

# 基于高阻接地距离继电器的零序电流保护选择性提升方案

李 勇<sup>1,2</sup>, 李银红<sup>3,4</sup>, 柳焕章<sup>1,2</sup>, 刘 阳<sup>1,2</sup>

(1. 国家电网有限公司华中分部, 湖北省武汉市 430077; 2. 柳焕章劳模创新工作室, 湖北省武汉市 430077;

3. 华中科技大学电气与电子工程学院, 湖北省武汉市 430074;

4. 强电磁工程与新技术国家重点实验室(华中科技大学), 湖北省武汉市 430074)

**摘要:** 交流线路零序电流保护最末一段均采用 300 A 定值, 存在无序跳闸风险。因此, 文中提出了基于零序电抗线和非故障相极化的高阻接地距离继电器原理。继电器采用先选相、后测量的技术路线, 选相元件将零序电抗线与非故障相极化方法相结合, 构成多种组合判据, 以分工完成选相。由于保护安装处零序电流与故障点零序电流存在相位差异, 单相接地故障的故障相和相间接地故障的超前相的零序电抗线在故障点位于整定点附近时存在混叠区。区内近端、低阻单相接地故障时非故障相工作电压大幅变化, 不利于区分混叠区的两类故障, 故将选相元件分为低阻模块和高阻模块。低阻模块采用下偏的零序电抗线, 用于识别近端、低阻故障; 经低阻模块辅助后, 高阻模块只需针对性处置故障点位于整定点附近的故障, 可有效区分两类故障。选相完成后, 通过非故障相极化的方法获得故障前工作电压, 从而确定继电器的动作特性。高阻距离继电器的耐过渡电阻能力远超规程要求, 提高了接地后备保护对高阻接地故障的选择性。

**关键词:** 高阻接地距离继电器; 零序电流极化; 非故障相极化; 零序电流保护; 接地距离保护; 零序电抗线; 距离继电器稳态超越

## 0 引言

受通信电源消失、光缆中断等因素影响, 同时失去双重化配置线路主保护的事件时有发生。规程要求, 对于 220 kV 及以上线路, 在配置双套主保护的基础上, 还必须配置完备的接地后备保护<sup>[1]</sup>。

220 kV 及以上交流线路采用接地距离保护与零序电流保护共同作为接地故障的后备保护。其中, 接地距离保护耐受过渡电阻能力较弱<sup>[2-3]</sup>, 仅能够可靠切除低阻接地故障, 接地距离保护对高阻接地故障<sup>[4-13]</sup>的灵敏性不足。零序电流保护作为补充, 用于切除高阻接地故障<sup>[1]</sup>。故障零序电流随系统运行方式的调整而产生较大变化, 且 220 kV 及以上电网普遍为纵横交错的复杂环网, 零序电流保护定值难以严格地逐级配合整定, 零序电流保护的选择性不足。现有“接地距离+零序电流”的接地故障保护方案存在不足, 难以保证对高阻接地故障的正确可靠切除。

在目前的电网运行管理中, 普遍存在“强化主保护、简化后备保护”的倾向。在具备双重化主保护的前提下, 允许零序电流保护失去一定的选择性, 以确保接地故障可靠隔离。规程要求, 对于故障电流不小于 1 kA 的单相接地故障必须可靠切除<sup>[1]</sup>, 且定时限零序电流保护的末段定值或反时限零序电流保护的启动定值不高于 300 A<sup>[14]</sup>, 这一要求满足了线路保护对接地故障可靠切除的灵敏性要求, 但却难以兼顾选择性。目前, 线路保护装置中多配置两段定时限零序电流保护与一段反时限零序电流保护。在实际定时限零序电流保护整定计算中, 除局部电网的少数线路采用时间级差配合的不完全配合方式外, 普遍采用所有线路零序电流保护取相同定值的处理办法, 无法保证定时限零序电流保护的选择性。反时限零序电流保护<sup>[15-16]</sup>的选择性优于定时限零序电流保护, 但受接地点位置和网络结构影响, 仍然存在失配的可能。

2024 年 2 月上旬, 受寒潮天气影响, 华中电网 500 kV 及以上交流线路发生 29 次故障。其中, 高阻接地故障发生 3 次, 均由线路差动保护动作快速切除, 但在故障持续过程中, 接地距离 I 段和对线路末端有灵敏度整定的接地距离保护 II 段、III 段均未启

收稿日期: 2024-02-28; 修回日期: 2024-07-12。

上网日期: 2024-08-30。

国家电网有限公司华中分部科技项目(521400230004); 已申请国家发明专利(申请号:2024109442260)。

动。该情况说明,高阻接地故障确实存在,且接地距离保护存在拒动风险。当发生高阻接地故障时,若线路双套主保护因通道中断或直流电源消失等原因而拒动,则由于零序电流保护选择性不足,可能导致故障近区大范围线路的零序电流保护无序动作。因此,研究如何在保证灵敏性的前提下,提升接地后备保护在高阻接地故障时的选择性,具有重要意义。

文献[17]所提出的高阻接地距离继电器选相判据较为复杂,不利于装置实现。文献[18]所提出的高阻接地保护方案需要采用线路双端量,而不是单端量保护,在通信电源消失、光缆中断时将和主保护一起失效。文献[19]提出自适应距离保护,在保护安装处采用负序电流相位代替故障点电流相位,但未考虑相位误差的影响。本文提出了一种新型高阻距离继电器和提升交流线路零序电流后备保护选择性的改进方案,在不降低线路零序电流保护灵敏性的基础上,通过所提新型高阻接地距离继电器辅助提升零序电流保护的选择性。

## 1 高阻距离继电器

### 1.1 基本原理

本文提出的高阻距离继电器 $Z_C$ 属于第2类距离继电器<sup>[20]</sup>,其动作原理是按照故障点 $F$ 的电压边界条件设置动作判据。

假设整定点发生经过渡电阻接地故障,此时,第2类距离继电器的工作电压为:

$$\dot{U}'_{\varphi} = \dot{U}_{\varphi} - (\dot{I}_{\varphi} + 3k\dot{I}_0)Z_{\text{set}} \quad (1)$$

$$\dot{U}'_{\varphi} = \dot{U}'_{\text{set},\varphi} = \dot{U}_{F,\varphi} \quad (2)$$

式中:下标 $\varphi=A, B, C$ 表示相别; $\dot{U}'_{\varphi}$ 为继电器工作电压; $\dot{U}_{\varphi}$ 、 $\dot{I}_{\varphi}$ 、 $\dot{I}_0$ 分别为保护安装处相电压、相电流、零序电流; $k$ 为保护所在线路的零序补偿系数; $Z_{\text{set}}$ 为保护的整定阻抗; $\dot{U}'_{\text{set},\varphi}$ 、 $\dot{U}_{F,\varphi}$ 分别为整定点、故障点 $F$ 的相电压。

若能够求得故障点电压随过渡电阻大小变化的轨迹,则令这条轨迹作为判断高阻距离继电器是否应该动作的边界,将有效提升接地距离继电器的耐受过渡电阻能力。

应用等价计算电路<sup>[21]</sup>和电压相量图法<sup>[21]</sup>来精确描述单相接地故障第2类距离继电器的动作边界。故障端口故障相开路电压 $\dot{U}'_{\varphi[0]} = \dot{U}'_{\text{set},\varphi[0]} = \dot{U}_{F,\varphi[0]}$ ,其中, $\dot{U}'_{\varphi[0]}$ 、 $\dot{U}'_{\text{set},\varphi[0]}$ 、 $\dot{U}_{F,\varphi[0]}$ 分别为故障前继电器工作电压、整定点电压、故障点电压。单相接地时故障相的等价计算电路和故障点电压轨迹如图1所示。图中: $\arg Z = \arg(Z_0 + Z_1 + Z_2)$ 为入端阻抗角,其中, $Z_0$ 、 $Z_1$ 、 $Z_2$ 分别为系统等值到故障端口的零

