安全运行尤为关键<sup>[79]</sup>。全频域故障信息包含丰富的故障特征, 如能应用到距离保护中不仅能够加快動作速度, 且有望解决動作性能受制于单端量信息的缺陷。近年来, 部分学者已开始着手研究, 但现有成果存在不同程度假设条件, 尚需更深入地探索分析。

### 5) 基于多源信息的后备距离保护

随着芯片、通信等技术的快速发展, 为利用多源信息实现新型继电保护方案创造了条件。若能够在距离保护中引入远端信息, 可有效提升抗过渡电阻能力<sup>[80]</sup>。利用多源信息的优势, 距离保护既可以从如何避免过渡电阻的影响的角度出发, 也可以利用过渡电阻自身的故障特征来解决高阻接地问题<sup>[81]</sup>。限制该类方案应用的主要问题在于通信异常情况下的動作结果是否可靠。因此, 从实际应用角度来看, 基于多源信息的距离保护宜作为高阻接地的后备。

## 5 结论

为提升距离保护抗过渡电阻能力, 继电保护工作者开展了大量研究, 成果喜人。本文结合现有研究成果, 总结了具备抗过渡电阻能力的距离保护技术:

- 1) 对于阻抗继电器, 主要通过消除过渡电阻引起的故障附加阻抗或自适应调整保护動作性能来实现;
- 2) 对于距离继电器, 主要通过优化保护判据的

极化量或比相条件来实现;

3) 对于测距式距离保护, 主要是利用迭代优化算法实现。

同时, 结合电网现状和科学技术发展成果, 作者展望了距离保护的发展方向, 以期为距离保护抗过渡电阻能力的进一步研究提供参考。

## 参考文献

- [1] 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.
- [2] 葛耀中. 新型继电保护和故障测距的原理与技术[M]. 2版. 西安: 西安交通大学出版社, 2007.
- [3] DUBEY R, SAMANTARAY S R, PANIGRAHI B K. An extreme learning machine based fast and accurate adaptive distance relaying scheme[J]. International Journal of Electrical Power and Energy Systems, 2015, 73: 1002-1014.
- [4] 柳焕章, 李银红. 大电流接地系统线路高阻接地距离继电器[J]. 中国电机工程学报, 2010, 30(34): 93-98. LIU Huanzhang, LI Yinong. High resistance grounded distance relay in solidly earthed system[J]. Proceedings of the CSEE, 2010, 30(34): 93-98.
- [5] XIA B, WANG Y, VÁZQUEZ E, et al. Estimation of fault resistance using fault record data[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2015, 30(1): 153-159.
- [6] 3 kV~110 kV 电网继电保护装置运行整定规程: DL/T 584—2007[S]. 北京: 中国电力出版社, 2008.
- [7] 220~750 kV 电网继电保护装置运行整定规程: DL/T 559—2007[S]. 北京: 中国电力出版社, 2008.
- [8] 1000 kV 线路保护装置技术要求: DL/T 31236—2014[S]. 北京: 中国电力出版社, 2015.
- [9] 姜爱华, 薛晨. 正序电压极化阻抗继电器的保护失效边界模型[J]. 电力自动化设备, 2015, 35(7): 43-49. JIANG Aihua, XUE Chen. Protection failure boundary model of impedance relay with positive-sequence voltage polarization[J]. Electric Power Automation Equipment, 2015, 35(7): 43-49.
- [10] 雷霖, 赖真良, 朱家龙, 等. 工频变化量距离继电器耐受过渡电阻性能分析[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(17): 26-33. LEI Lin, LAI Zhenliang, ZHU Jialong, et al. Performance analysis of endure transition resistance of distance relay based on the power-frequency voltage and current variation[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(17): 26-33.
- [11] 李晓明, 梁军, 张沛云. 阻抗继电器与距离继电器的特点[J]. 继电器, 2001, 29(6): 20-22. LI Xiaoming, LIANG Jun, ZHANG Peiyun. The characteristics of impedance relay and distance relay[J]. Relay, 2001, 29(6): 20-22.
- [12] MAKWANA V H, BHALJA B R. A new digital distance