序、正序、负序阻抗, $Z$ 为三者之和; $R_F$ 为故障点的过渡电阻; $\dot{I}_F = 3\dot{I}_{F0} = 3\dot{I}_{F1} = 3\dot{I}_{F2}$ 为故障点 $F$ 的电流,其中, $\dot{I}_{F0}$ 、 $\dot{I}_{F1}$ 、 $\dot{I}_{F2}$ 分别为故障点电流的零序、正序、负序分量。

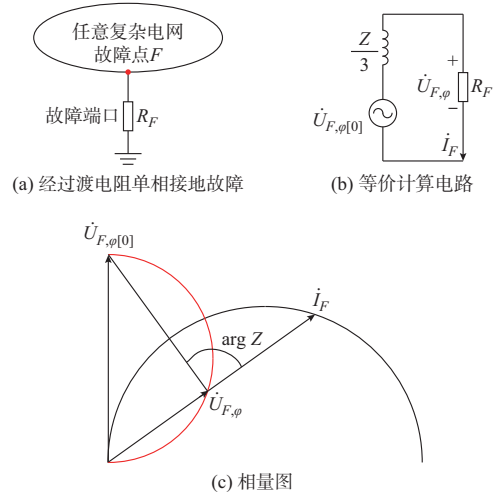


图1 单相接地时故障相的等价计算电路和故障点电压轨迹  
Fig. 1 Equivalent calculation circuit of fault phase and voltage locus of fault point for single-phase grounding

根据文献[20]分析可知,在故障点与整定点相同的条件下,故障相的工作电压等于故障点电压,随故障点过渡电阻变化,其轨迹如图1(c)中红色圆弧所示。当过渡电阻为0时, $\dot{U}_{F,\varphi} = 0$ ;当过渡电阻为 $\infty$ 时, $\dot{U}_{F,\varphi} = \dot{U}'_{\varphi[0]}$ 。当故障点偏离整定点时,故障相工作电压将偏离红色圆弧,采用电压相量图法分析可知,区内故障时工作电压将落在红色圆弧外,区外故障时工作电压将落在红色圆弧内。

根据图1所示相量图可分析得出如下两个动作判据:1)以故障前工作电压 $\dot{U}'_{\varphi[0]}$ 为极化<sup>[21]</sup>的一段劣弧(图1所示红色圆弧)外为动作区;2)以故障点电流 $\dot{I}_F$ 为极化, $\dot{U}'_{\varphi}$ 相位滞后于 $\dot{I}_F$ 为动作区。上述两个判据均以故障相工作电压 $\dot{U}'_{\varphi}$ 为动作变量,若 $\dot{U}'_{\varphi}$ 落到动作区,则继电器动作。A相接地故障时的两个判据的动作区如附录A图A1所示。因此,高阻距离继电器的动作判据可转化为求取 $\dot{U}'_{\varphi[0]}$ 、 $\arg Z$ 以及 $\arg \dot{I}_F$ 。

判据1需要求取 $\dot{U}'_{\varphi[0]}$ 和 $\arg Z$ 。 $\arg Z$ 相对稳定,可近似估计。但由于后备保护动作延时长,不能采用记忆电压<sup>[22]</sup>,故 $\dot{U}'_{\varphi[0]}$ 无法直接获得,只能通过非故障相极化的方法来替代计算,即利用实时的非故障相电压、电流计算出极化量 $\dot{U}'_{\varphi[0]}$ 。

判据2需要求取 $\arg \dot{I}_F$ 。由于单端量保护得不到 $\arg \dot{I}_F$ ,在默认故障点两侧系统零序阻抗角相近的

情况下,可采用  $\arg \dot{I}_0$  替代  $\arg \dot{I}_F$ , 即零序电流  $\dot{I}_0$  极化,也称为零序电抗线。

## 1.2 技术路线

由于图1所示等价计算电路<sup>[21]</sup>和相量关系,以及由此得出的高阻接地故障动作判据1和判据2都只针对单相接地故障的故障相成立,只有在选相正确及  $\arg Z$  和  $\arg \dot{I}_F$  准确的前提下,计算结果才有效,否则不能正确判断故障位置。因此,高阻距离继电器必须先选相、后测量。

高阻距离继电器通过联合应用零序电流极化和非故障相极化方法进行故障选相。若选相成功,则进入测量判据;若选相失败,则  $Z_G$  直接不动作。选相成功、进入测量判据后,测量元件根据正确的选相结果,利用非故障相电压、电流求得  $\dot{U}'_{\varphi[0]}$ , 从而构建判据1对应的动作方程,准确地测量出故障点位置,实现单相故障的切除。

## 1.3 性能要求

### 1) 动作要求

接地后备保护只在经过渡电阻单相接地故障时才存在选择性问题。因此,  $Z_G$  只需重点应对单相接地故障。三相短路和两相相间短路时没有零序电流,故通过设置零序电流门槛即可排除,重点需要研究两相接地故障对  $Z_G$  的影响。

设计  $Z_G$  的目的是提升线路后备保护对单相接地故障的选择性。因此,对于单相接地故障而言,要求  $Z_G$  在区内故障时必须可靠动作,在区外故障时必须可靠不动作。同时,考虑线路延时后备保护动作一般直接三跳,任何类型的区内故障都允许  $Z_G$  动作。因此,对于两相接地故障而言,要求  $Z_G$  在区内故障时可动作也可不动作,在区外故障时必须可靠不动作。

### 2) 选相要求

对于单相接地故障,在区内故障时必须选相成功,而区外故障时对选相不作要求,其原因如下:若区外单相接地故障选相失败,则  $Z_G$  不动作即满足选择性要求;若区外单相故障选相成功,则基于非故障相极化的测量元件能准确判断为区外故障,  $Z_G$  不动作同样能够满足选择性要求。

对于两相接地故障,在区内故障时允许选相失败,也允许选相成功;在区外故障时必须选相失败。区内两相接地故障时,要求  $Z_G$  可动作也可不动作。当选相成功,即误选相为单相接地故障时,测量元件的非故障相极化电压是错误的,测量元件可能将该故障误判为区内单相接地故障而导致  $Z_G$  动作,但此时是区内故障,即便  $Z_G$  动作也满足选择性要求;当

选相失败时,  $Z_G$  不动作。此时,可由相间距离保护动作切除故障。区外两相接地故障时,必须选相失败。若选相成功,则因测量元件中的非故障相极化电压是错误的,  $Z_G$  可能误动,故必须避免。

综上所述,  $Z_G$  的选相要求如下:在区内单相接地故障时必须选相成功,在区外单相接地故障时不作要求;区外两相接地故障时必须选相失败,区内两相接地故障不作要求。下文将重点研究如何保证区内单相接地故障和区外两相接地故障这两种情况下  $Z_G$  选相元件的正确性。

## 2 实施步骤

实施步骤整体逻辑如图2所示。图中:  $\dot{U}'_{0, II} = (\dot{U}'_{A, II} + \dot{U}'_{B, II} + \dot{U}'_{C, II})/3$  为  $Z_G$  的 II 段零序工作电压,其中,  $\dot{U}'_{\varphi, II}$  为  $Z_G$  的 II 段工作电压,即将接地距离 II 段阻抗定值  $Z_{set, II}$  代入式(1)中得到的  $\dot{U}'_{\varphi}$ ;  $\dot{U}_0$  为保护安装处零序电压;  $\dot{I}_{\varphi 1}$  为保护安装处正序电流;  $\varphi_{max}$  为保护安装处相电流与正序电流作差的绝对值最大的相别,即序电流预选相选中的故障相;  $U_c$  为电压互感器额定线电压;  $I_{BC}$  为保护安装处 B、C 相电流差的模值;  $I_n$  为电流互感器二次额定电流;  $r$  是以  $\arg [\dot{U}'_A/(-\dot{U}'_C)]$  为自变量的函数,将在 2.3.2 节中确定其表达式;  $\theta$  为整定点处  $\arg Z$  的补角,即  $\theta = 180^\circ - \arg Z$ 。