- relaying scheme for compensation of high-resistance faults on transmission line[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2012, 27(4): 2133-2140.
- [13] 郑涛, 王可坛, 刘校销, 等. 可消除过渡电阻影响的单相接地距离保护研究[J]. 电网技术, 2017, 41(12): 4045-4053.  
ZHENG Tao, WANG Ketan, LIU Xiaoxiao, et al. Research on single phase grounding distance protection against transition resistance[J]. Power System Technology, 2017, 41(12): 4045-4053.
- [14] MAKWANAA V H, BHALJAB B. Distance relaying algorithm for a line-to-ground fault on single infeed lines[J]. Electric Power Components and Systems, 2014, 42: 1227-1238.
- [15] 赵志仁, 马伟, 丁冬, 等. 基于电压相量平面的单相高阻接地保护方案[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(22): 131-136.  
ZHAO Zhiren, MA Wei, DING Dong, et al. Vector diagram of voltage based single-phase high-resistance grounding fault protection scheme[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(22): 131-136.
- [16] 林富洪, 曾惠敏. 一种耐高阻和抗负荷电流影响线路单相接地距离保护[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(23): 132-138.  
LIN Fuhong, ZENG Huimin. A single-phase ground distance protection for transmission line with strong ability of enduring fault resistance and load current[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(23): 132-138.
- [17] MA J, MA W, QIU Y, et al. An adaptive distance protection scheme based on the voltage drop equation[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2015, 30(4): 1931-1940.
- [18] SONG G B, CHU X, GAO S P, et al. Novel distance protection based on distributed parameter model for long-distance transmission lines[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2013, 28(4): 2126-2123.
- [19] XU Z Y, JIANG S J, YANG Q X, et al. Ground distance relaying algorithm for high-resistance fault[J]. IET Generation, Transmission & Distribution, 2010, 4(1): 27-35.
- [20] XU Z Y, XU G, RAN L, et al. A new fault-impedance algorithm for distance relaying on a transmission line[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2010, 25(3): 1384-1392.
- [21] 黄少锋, 曹凯, 罗澜. 一种消除过渡电阻影响的阻抗测量方法[J]. 电力系统自动化, 2013, 37(23): 108-113.  
HUANG Shaofeng, CAO Kai, LUO Lan. A method of impedance measurement to eliminate influence of transition resistance[J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(23): 108-113.
- [22] EISSA M M. Ground distance relay compensation based on fault resistance calculation[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2006, 21(4): 1830-1835.
- [23] 张华中, 王维庆, 朱玲玲, 等. 基于过渡电阻计算的距离保护[J]. 电力系统保护与控制, 2008, 36(18): 37-42.  
ZHANG Huazhong, WANG Weiqing, ZHU Lingling, et al. Ground distance relay based on fault resistance calculation[J]. Power System Protection and Control, 2008, 36(18): 37-42.
- [24] MA J, MA W, YAN X, et al. A new adaptive backup protection scheme based on intelligent electronic devices[J]. Canadian Journal of Electrical and Computer Engineering, 2015, 38(2): 77-88.
- [25] SADEGHI H. A novel method for adaptive distance protection of transmission line connected to wind farms [J]. International Journal of Electrical Power and Energy Systems, 2012, 43: 1376-1382.
- [26] 王晓茹, 钱清泉, 伍思涛. 基于神经网络的自适应距离保护研究[J]. 电力系统自动化, 1998, 22(12): 27-30, 62.  
WANG Xiaoru, QIAN Qingquan, WU Sitao. Study on neural network based adaptive distance protection[J]. Automation of Electric Power Systems, 1998, 22(12): 27-30, 62.
- [27] BHALJA B, MAHESHWARI R P. An adaptive distance relaying scheme using radial basis function neural network[J]. Electric Power Components and Systems, 2007, 35: 245-259.
- [28] 李风光. 距离保护躲过渡电阻能力研究[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(8): 124-127, 154.  
LI Fengguang. The capacity of distance protection hiding from transition resistance[J]. Power System Protection and Control, 2011, 39(8): 124-127, 154.
- [29] MAJID S P, PEYMAN J. An adaptive decision logic to enhance distance protection of transmission lines[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2011, 26(4): 2134-2144.
- [30] 索南加乐, 许庆强, 宋国兵, 等. 自适应接地距离继电器[J]. 电力系统自动化, 2005, 29(17): 54-58.  
SUONAN Jiale, XU Qingqiang, SONG Guobing, et al. Adaptive earth fault distance relay[J]. Automation of Electric Power Systems, 2005, 29(17): 54-58.
- [31] MA J, XIANG X Q, LI P, et al. Adaptive distance protection scheme with quadrilateral characteristic for extremely high-voltage/ultra-high-voltage transmission line[J]. IET Generation, Transmission & Distribution, 2017, 11(7): 1624-1633.
- [32] 沈冰, 何奔腾. 基于阻抗轨迹估计的自适应相间距离继电器[J]. 中国电机工程学报, 2007, 27(31): 71-76.  
SHEN Bing, HE Benteng. A novel adaptive distance protection based on impedance locus estimation[J]. Proceedings of the CSEE, 2007, 27(31): 71-76.

- [33] 沈冰, 何奔腾, 张武军. 新型自适应距离继电器[J]. 电力系统自动化, 2007, 31(7): 39-44.  
SHEN Bing, HE Benteng, ZHANG Wujun. New type adaptive distance relay with improved performance[J]. Automation of Electric Power Systems, 2007, 31(7): 39-44.
- [34] 马静, 王卓, 李文可, 等. 一种抗过渡电阻的新型自适应距离保护方案[J]. 电力系统自动化, 2015, 39(18): 114-121.  
MA Jing, WANG Zhuo, LI Wenke, et al. A new adaptive distance protection scheme against transition resistance[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(18): 114-121.
- [35] ZHONG Y, KANG X N, JIAO Z B, et al. A novel distance protection algorithm for the phase-ground fault[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2014, 29(4): 1718-1725.
- [36] 马伟, 裘愉涛, 丁冬, 等. 基于阻尼最小二乘法的单相接地故障定位方案[J]. 电网技术, 2018, 42(9): 3049-3054.  
MA Wei, QIU Yutao, DING Dong, et al. Single-phase grounding fault location scheme based on Levenberg-Marquardt algorithm[J]. Power System Technology, 2018, 42(9): 3049-3054.
- [37] MA J, YAN X, MA W, et al. A new adaptive distance protection scheme for a transmission line[J]. Electric Power Components and Systems, 2016, 44(1): 1-17.
- [38] FILOMENA A D, SALIM R H, RESENER M, et al. Ground distance relaying with fault-resistance compensation for unbalanced systems[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2008, 23(3): 1319-1326.
- [39] 张华中, 朱玲玲, 张洪涛, 等. 基于估算对侧电源阻抗的自适应距离保护算法[J]. 电力系统自动化, 2011, 35(12): 70-75.  
ZHANG Huazhong, ZHU Lingling, ZHANG Hongtao, et al. Adaptive distance protection algorithm based on estimation of contralateral source impedance[J]. Automation of Electric Power Systems, 2011, 35(12): 70-75.
- [40] 李岩, 陈德树, 尹项根, 等. 新型自适应姆欧继电器的研究[J]. 中国电机工程学报, 2003, 23(1): 81-83.  
LI Yan, CHEN Deshu, YIN Xianggen, et al. Study on the new adaptive MHO relay[J]. Proceedings of the CSEE, 2003, 23(1): 81-83.
- [41] LIU Q K, HUANG S F, LIU H Z, et al, et al. Adaptive impedance relay with composite polarizing voltage against fault resistance[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2008, 23(2): 586-592.
- [42] 杨兰, 杨廷方, 曾祥君. 自适应接地距离继电器的研究[J]. 电工技术学报, 2010, 25(4): 77-81.  