为分析保护安装处是在线路的送端还是受端,定义变量  $\varphi_{BC}$  如下:

$$\varphi_{BC} = \arg \left( \frac{\dot{U}_B - \dot{U}_C}{\dot{I}_B - \dot{I}_C} \right) + (90^\circ - \varphi_{L1}) \quad (3)$$

式中:  $\varphi_{BC}$  为判断送受端的角度;  $\varphi_{L1}$  为保护所在线路的正序阻抗角。

$\Delta \dot{U}'_A$  为 A 相工作电压的变化量,其表达式为:

$$\Delta \dot{U}'_A = \dot{U}'_A - U'_{A[0]} \quad (4)$$

### 2.1 启动条件

为加强  $Z_G$  的安全性,防止反向故障时误动,设置零序方向元件为启动条件,即  $3I_0 > 300 A$  且  $|3\dot{U}'_{0, II}| > 0.5 \times |3 \times 3\dot{U}_0 - 3\dot{U}'_{0, II}|$ , 其中,  $I_0$  为零序电流幅值。

若满足启动条件,则零序方向元件动作。零序方向元件不动作时,  $Z_G$  不动作。零序方向元件具有明确的方向性。正向单相接地故障和两相接地故障时满足启动条件,进入下一步判断;反向单相接地故障和两相接地故障时均不满足启动条件,  $Z_G$  不动作。零序方向元件的工作原理见附录 B。

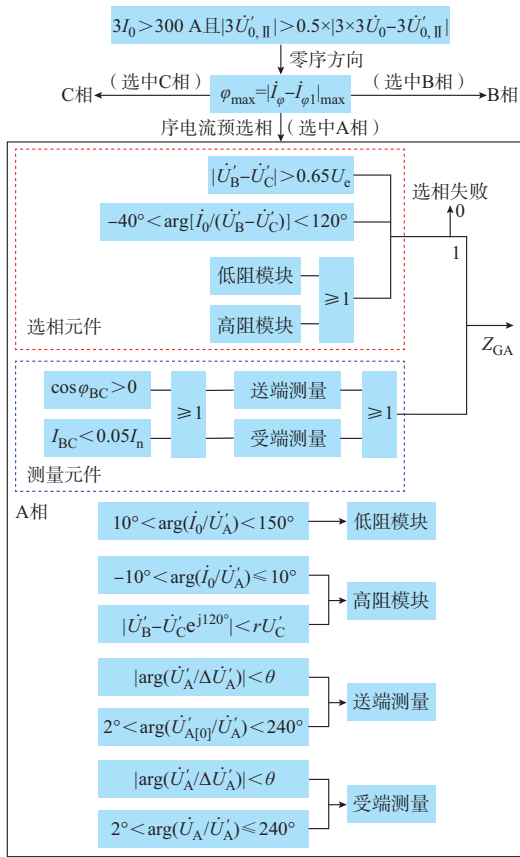


图2 实施步骤整体逻辑框图(序电流预选相选中A相为例)  
 Fig. 2 Overall logic block diagram of implementation steps (a case where preselected sequence current phase is phase A)

2.2 序电流预选相

采用序电流预选相方法,选出单相接地故障的故障相。序电流预选相动作方程为  $\varphi_{max} = |\dot{I}_\varphi - \dot{I}_{\varphi 1}|_{max}$ 。在序电流选相元件选中A相的情况下,只存在3种故障类型:K(A)、K(BC)以及K(AB)<sup>[23]</sup>。其中,K(A)表示A相接地故障,K(BC)表示BC两相接地故障,K(AB)表示AB两相接地故障。因此,还需进一步选相来区分单相接地故障和两相接地故障。除特殊说明外,下文均以序电流预选相选中A相为例进行分析。

2.3 选相元件

本文基于多相补偿的概念,将零序电抗线与非故障相极化方法联合应用,共同完成选相。

2.3.1 K(A)与K(BC)接地故障的区分

单相接地故障时,两个非故障相的工作电压差等于故障前整定点的电压差,约等于  $U_e$ ;区外两相接地故障时,两个故障相的工作电压差的幅值为故障前整定点两个故障相电压差的0%~100%,即在  $U_e$  的0%~100%范围内变化,而且故障点越远离整

定点,两个故障相工作电压差越大。根据这两类故障时  $\dot{U}'_B - \dot{U}'_C$  的幅值差异可建立选相元件的一个判据,即  $|\dot{U}'_B - \dot{U}'_C| > 0.65U_e$ 。该判据将离整定点较近的区外K(BC)接地故障排除。

然后,根据这两类故障时  $\dot{U}'_B - \dot{U}'_C$  基本同相,而  $\dot{I}_0$  基本反相,可采用  $-40^\circ < \arg[\dot{I}_0 / (\dot{U}'_B - \dot{U}'_C)] < 120^\circ$  判据排除K(BC)接地故障。同时满足上述两判据,才可判断为K(A)接地故障,由此可排除区外K(BC)接地故障。

2.3.2 K(A)与K(AB)接地故障的区分

区内K(A)接地故障和区外K(AB)接地故障的电压相量图如图3所示。受过渡电阻的影响,区内K(A)接地故障时,  $\dot{I}_{F0}$  超前  $\dot{U}'_A$  的角度在  $0^\circ \sim (180^\circ - \arg Z)$  范围内变化;区外K(AB)接地故障时,  $\dot{I}_{F0}$  滞后  $\dot{U}'_A$  的角度在  $0^\circ \sim (60^\circ + \arg Z)$  范围内变化。由此可见,区内K(A)接地故障与区外K(AB)接地故障的  $\dot{U}'_A$  与  $\dot{I}_{F0}$  的相位关系存在差异:K(A)接地故障时  $\dot{U}'_A$  滞后  $\dot{I}_{F0}$ ,K(AB)接地故障时  $\dot{U}'_A$  超前  $\dot{I}_{F0}$ 。如果可以准确得到  $\dot{I}_{F0}$ ,则利用零序电抗线( $\dot{U}'_A$  滞后  $\dot{I}_{F0}$  为动作区)即可区分两类故障。但受替代计算和测量误差影响,当两类故障在  $\dot{I}_{F0}$  与  $\dot{U}'_A$  之间的相位差接近  $0^\circ$  时,存在混叠区,下面重点研究如何在混叠区辨别两类故障。

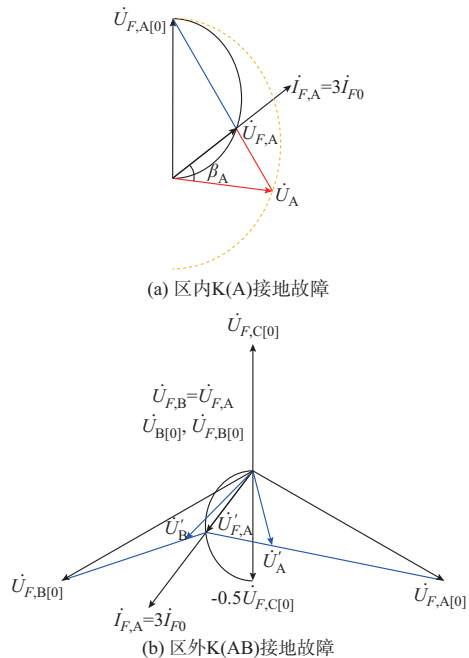


图3 区内K(A)和区外K(AB)接地故障时的电压相量图  
 Fig. 3 Voltage phasor diagram for K(A) grounding fault within protection zone and K(AB) grounding fault outside protection zone

由于  $\dot{I}_{F0}$  不能直接获得,而采用  $\dot{I}_0$  代替计算,电力系统各节点零序阻抗角不可能完全相同。因此,两者存在一定的相位差异。当  $\dot{I}_0$  滞后于  $\dot{I}_{F0}$  时,小部分地区内 A 相接地故障将被零序电抗线误选为区外。为避免该情况,还必须采用上偏零序电抗线(即将零序电抗线往逆时针方向偏转一定角度),但上偏零序电抗线也会选中小部分地区外 K(AB) 接地故障。为解决这一矛盾,本文将选相元件分成低阻和高阻两个模块。低阻模块专门负责近端、低阻单相接地故障选相;同时,由于远端、高阻单相接地故障的非故障相工作电压变化范围较小,降低了高阻模块区分 K(AB) 和 K(A) 接地故障的难度。下文将对低阻模块和高阻模块分别进行研究。

### 1) 低阻模块

低阻模块采用下偏的零序电抗线,动作区为  $10^\circ < \arg(\dot{I}_0/\dot{U}'_A) < 150^\circ$ ,可有效排除区外 K(AB) 接地故障,能可靠防止 K(A) 接地故障以及 K(AB) 接地故障超越。需要指出的是,部分地区内 A 相接地故障不能被下偏的 A 相零序电抗线识别,遗漏的故障包括两种情况:a)  $\dot{U}'_A$  滞后于  $\dot{I}_0$  的角度在  $0^\circ \sim 10^\circ$  区间的故障;b) 由于故障点两侧系统零序阻抗角不一致,  $\dot{I}_0$  滞后于  $\dot{I}_{F0}$  导致遗漏的故障。这两种情况下,故障对应的  $\dot{U}'_A$  滞后于  $\dot{I}_0$  的角度接近  $0^\circ$ ,而整定点故障时,  $\dot{U}'_A$  和  $\dot{I}_0$  的角度差接近  $0^\circ$ 。因此,无论是 K(A) 接地故障还是 K(AB) 接地故障,遗漏故障的故障点位置均在靠近整定点的一段范围内,而此时非故障相工作电压变化范围小。而且对于区内 K(A) 接地故障,在故障点位置固定时,过渡电阻越小,故障电流越大,  $\dot{U}'_A$  滞后于  $\dot{I}_0$  的角度越大,更易落在低阻模块的动作区。低阻模块实现了对近端、低阻单相接地故障的正确选相,从而降低了高阻模块中排除 K(AB) 接地故障的难度。

### 2) 高阻模块

高阻模块的目的是识别低阻模块所遗漏的区内 K(A) 接地故障,故采用上偏的零序电抗线,其动作方程为  $-10^\circ < \arg(\dot{I}_0/\dot{U}'_A) \leq 10^\circ$ 。  $\pm 10^\circ$  的范围是为了将 K(A) 接地故障以及 K(AB) 接地故障限定在零序电流分配系数造成的稳态超越范围内,同时考虑为  $\dot{I}_0$  与  $\dot{I}_{F0}$  间的相位偏差留取一定裕度。上偏零序电抗线不仅选中了区内 K(A) 接地故障,还会选中小部分地区外 K(A) 接地故障,这部分区外 K(A) 接地故障由测量元件来排除。

高阻模块的上偏零序电抗线存在误把区外 K(AB) 接地故障选中的可能,为了排除区外 K(AB) 接地故障,本文以 K(A) 接地故障和 K(AB) 接地故

障中共同的非故障相  $\dot{U}'_C$  为极化,构建以  $\dot{U}'_B$  为变量的动作方程,即  $|\dot{U}'_B - \dot{U}'_C e^{j120^\circ}| < rU'_C$ 。该动作方程对应的动作区域是半径为  $r$  的圆,圆内为动作区,如图 4 所示。半径  $r$  是以  $\arg[\dot{U}'_A/(-\dot{U}'_C)]$  为自变量的函数,反映了 K(A) 接地故障中过渡电阻的大小。若同时满足该动作方程与上述上偏零序电抗线,则高阻模块判断为 K(A) 接地故障。

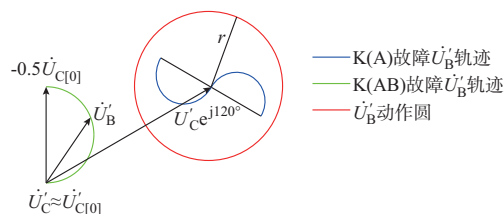


图 4 以非故障相  $\dot{U}'_C$  为极化的  $\dot{U}'_B$  动作区示意图  
Fig. 4 Schematic diagram of action region of  $\dot{U}'_B$  with non-fault phase  $\dot{U}'_C$  as polarization

在  $-10^\circ < \arg(\dot{I}_0/\dot{U}'_A) \leq 10^\circ$  条件下,以  $\arg Z$  (在  $60^\circ \sim 90^\circ$  范围内变化) 为参变量,220 kV 及以上系统中  $|Z_0/Z_1|$  一般在 1~3 之间<sup>[24]</sup>,分析两类故障下  $\dot{U}'_B$  与  $\dot{U}'_{B[0]}$  相量差的模值随  $\arg[\dot{U}'_A/(-\dot{U}'_C)]$  变化关系。K(A) 接地故障时,在给定的过渡电阻下,当  $\dot{I}_0$  超前  $\dot{I}_{F0}$  了  $10^\circ$  且  $\dot{U}'_A$  恰好位于动作边界  $\arg(\dot{I}_0/\dot{U}'_A) = -10^\circ$  时,  $\dot{U}'_B$  与  $\dot{U}'_{B[0]}$  相量差的模值最大;当过渡电阻变化时,将得到一条图 5 所示蓝色曲线。该曲线表示 K(A) 接地故障时  $\dot{U}'_B$  与  $\dot{U}'_{B[0]}$  相量差的模值最大值随  $\arg[\dot{U}'_A/(-\dot{U}'_C)]$  的变化关系,每条蓝色曲线对应一个  $\arg Z$ ,从下到上依次对应的  $\arg Z$  从  $60^\circ$  逐渐增大到  $90^\circ$ ,最上方的蓝色曲线对应  $\arg Z = 90^\circ$ 。在 K(AB) 接地故障下给定过渡电阻,当  $\dot{I}_0$  超前  $\dot{I}_{F0}$  了  $10^\circ$  且  $\dot{U}'_A$  恰好位于动作边界  $\arg(\dot{I}_0/\dot{U}'_A) = -10^\circ$  时,  $\dot{U}'_B$  与  $\dot{U}'_{B[0]}$  相量差的模值最小;当过渡电阻变化时,将得到一条图 5 所示绿色曲线。该曲线表示 K(AB) 接地故障时  $\dot{U}'_B$  与  $\dot{U}'_{B[0]}$  相量差的模值最小值随  $\arg[\dot{U}'_A/(-\dot{U}'_C)]$  的变化关系,从上到下依次对应  $\arg Z$  从  $60^\circ$  逐渐增大到  $90^\circ$ ,最下方的绿色曲线对应  $\arg Z = 90^\circ$ 。由此得到两簇曲线之间的分界线,即  $r$  函数,如图 5 中红色曲线所示。

动作方程  $|\dot{U}'_B - \dot{U}'_C e^{j120^\circ}| < rU'_C$  能够排除区外 K(AB) 接地故障的原理如下:由于设置高阻模块的目的是识别低阻模块所遗漏的区内 K(A) 接地故障,而这些故障的故障点靠近整定点,对于靠近整定点的 K(AB) 接地故障而言,  $\dot{U}'_B$  将落在以  $-0.5\dot{U}'_{C[0]}$  为弦的圆弧附近,如图 3(b) 所示,显然  $\dot{U}'_B$  与  $\dot{U}'_{B[0]}$  幅

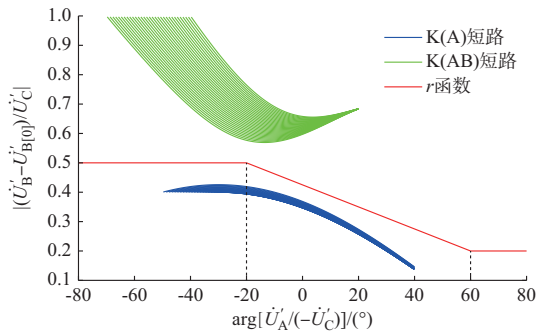


图5  $\dot{U}'_B$ 与 $\dot{U}'_{B[0]}$ 相量差的模值随 $\arg[\dot{U}'_A/(-\dot{U}'_C)]$ 的变化关系以及 $r$ 函数的确定  
Fig. 5 Relationship of phasor difference modulus between  $\dot{U}'_B$  and  $\dot{U}'_{B[0]}$  changing with  $\arg[\dot{U}'_A/(-\dot{U}'_C)]$  and determination of  $r$  function