YANG Lan, YANG Tingfang, ZENG Xiangjun. Study of adaptive grounding distance relay[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2010, 25(4): 77-81.
- [43] 景敏慧. 距离继电器正序极化电压[J]. 电力系统自动化, 2010, 34(1): 51-54.  
JING Minhui. Positive-sequence polarized voltage of distance relay[J]. Automation of Electric Power Systems, 2010, 34(1): 51-54.
- [44] 龙军, 王冠南, 徐鹏, 等. 可变圆限定性负序电压极化距离继电器[J]. 电网技术, 2012, 36(11): 240-246.  
LONG Jun, WANG Guannan, XU Peng, et al. Distance relay with changeable circle restrictive characteristics based on negative sequence voltage polarization[J]. Power System Technology, 2012, 36(11): 240-246.
- [45] 胡玉峰, 柳焕章. 以故障前补偿电压为基准量的距离继电器研究[J]. 中国电机工程学报, 2006, 26(16): 27-32.  
HU Yufeng, LIU Huanzhang. Study on distance relay based on pre-fault compensated voltage[J]. Proceedings of the CSEE, 2006, 26(16): 27-32.
- [46] 刘千宽, 柳焕章, 黄少峰. 可变圆特性的故障分量距离继电器[J]. 电工技术学报, 2007, 22(12): 77-83.  
LIU Qiankuan, LIU Huanzhang, HUANG Shaofeng. Fault component distance relay with changeable circle characteristics[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2007, 22(12): 77-83.
- [47] 钱国明, 陈福锋, 李玲, 等. 基于分布参数模型的突变量距离保护新算法[J]. 电力系统自动化, 2011, 35(20): 78-80, 87.  
QIAN Guoming, CHEN Fufeng, LI Ling, et al. A new algorithm for industrial frequency variation distance protection based on distribution parameter model[J]. Automation of Electric Power Systems, 2011, 35(20): 78-80, 87.
- [48] 邵能灵, 林韩, 陈金祥, 等. 改进的比幅式工频变化量距离继电器方案[J]. 电力系统自动化, 2006, 30(9): 56-60.  
TAI Nengling, LIN Han, CHEN Jinxiang, et al. A new improved fault component distance relay based on voltage amplitude comparison[J]. Automation of Electric Power Systems, 2006, 30(9): 56-60.
- [49] 柳焕章, 贾晓辉. 自适应突变量继电器及其傅里叶算法[J]. 电力系统自动化, 2011, 35(20): 74-77.  
LIU Huanzhang, JIA Xiaohui. Adaptive variation relay and its fourier algorithm[J]. Automation of Electric Power Systems, 2011, 35(20): 74-77.
- [50] 鲁文军, 林湘宁, 黄小波, 等. 一种采用浮动门槛的自适应突变量距离保护方案[J]. 电工技术学报, 2009, 24(6): 160-165.  
LU Wenjun, LIN Xiangning, HUANG Xiaobo, et al. A scheme of adaptive fault component distance protection using float threshold[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2009, 24(6): 160-165.