值和相位均相差较大。而对于靠近整定点的K(A)接地故障,非故障相的工作电压 $\dot{U}'_B$ 与 $\dot{U}'_{B[0]}$ 幅值和相位均接近。因此,可利用 $\dot{U}'_B$ 与 $\dot{U}'_{B[0]}$ 的幅值和相位关系来区分两类故障。可通过两类故障共同的非故障相工作电压 $\dot{U}'_C$ 来近似获得 $\dot{U}'_{B[0]}$ 。随着K(A)接地故障的过渡电阻增加,其 $\dot{U}'_B$ 将逐渐趋近于 $\dot{U}'_{B[0]}$ 。因此,可选择较小的 $r$ 值,从而有效区分靠近整定点的K(A)接地故障和K(AB)接地故障。

2.4 测量元件

测量元件的主要目的就是识别选相元件所未能识别的区外K(A)单相接地故障。因此,测量元件只要在选相完成的基础上,正确识别出区外K(A)接地故障即可。

选出K(A)单相接地故障的故障相别后,可以通过非故障相的电气量来反映故障相故障前状态,如式(5)所示。

$$\dot{U}'_{A[0]} = \frac{j(\dot{U}'_B - \dot{U}'_C)}{\sqrt{3}} \quad (5)$$

在电压平面上,当保护区内K(A)接地故障时, $\dot{U}'_A$ 将落在以 $\dot{U}'_{A[0]}$ 为弦的一段劣弧外,测量元件的动作区如图6阴影部分所示。

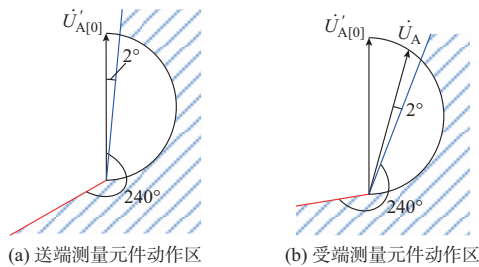


图6 高阻距离继电器的动作特性  
Fig. 6 Action characteristics of high-resistance distance relay

若 $|\arg(\dot{U}'_A/\Delta\dot{U}'_A)| < \theta$ ,则表示 $\dot{U}'_A$ 落在弧外,此时 $Z_G$ 继续进行后续逻辑判断,否则 $Z_G$ 不动作。为了躲过负荷影响,送端 $Z_G$ 测量元件必须增加负荷限制线 $\dot{U}'_{A[0]}e^{-j2^\circ}$ ,以避免负荷导致 $Z_G$ 误动。同理,受端也必须增加同相限制线 $\dot{U}'_Ae^{-j2^\circ}$ ,以避免同相点导致 $Z_G$ 误动。

测量元件对于送端保护的动作方程如下:

$$\cos \varphi_{BC} > 0 \text{ 或 } I_{BC} < 0.05I_n \quad (6)$$

$$2^\circ < \arg\left(\frac{\dot{U}'_{A[0]}}{\dot{U}'_A}\right) < 240^\circ \quad (7)$$

若式(6)、式(7)同时满足,则送端保护测量元件动作,其动作区如图6(a)所示。图中:蓝线、红线分别为式(7)中 $\arg(\dot{U}'_{A[0]}/\dot{U}'_A)$ 等于 $2^\circ$ 和 $240^\circ$ 两个边界。

测量元件对于受端保护的动作方程为:

$$\cos \varphi_{BC} \leq 0 \text{ 且 } I_{BC} \geq 0.05I_n \quad (8)$$

$$2^\circ < \arg\left(\frac{\dot{U}'_A}{\dot{U}'_A}\right) < 240^\circ \quad (9)$$

若式(8)、式(9)同时满足,则受端保护测量元件动作,其动作区如图6(b)所示。图中:蓝线、红线分别为式(10)中 $\arg(\dot{U}'_A/\dot{U}'_A)$ 等于 $2^\circ$ 和 $240^\circ$ 两个边界。

2.5 零序电流保护改进方案

为避免对保护体系进行大幅调整,尽量兼容继承线路后备保护配置和整定现状,针对现有线路接地距离保护耐受过渡电阻能力不足和零序电流保护选择性不足的问题,本文建议线路经高阻接地故障时,后备保护利用 $Z_G$ 的判断结果来加速零序电流保护动作的跳闸逻辑。即在本线零序电流保护判断 $3I_0$ 达到其电流动作定值300 A后,根据 $Z_G$ 的判断结果来决定是否缩短零序电流保护动作时间以加速跳闸。若此时 $Z_G$ 判断为区内单相接地故障,则零序电流保护加速跳闸;若此时 $Z_G$ 判断不是区内单相接地故障,则零序电流保护动作时间不变。线路现有零序电流后备保护其他判别逻辑不变,时间定值和零序电流定值整定原则不变。

单相接地故障时,故障点过渡电阻的大小主要影响故障电流的大小和相位,但对故障电流在各支路中的分配比例影响较小,即不论过渡电阻的大小如何变化,流过任意两回线的故障电流大小之比基本不变。换言之,同一故障点经过渡电阻接地和金属性接地时,上下级线路故障电流具有比值基本不变的特点。因此, $Z_G$ 对于经过渡电阻接地故障的选择性,等同于接地距离保护对相同位置处金属性单

相接地故障的选择性。在现有接地距离保护的整定计算中,已考虑助增和汲出效应的影响,且采用逐级配合整定来保证对金属性单相接地故障的选择性,故不必另外单独考虑该效应对高阻距离继电器的影响。 $Z_G$ 可以采用与现有接地距离保护 I、II、III 段相同的定值生成对应的  $Z_{G_I}$ 、 $Z_{G_{II}}$ 、 $Z_{G_{III}}$ ,不必单独设置定值。线路现有接地距离后备保护判别逻辑、延时定值和跳闸逻辑不变。

$Z_{G_I}$ 、 $Z_{G_{II}}$ 、 $Z_{G_{III}}$  动作后,可采用有差别缩短现有零序电流保护动作时间定值的方法来提零序电流保护的选择性。建议  $Z_{G_I}$ 、 $Z_{G_{II}}$ 、 $Z_{G_{III}}$  分别将零序电流保护动作时间  $t$  缩短 1.4、1.0、0.5 s,具体跳闸逻辑如图 7 所示。由于现有的零序电流保护动作时间一般在 3 s 以上,故即使  $Z_{G_I}$  加速 1.4 s,动作时间为 1.6 s,仍大于重合闸时间 1.3 s。需要说明的是,由于各电网零序电流保护时间和重合闸时间可能存在差异,可根据实际情况对缩短的时间进行相应调整。

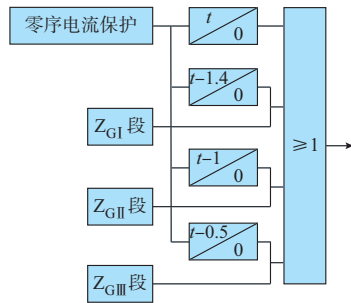


图 7 高阻距离继电器的跳闸逻辑框图  
Fig. 7 Trip logic block diagram of high-resistance distance relay

### 3 仿真分析

#### 3.1 简单结构电网仿真

仿真案例如附录 A 图 A2 所示,500 kV 线路长度为 150 km,正序阻抗为  $0.27\angle 85^\circ \Omega/\text{km}$ ,零序阻抗为  $0.75\angle 75^\circ \Omega/\text{km}$ ;两侧电源系统正序、负序阻抗相等,即  $Z_{S1}=Z_{S2}=13.78\angle 85^\circ \Omega$ ,零序阻抗  $Z_{S0}=35.83\angle 85^\circ \Omega$ ;保护安装在 M 侧。线路负荷大小考虑空载与 1.2 倍自然功率两种情况。在 M 侧母线左、右侧分别设置保护反向及正向出口故障;在 N 侧母线处设置正向故障点,仿真中  $Z_G$  只投入一段,其整定阻抗分别设置为线路全长正序阻抗的 95%、105% 来实现区外故障和区内故障的模拟,即当整定阻抗为线路全长正序阻抗的 95% 时,N 侧母线故障约为 105% 位置处的区外故障;当整定阻抗为线路全长正序阻抗的 105% 时,N 侧母线故障约为 95% 位置处的区内故障。为了更好地验证  $Z_G$  耐过渡电阻能力,将启动条件中零序电流门槛定值设置

为  $3I_0 > 100 \text{ A}$ ;过渡电阻分别设置为 0、100、300、500  $\Omega$ ;3 个故障点均分别设置 K(A)、K(BC) 和 K(AB) 三种类型;定值  $\theta$  整定为  $95.6^\circ$ 。仿真结果如下。

#### 1) 反向出口故障和正向出口故障

方向性仿真结果如表 1 所示。表中:“√”表示继电器或保护动作;“×”表示继电器或保护不动作,下同。反向出口两相接地故障和单相接地故障  $Z_G$  可靠不动作;正向出口单相接地故障  $Z_G$  可靠动作,与理论分析一致。

表 1 方向性仿真结果  
Table 1 Directional simulation results

故障位置	故障类型	接地电阻/ $\Omega$	$3I_0/\text{A}$	高阻距离
反向出口故障	K(BC)	0	2 536	×
	K(BC)	100	555	×
	K(BC)	300	192	×
	K(BC)	500	116	×
	K(AB)	0	2 535	×
	K(AB)	100	555	×
	K(AB)	300	192	×
	K(AB)	500	116	×
	K(A)	0	3 434	×
	K(A)	100	566	×
	K(A)	300	193	×
	K(A)	500	116	×
正向出口故障	K(A)	0	14 390	√
	K(A)	100	2 388	√
	K(A)	300	815	√
	K(A)	500	490	√

#### 2) 区外两相接地故障

区外相间节点故障仿真结果如表 2 所示。可见,区外两相接地故障时, $Z_G$  可靠不超越,与理论分析一致。

表 2 区外相间接地故障仿真结果  
Table 2 Simulation results of inter-phase grounding fault outside protection zone

故障类型	接地电阻/ $\Omega$	故障点位置/%	$3I_0/\text{A}$	高阻距离
K(BC)	0	105	2 617	×
K(BC)	100	105	573	×
K(BC)	300	105	198	×
K(BC)	500	105	120	×
K(AB)	0	105	2 616	×
K(AB)	100	105	573	×
K(AB)	300	105	198	×
K(AB)	500	105	120	×

3)单相接地故障

单相接地故障仿真结果如表3所示。可见,正向区内单相接地故障时, $Z_G$ 可靠动作;正向区外单相接地故障时, $Z_G$ 可靠不动作,与理论分析一致。

表3 单相接地故障仿真结果  
Table 3 Simulation results of single-phase grounding fault

故障类型	接地电阻/ $\Omega$	故障点位置/%	$3I_0/A$	高阻距离
K(A)	0	95	3 544	✓
K(A)	100	95	584	✓
K(A)	300	95	199	✓
K(A)	500	95	120	✓
K(A)	0	105	3 544	×
K(A)	100	105	584	×
K(A)	300	105	199	×
K(A)	500	105	120	×

3.2 复杂结构电网仿真

仿真电网结构如附录A图A3所示。其中, $M$ 、 $N$ 、 $Q$ 三侧电源系统正序、负序阻抗为 $Z_{s1}=Z_{s2}=13.78\angle 85^\circ \Omega$ 、零序阻抗 $Z_{s0}=35.83\angle 85^\circ \Omega$ ;500 kV线路 $L_1$ 、 $L_2$ 、 $L_3$ 长度分别为150、150、100 km,单位长度参数均相同,其正序阻抗为 $0.27\angle 85^\circ \Omega/km$ ,零序阻抗为 $0.75\angle 75^\circ \Omega/km$ ,其中, $L_1$ 、 $L_2$ 为同塔双回线,单位长度互感阻抗为 $0.375\angle 68^\circ \Omega/km$ ;保护安装在线路 $L_1$ 的 $M$ 侧。设置故障点 $F_1$ 、 $F_2$ 、 $F_3$ ,其中, $F_1$ 位于线路 $L_1$ 从左至右的95%位置处, $F_2$ 位于线路 $L_3$ 从左至右的5%位置处, $F_3$ 位于 $M$ 侧母线左侧出口处。整定阻抗设置为线路 $L_1$ 全长正序阻抗。为了更好地验证 $Z_G$ 的耐过渡电阻能力,将启动条件中零序电流门槛定值设置为 $3I_0 > 100 A$ ;接地电阻分别设置为0、100、300、500  $\Omega$ ;各故障点故障类型分别设置为K(A)、K(BC)和K(AB);定值 $\theta$ 整定为 $97.3^\circ$ 。

仿真结果如表4所示。可见, $Z_G$ 对于有分支和同塔双回线的复杂电网结构也能适应,反向故障可靠不动作。

3.3 故障录波验证

对2024年2月上旬发生在华中电网的3起

表4 复杂电网仿真结果

Table 4 Simulation results of complex power grid

故障点位置	故障类型	接地电阻/ $\Omega$	$3I_0/A$	高阻距离
$F_1$	K(A)	0	2 684	✓
	K(A)	100	370	✓
	K(A)	300	126	✓
	K(A)	500	76	×
$F_2$	K(A)	0	1 940	×
	K(A)	100	248	×
	K(A)	300	84	×
	K(A)	500	51	×
	K(BC)	0	1 411	×
	K(BC)	100	244	×
	K(BC)	300	84	×
	K(BC)	500	51	×
	K(AB)	0	1 410	×
	K(AB)	100	244	×
	K(AB)	300	84	×
	K(AB)	500	51	×
$F_3$	K(A)	0	2 452	×
	K(A)	100	366	×
	K(A)	300	124	×
	K(A)	500	75	×
	K(BC)	0	1 777	×
	K(BC)	100	184	×
	K(BC)	300	62	×
	K(BC)	500	37	×
	K(AB)	0	1 777	×
	K(AB)	100	184	×
	K(AB)	300	62	×
	K(AB)	500	37	×

500 kV线路高阻接地故障的保护装置录波数据进行回放分析, $Z_G$ 整定阻抗设置为线路全长正序阻抗,定值 $\theta$ 整定为 $103^\circ$ 。保护装置接地距离保护实际动作情况和 $Z_G$ 动作情况如表5所示。结果表明,现有的线路后备保护在经高阻接地情况下接地距离保护均不动作, $Z_G$ 对于高阻接地故障均能可靠动作。500 kV浏云I线两侧的故障录波图如图8所示。

表5 实际高阻接地故障仿真验证

Table 5 Simulation verification of actual high-resistance grounding fault

线路名称	故障类型及位置	接地电阻/ $\Omega$	$3I_0/A$	保护装置型号	保护装置接地距离Ⅲ段	高阻距离
500 kV 浏云 I 线 (线路长度为 57 km)	K(A) 距浏侧 17 km	64.95	浏侧:2 927	第 1 套:PCS-931	浏侧:×	浏侧:✓
			云侧:1 538	第 2 套:PSL-603	云侧:×	云侧:✓
500 kV 浏云 II 线 (线路长度为 57 km)	K(A) 距浏侧 19.15 km	72.03	浏侧:2 430	第 1 套:CSC-103	浏侧:×	浏侧:✓
			云侧:2 278	第 2 套:NSR-303	云侧:×	云侧:✓
500 kV 咸梦 II 线 (线路长度为 196 km)	K(A) 距咸侧 116.6 km	148.68	咸侧:790	第 1 套:WXH-803	咸侧:×	咸侧:✓
			梦侧:1 246	第 2 套:CSC-103	梦侧:×	梦侧:✓