- [51] 崔柳, 董新洲, 施慎行, 等. 多相补偿距离继电器在振荡且伴随单相接地故障下的动作性能分析[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(14): 214-224.  
CUI Liu, DONG Xinzhou, SHI Shenxing, et al. Performance analysis of multiphase compensated distance relay in single-phase-to-ground fault with power swing[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(14): 214-224.
- [52] 黄少锋, 江清楷. 过渡电阻对多相补偿阻抗元件影响的分析及对策[J]. 电网技术, 2011, 35(8): 202-206.  
HUANG Shaofeng, JIANG Qingkai. Analysis on impact of transition resistance on multi-phase compensation impedance element and its countermeasures[J]. Power System Technology, 2011, 35(8): 202-206.
- [53] 崔柳, 董新洲. 具有抗过渡电阻能力的多相补偿距离继电器[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(19): 3220-3225.  
CUI Liu, DONG Xinzhou. Multiphase compensated distance relay insensitive to transition resistances[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(19): 3220-3225.
- [54] MA J, YAN X, FAN B, et al. A novel line protection scheme for a single phase-to-ground fault based on voltage phase comparison[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2016, 31(5): 2018-2027.
- [55] 范春菊, 于会萍, 郁惟镛, 等. 零序电抗继电器抗过渡电阻能力分析[J]. 电力自动化设备, 2001, 21(10): 7-10.  
FAN Chunju, YU Huiping, YU Weiyong, et al. Ability analysis of zero-sequence reactance relay against transient resistance[J]. Electric Power Automation Equipment, 2001, 21(10): 7-10.
- [56] 许磊, 郑玉平, 吴通华. 零序电抗继电器区外高阻接地误动问题的解决方案[J]. 电力系统自动化, 2013, 37(20): 114-118.  
XU Lei, ZHENG Yuping, WU Tonghua. Solution of protection maloperation for zero-sequence reactance relay under external high resistance ground fault[J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(20): 114-118.
- [57] 李斌, 常文华, 赵长兵, 等. 超高压输电线路接地电抗继电器研究[J]. 电力自动化设备, 2009, 29(8): 8-12.  
LI Bin, CHANG Wenhua, ZHAO Changbing, et al. Earthing fault reactance relay of EHV transmission line[J]. Electric Power Automation Equipment, 2009, 29(8): 8-12.
- [58] 王宾, 董新洲, 薄志谦, 等. 特高压交流长线路零序电抗继电器动作特性分析及改进[J]. 电工技术学报, 2008, 23(12): 60-64.  
WANG Bin, DONG Xinzhou, BO Zhiqian, et al. Analysis and improvement of zero sequence reactance relay with applications in ultra-high-voltage long AC transmission lines[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2008, 23(12): 60-64.
- [59] 葛耀中, 董新洲, 董杏丽. 测距式行波距离保护的研究(一): 理论与实现技术[J]. 电力系统自动化, 2002, 26(6): 34-40.  
GE Yaozhong, DONG Xinzhou, DONG Xingli. Travelling wave-based distance protection with fault location, part one: theory and technology[J]. Automation of Electric Power Systems, 2002, 26(6): 34-40.
- [60] 司大军, 束洪春, 陈学允. 一种基于行波测距的输电线路接地故障距离保护方案[J]. 电工技术学报, 2003, 18(4): 65-69.  
SI Dajun, SHU Hongchun, CHEN Xueyun. A new distance protection scheme based on travelling wave fault location for grounded faults[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2003, 18(4): 65-69.
- [61] 束洪春, 司大军, 陈学允. 输电线路行波测距式距离保护方法研究[J]. 华北电力大学学报, 2003, 30(4): 1-5.  
SHU Hongchun, SI Dajun, CHEN Xueyun. Study on distance protection scheme based on traveling wave fault location[J]. Journal of North China Electric Power University, 2003, 30(4): 1-5.
- [62] 白嘉, 徐玉琴, 尚国伟. 基于多分辨形态梯度的行波距离保护方案[J]. 高电压技术, 2006, 32(10): 121-123, 133.  
BAI Jia, XU Yuqin, SHANG Guowei. New scheme of traveling wave distance protection based on multi-resolution morphological gradient[J]. High Voltage Engineering, 2006, 32(10): 121-123, 133.
- [63] 陈学伟, 高厚磊, 向珉江, 等. 基于电子式互感器微分输出的改进 R-L 模型距离保护算法[J]. 电工技术学报, 2014, 29(6): 283-289.  
CHEN Xuewei, GAO Houlei, XIANG Minjiang, et al. Improved R-L model distance protection algorithm based on differential output of electronic transducers[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2014, 29(6): 283-289.
- [64] 侯俊杰, 樊艳芳, 钟显, 等. 适应于风电接入系统的抗高阻接地时域方程距离保护研究[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(1): 122-128.  
HOU Junjie, FAN Yanfang, ZHONG Xian, et al. Research on high resistance grounding time domain equation based distance protection for wind power accessed power system[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(1): 122-128.
- [65] 侯俊杰, 樊艳芳, 王一波. 适应于集群风电送出线的参数识别时域距离保护研究[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(5): 46-53.  
HOU Junjie, FAN Yanfang, WANG Yibo. Research on time domain distance protection based on parameter identification for cluster wind power outgoing line[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(5): 46-53.
- [66] 文明浩, 陈德树, 尹项根. 超高压线路等传变快速距

- 离保护[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(4): 145-150.  
WEN Minghao, CHEN Deshu, YIN Xianggen. Fast distance protection of EHV transmission lines based on equal transfer processes[J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(4): 145-150.
- [67] 裘愉涛, 潘武略, 倪传坤, 等. 风电场送出线等传变距离保护[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 41(23): 132-138.  
QIU Yutao, PAN Wulüe, NI Chuankun, et al. Equal transfer process-based distance protection for wind farm outgoing transmission line[J]. Power System Protection and Control, 2015, 41(23): 132-138.
- [68] 孙月琴, 倪江, 王宾, 等. 应用于输电线路单端测距的高阻接地故障电弧模型分析[J]. 电力系统自动化, 2016, 40(22): 86-92.  
SUN Yueqin, NI Jiang, WANG Bin, et al. Transmission line high-impedance fault modeling analysis for single-end fault location[J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(22): 86-92.
- [69] 索南加乐, 王增超, 张健康, 等. 基于参数识别的高阻接地距离保护算法[J]. 中国电机工程学报, 2011, 31(31): 173-178.  
SUONAN Jiale, WANG Zengchao, ZHANG Jiankang, et al. A novel distance protection algorithm for high resistance grounding faults based on parameter identification[J]. Proceedings of the CSEE, 2011, 31(31): 173-178.
- [70] 索南加乐, 钟应, 王增超, 等. 基于频域参数识别的距离保护算法[J]. 电力系统自动化, 2012, 36(19): 73-77, 104.  
SUONAN Jiale, ZHONG Ying, WANG Zengchao, et al. Distance protection algorithm based on parameter identification in frequency domain[J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(19): 73-77, 104.
- [71] HASHEMI S M, HAGH M T, SEYEDI H. A novel backup distance protection scheme for series-compensated transmission lines[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2014, 29(2): 699-707.
- [72] XU Z Y, ZHANG J H, SU Z P, et al. A new distance relaying algorithm for single-phase-to-ground faults on series-compensated parallel lines without the parameter requirement of mutual coupling and series capacitor device[J]. Electric Power Components and Systems, 2014, 42(6): 650-657.
- [73] QI X W, WEN M H, YIN X G, et al. A novel fast distance relay for series compensated transmission lines[J]. Electric Power Systems Research, 2015, 64: 1-8.
- [74] 魏繁荣, 李慧, 林湘宁, 等. 考虑 TCSC 型故障限流器动态过程的距离保护整定方法[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(8): 2279-2289.  
WEI Fanrong, LI Hui, LIN Xiangning, et al. Distance protection setting strategy considering the dynamic impedance process of TCSC-FCL[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(8): 2279-2289.
- [75] JIA K, BI T S, LI W, et al. Ground fault distance protection for paralleled transmission lines[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2015, 51(6): 5228-5236.
- [76] XU Z Y, ZHANG X, HE J, et al. First-zone distance relaying algorithm of parallel transmission lines for single-phase to ground faults[J]. International Journal of Electrical Power and Energy Systems, 2016, 80: 374-381.
- [77] MARCOS R A, CLEVER P. A practical first-zone distance relaying algorithm for long parallel transmission lines[J]. Electric Power Systems Research, 2017, 146: 17-24.
- [78] 康小宁, 赵选宗, 索南加乐, 等. 输电短线路的相间自适应距离保护[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(17): 22-27, 32.  
KANG Xiaoning, ZHAO Xuanzong, SUONAN Jiale, et al. Phase-to-phase adaptive distance relay for transmission short line[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(17): 22-27, 32.
- [79] 陈国平, 王德林, 裘愉涛, 等. 继电保护面临的挑战与展望[J]. 电力系统自动化, 2017, 41(16): 1-11, 26.  
CHEN Guoping, WANG Delin, QIU Yutao, et al. Challenges and development prospects of relay protection technology[J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(16): 1-11, 26.
- [80] CHEN M X, WANG H F, SHEN S F, et al. Research on a distance relay-based wide-area backup protection algorithm for transmission lines[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2017, 32(1): 97-105.
- [81] 马啸, 随权, 魏繁荣, 等. 新型和阻抗保护判据及其动作行为分析[J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(21): 6333-6345.  
MA Xiao, SUI Quan, WEI Fanrong, et al. A novel summation impedance protection and its operation characteristic analysis[J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(21): 6333-6345.

收稿日期: 2018-04-01; 修回日期: 2018-06-11

作者简介:

裘愉涛(1967—), 男, 硕士, 教授级高级工程师, 主要研究方向为继电保护运行管理; E-mail: zdqyt@vip.sina.com

马伟(1989—), 男, 通信作者, 硕士, 工程师, 主要研究方向为电力系统继电保护; E-mail: jnyz-mawei@163.com

丁冬(1989—), 女, 硕士, 工程师, 主要研究方向为电力系统运行与控制。E-mail: hzdd1130@sina.com

(编辑 许威)