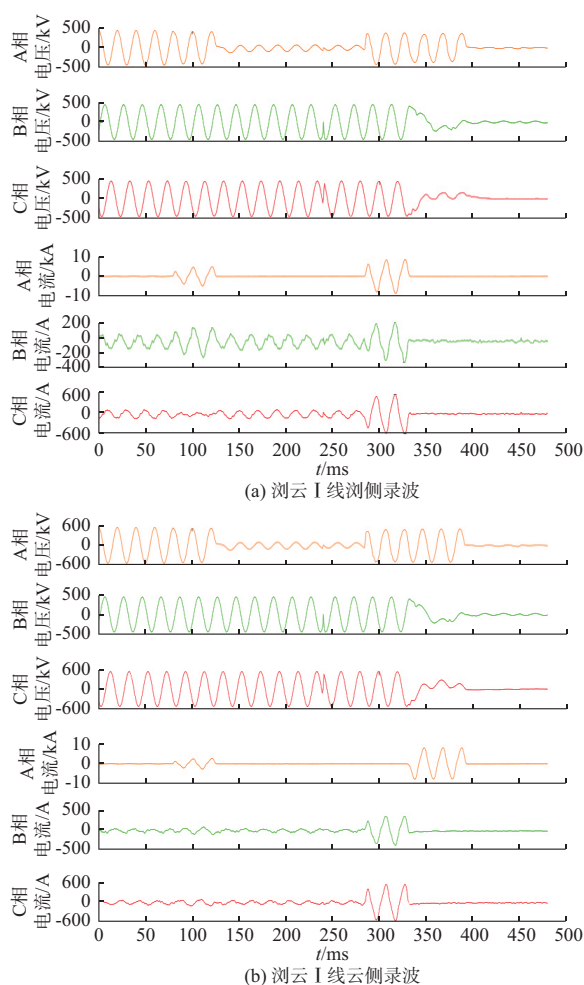


图 8 浏云 I 线故障录波图

Fig. 8 Fault recording diagram of Liuyun I line of China

## 4 结语

为解决线路接地距离保护对高阻接地故障灵敏性不足和零序电流保护对高阻接地故障选择性不足的问题,本文提出了既能保证选择性又具有良好耐受过渡电阻能力的  $Z_G$  继电器,并采用  $Z_G$  判别加速线路零序电流保护的跳闸逻辑,可有效降低 220 kV 及以上交流线路保护在高阻接地故障时无序跳闸的风险。仿真案例和故障录波案例验证了所提继电器的有效性,并得到以下结论:

1)  $Z_G$  以准确识别区内单相接地故障为主要目标,具有线路延时后备保护动作直接三相跳闸的特点,据此提出了  $Z_G$  的跳闸要求和选相要求。跳闸要求为:区内单相接地故障必须跳闸,区外单相接地故障必须可靠不动作;区内两相接地故障允许  $Z_G$  跳闸,区外两相接地故障  $Z_G$  必须可靠不动作。选相要求为:区内单相接地故障  $Z_G$  必须选相成功,区外两相接地故障  $Z_G$  必须选相失败,降低了  $Z_G$  选相的

难度。

2) 选相元件与测量元件相辅相成。选相元件综合利用零序电抗线和非故障相极化方法,提取区内单相接地故障和区外两相接地故障工作电压特征差异,设计了区分两类故障的判据。选相元件为测量元件提供选相,测量元件为选相元件消除超越。

3)  $Z_G$  的各项性能指标良好。在线路发生接地故障  $3I_0$  大于 100 A 时,  $Z_G$  均能正确动作,耐受过渡电阻能力强;反向出口故障时,  $Z_G$  可靠不动作,具有明确的方向性;故障点在保护范围的 95% 处时,  $Z_G$  可靠动作;故障点在保护范围的 105% 处时,  $Z_G$  可靠不动作,  $Z_G$  对故障点位置的判断准确性高。

4) 逻辑判断中所有用到的电气量均在现有保护装置中采集,无须增加电气量的采集;  $Z_G$  仅用于加速线路现有的零序电流保护,无须对线路当前的接地距离保护和零序电流保护进行大幅改动;  $Z_G$  采用现有接地距离保护相同定值,无须额外整定。该提升方案对线路现有保护配置影响较小,对线路现有保护定值计算模式无影响。

5)  $Z_G$  的推导分析中,假定不同位置处阻抗角相对稳定,未考虑到电力电子受控器件对阻抗角的影响。因此,  $Z_G$  的应用存在一定局限性,仅适用于远离电力电子受控器件的输电线路,后续将研究克服电力电子受控器件影响的方法。

本文研究得到“洪山英才”资助,特此感谢!

附录见本刊网络版 (<http://www.aeps-info.com/aeps/ch/index.aspx>), 扫英文摘要后二维码可以阅读网络全文。

## 参考文献

- [1] 国家市场监督管理总局, 国家标准化管理委员会. 继电保护和自动装置技术规程: GB/T 14285—2023[S]. 北京: 中国标准出版社, 2023.  
State Administration for Market Regulation, Standardization Administration of the People's Republic of China. Technical code for relaying protection and security automatic equipment: GB/T 14285—2023 [S]. Beijing: Standards Press of China, 2023.
- [2] 吕冉, 李慧, 刘鹏, 等. 和阻抗继电器的改进形式及其动作性能分析[J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(7): 2001-2011.  
LÜ Ran, LI Hui, LIU Peng, et al. An improved formation of impedance relay and its operation performance analysis [J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(7): 2001-2011.
- [3] 裴瑜涛, 马伟, 丁冬, 等. 提升距离保护抗过渡电阻能力的研究综述[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(1): 166-176.  
QIU Yutao, MA Wei, DING Dong, et al. Overview of research on distance protection against transition resistance [J]. Power

- System Protection and Control, 2019, 47(1): 166-176.
- [4] 汤涛,周宇,曾祥君,等.基于过渡电阻评估的灵活接地系统暂态故障选线方法[J].电力系统自动化,2023,47(5):171-179.  
TANG Tao, ZHOU Yu, ZENG Xiangjun, et al. Transient fault line selection method for flexible grounded system based on transition resistance evaluation[J]. Automation of Electric Power Systems, 2023, 47(5): 171-179.
- [5] 曾祥君,黄慧,喻锐,等.基于柔性调控零序电压的配电网高阻接地及单相断线故障的选相方法[J].电力系统保护与控制,2022,50(3):9-18.  
ZENG Xiangjun, HUANG Hui, YU Kun, et al. Voltage phase selection method for high resistance grounding and a single-phase disconnection fault of a distribution network based on flexible control of zero-sequence voltage[J]. Power System Protection and Control, 2022, 50(3): 9-18.
- [6] 刘健,陈曦子,张志华,等.基于消弧线调制信号相关检测的高阻单相接地选线[J].电力系统保护与控制,2023,51(1):63-70.  
LIU Jian, CHEN Xizi, ZHANG Zhihua, et al. High resistance single-phase grounding line selection in resonant grounding systems based on correlation detection [J]. Power System Protection and Control, 2023, 51(1): 63-70.
- [7] 白浩,潘妹慧,邵向潮,等.基于小波去噪与随机森林的配电网高阻接地故障半监督识别方法[J].电力系统保护与控制,2022,50(20):79-87.  
BAI Hao, PAN Shuhui, SHAO Xiangchao, et al. A high impedance grounding fault semi-supervised identification method based on wavelet denoising and random forest[J]. Power System Protection and Control, 2022, 50(20): 79-87.
- [8] 柯亮,李波,廖凯,等.基于XGBoost的配电网高阻接地故障检测方法[J].电力系统保护与控制,2024,52(6):88-98.  
KE Liang, LI Bo, LIAO Kai, et al. High impedance fault detection method in a distribution network based on XGBoost[J]. Power System Protection and Control, 2024, 52(6): 88-98.
- [9] 王尊贤,武守远,栾晓明.基于虚拟能量变化率的谐振接地系统高阻接地故障选线方法[J].电力系统自动化,2022,46(3):137-146.  
WANG Zunxian, WU Shouyuan, LUAN Xiaoming. Fault line selection method for high-impedance grounding fault of resonant grounded system based on change rate of virtual energy [J]. Automation of Electric Power Systems, 2022, 46(3): 137-146.
- [10] 叶远波,王吉文,汪胜和,等.计及故障点两侧零序电流相位差的新能源送出线路接地故障时域距离保护研究[J].电力系统保护与控制,2023,51(20):180-187.  
YE Yuanbo, WANG Jiwen, WANG Shenghe, et al. Time domain distance protection of new energy transmission line grounding fault considering the phase difference of zero sequence current on both sides of the fault point [J]. Power System Protection and Control, 2023, 51(20): 180-187.
- [11] 韦明杰,余越,梁英,等.宽频信号在谐振接地有源配电网高阻故障选线中的应用[J].电力系统自动化,2023,47(19):166-176.  
WEI Mingjie, YU Yue, LIANG Ying, et al. Application of broadband signal in high-resistance fault line selection of resonant grounded active distribution network [J]. Automation of Electric Power Systems, 2023, 47(19): 166-176.
- [12] 王鹏玮,徐丙垠,陈恒,等.零序电流互感器误差对小电流高阻接地保护影响及选型[J].电力系统自动化,2023,47(12):154-162.  
WANG Pengwei, XU Bingyin, CHEN Heng, et al. Influence of error of zero-sequence current transformer on small-current high-resistance grounding protection and type selection [J]. Automation of Electric Power Systems, 2023, 47(12): 154-162.
- [13] 亓志滨,田君杨,薛永端,等.不接地系统异名相两点接地故障工频电气量及其对选线的影响分析[J].电工技术学报,2023,38(13):3539-3551.  
QI Zhibin, TIAN Junyang, XUE Yongduan, et al. Analysis of power frequency electrical quantity and line selection applicability for two-point grounding faults occurring on different phases in isolated neutral system [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2023, 38(13): 3539-3551.
- [14] 国家能源局.220 kV~750 kV电网继电保护装置运行整定规程:DL/T 559—2018[S].北京:中国电力出版社,2018.  
National Energy Administration. Regulation for operation of 220 kV~750 kV relay protection devices in power grids: DL/T 559—2018[S]. Beijing: China Electric Power Press, 2018.
- [15] 刘阳,陈祥文,王玉龙,等.超、特高压交流线路反时限零序过流后备保护的整定建议[J].电力自动化设备,2024,44(1):217-224.  
LIU Yang, CHEN Xiangwen, WANG Yulong, et al. Setting suggestions of inverse-time zero-sequence overcurrent backup protection for EHV and UHV AC lines [J]. Electric Power Automation Equipment, 2024, 44(1): 217-224.
- [16] 孙正伟,刘家庆,鲍斌,等.超高压电网反时限零序过流保护简化整定方法[J].电力系统保护与控制,2020,48(17):18-26.  
SUN Zhengwei, LIU Jiaqing, BAO Bin, et al. A novel simplified relay coordination method for inverse-time zero-sequence overcurrent relays applied in an extra-high voltage power grid [J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(17): 18-26.
- [17] 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 Yinrong. High resistance grounded distance relay in solidly earthed system [J]. Proceedings of the CSEE, 2010, 30(34): 93-98.
- [18] 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.
- [19] 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.
- [20] 朱声石.高压电网继电保护原理与技术[M].2版.北京:中国电力出版社,1995.

- ZHU Shengshi. Principle and technology of relay protection for high voltage power network [M]. 2nd ed. Beijing: China Electric Power Press, 1995.
- [21] 王梅义. 电网继电保护应用[M]. 北京: 中国电力出版社, 2005.  
WANG Meiyi. Power grid relay protection applications [M]. Beijing: China Electric Power Press, 2005.
- [22] 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.  
GE Yaozhong. Principle and technology of new relay protection and fault location [M]. 2nd ed. Xi'an: Xi'an Jiaotong University Press, 2007.
- [23] 国家电力调度通信中心. 国家电网公司继电保护培训教材(上册)[M]. 北京: 中国电力出版社, 2020.  
National Electric Power Dispatching and Communication Center. State Grid Corporation relay protection training materials (volume one) [M]. Beijing: China Electric Power Press, 2020.
- [24] 中国电力工程顾问集团有限公司. 电力工程设计手册——火力发电厂电气一次设计[M]. 北京: 中国电力出版社, 2018.  
China Power Engineering Consulting Group Co., Ltd. Power engineering design manual—electrical primary design for thermal power plants [M]. Beijing: China Electric Power Press, 2018.
- 李 勇(1981—), 男, 教授级高级工程师, 主要研究方向: 继电保护运行管理。E-mail: 500ly@163.com  
李银红(1976—), 女, 博士, 研究员, 主要研究方向: 继电保护整定计算。E-mail: 799758486@qq.com  
柳焕章(1954—), 男, 高级工程师, 主要研究方向: 继电保护运行管理、整定计算、继电保护原理。E-mail: liuhz@cc.sgcc.com.cn  
刘 阳(1988—), 男, 通信作者, 博士, 高级工程师, 主要研究方向: 继电保护整定计算。E-mail: liuyangwuh520@sina.com

(编辑 王梦岩)

### Selectivity Enhancement Scheme for Zero-sequence Current Protection Based on Distance Relay for High-resistance Grounding Fault

LI Yong<sup>1,2</sup>, LI Yinhong<sup>3,4</sup>, LIU Huanzhang<sup>1,2</sup>, LIU Yang<sup>1,2</sup>

(1. Central China Branch of State Grid Corporation of China, Wuhan 430077, China; 2. Lamor Innovation Studio of Liu Huanzhang, Wuhan 430077, China; 3. School of Electrical and Electronic Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China; 4. State Key Laboratory of Advanced Electromagnetic Technology (Huazhong University of Science and Technology), Wuhan 430074, China)

**Abstract:** The last section of zero-sequence current protection of AC line adopts 300 A, which has the risk of disordered tripping. Therefore, a new principle of high-resistance grounding distance relay based on zero-sequence reactance line and non-fault phase polarization is proposed. The relay adopts the technical route of phase selection before measurement. The phase selection element combines zero-sequence reactance line and non-fault phase polarization method to form a variety of combined criteria to complete the phase selection. Due to the phase difference between the zero-sequence current at the protection installation site and the zero-sequence current at the fault point, the zero-sequence reactance lines of the single-phase grounding fault phase and the leading phase of the inter-phase grounding fault have aliasing region when the fault point is near the setting point. The large variation of the operation voltage of the non-fault phase is not conducive to distinguishing the two types of faults in the aliasing region, and thus the phase selection element is divided into low-resistance module and high-resistance module. The low-resistance module adopts the zero-sequence reactance line with the downward bias, which is used to identify the near-end and low-resistance short circuit. With the assistance of the low-resistance module, the high-resistance module only needs to deal with the faults near the setting point, which reduces the difficulty in distinguishing the two types of faults. After phase selection, the operation voltage before fault is obtained by non-fault phase polarization method, so as to determine the operation characteristics of the relay. The ability of high-resistance distance relay to withstand the transition resistance is far beyond the requirements of the regulations, which improves the selectivity of grounding backup protection to high-resistance faults.

This work is supported by Central China Branch of State Grid Corporation of China (No. 521400230004).

**Key words:** high-resistance grounding distance relay; zero-sequence current polarization; non-fault phase polarization; zero-sequence current protection; grounding distance protection; zero-sequence reactance line; distance relay steady state override

