

引入电流有效值与相位突变量判据的 零序反时限电流保护

鲁晓毅, 郑涛, 代钰欣, 杨畅, 宋宇飞

(西安交通大学电气工程学院, 710049, 西安)

摘要: 针对大接地电流系统发生接地故障时,非故障线路零序反时限电流保护先于故障线路中零序电流较小一侧保护动作的问题,提出了引入零序电流有效值和相位突变量判据的零序反时限电流保护方案。首先,分析了单回线和双回线两种结构发生接地故障时,零序电流的分布特征与零序反时限电流保护的動作特性,指出相邻非故障线路零序电流可能大于故障线路零序电流,进而使零序反时限电流保护误动;随后,通过理论分析,得到故障线路中零序电流较大的一侧保护动作前后其余线路中零序电流有效值和方向的变化情况;最后,提出引入零序电流有效值和相位突变量判据的零序反时限电流保护方案,将非故障线路零序反时限电流保护重新计时。仿真结果表明:所提方案能够有效防止非故障线路零序反时限电流保护误动,从而提高了保护的选择性,且在经过渡接地时仍然适用。

关键词: 电流保护;零序电流;反时限;突变量;选择性

中图分类号: TM614 **文献标志码:** A

DOI: 10.7652/xjtuxb202402020 **文章编号:** 0253-987X(2024)02-0195-12

Zero Sequence Inverse-Time Current Protection with the Introduction of Current Effective Value and Phase Mutation Criterion

LU Xiaoyi, ZHENG Tao, DAI Yuxin, YANG Chang, SONG Yufei

(School of Electrical Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: Aiming at the issue that zero sequence inverse time current protection of non-faulty line occurs before the protection on the side with smaller zero sequence current in the faulty line when the system with large ground current has grounding fault, a zero sequence inverse time current protection scheme introducing zero sequence current effective value and phase mutation criterion is proposed. Firstly, the distribution characteristics of zero sequence current and the operating characteristics of zero sequence inverse time current protection in the case of grounding fault in single-circuit line and double-circuit line are analyzed. It is pointed out that the zero sequence current of adjacent non-faulty lines may be greater than the zero sequence current of the faulty line, causing the misoperation of zero sequence inverse time current protection. Then, through theoretical analysis, the changes of the effective value and direction of zero sequence current in other lines before and after the protection action on the side with larger zero sequence current in the faulty line are obtained. Finally, a zero sequence inverse time current protection scheme is proposed by introducing zero sequence current effective value and phase mutation criterion, and the

zero sequence inverse time current protection of non-faulty lines is re-timed. The simulation results show that the proposed scheme can effectively prevent the misoperation of zero sequence inverse time current protection of non-faulty lines, thus improving the selectivity of protection, and the proposed scheme is still suitable for transitional grounding.

Keywords: relay protection; zero sequence current; inverse-time; mutation; selectivity

输电线路接地短路的后备保护一般采用接地距离保护和零序电流保护。接地距离保护具有保护范围受运行方式影响小^[1-2]、较好的选择性等优点,但固有缺陷是耐受过渡电阻的能力有限,在应对高阻接地故障时灵敏性不足,因此必须配备零序电流保护。目前,利用零序电流构成的后备保护在大接地电流系统中已得到广泛应用^[3-11]。其中,传统阶段式定时限零序过流保护的原理及构成简单,但整定计算受电网运行方式影响较大,且选择性配合困难,存在单一故障导致大范围多条线路无序动作的风险^[12-13]。由于反时限电流保护具有“电流越大、动作越快”的特点,当相邻线路短路电流大小存在差异时,反时限电流保护能自然实现上下级保护选择性配合,因此逐渐得到了广泛应用^[14-17]。

在实际应用中,全网零序反时限保护选择同一种反时限特性和统一定值^[18],大部分情况下能够保证选择性。然而,当同杆双回线中某条线路发生故障时,相邻非故障线路流过的零序电流可能大于故障线路的零序电流,零序反时限电流保护将发生误动。针对此问题,文献[19-20]提出了基于广域信息的改进算法,引入算子调整保护动作时间,但该方法需要采用广域信息,即涉及通信问题,对于后备保护而言实现难度大且成本较高。文献[21-22]基于零序功率方向,通过改变时间整定系数对故障线路的保护进行加速动作,实现了相邻线路的选择性配合。文献[23]提出了“引入电压及变速因子”的改进方法,但在原理上不完善,且正确性和适用性有待验证。文献[24]提出了结合接地距离元件和增加零序反时限过流加速系数的改进策略,以实现自适应分段加速切除故障,但此方法整定计算工作量大。此外,以上方法都需要零序反时限保护投入方向元件。但高阻接地时,由于保护安装处的零序电压较小,导致方向元件往往不能正确动作^[25]。考虑到零序反时限电流保护用于切除高阻接地故障的定位,以上方法在实际应用中可能会存在一些问题。

线路发生故障时,流过故障线路两端保护的电流一般不相等,文献[21-26]针对零序电流大的一侧保护与相邻非故障线路保护的配合问题,提

出了相应的解决方案。而文献[13]指出,零序电流小的一侧保护与相邻非故障线路保护同样存在配合问题,但到目前为止,还没有文献对此进行专门研究。

本文通过分析上述问题产生的原因,提出了基于零序电流有效值与相位突变量判据的零序反时限电流保护方法。所提方法原理简单,整定工作量小,且无需投入方向元件,不受高阻接地的影响,能有效防止相邻非故障线路零序反时限电流保护先于故障线路中零序电流小的一侧保护动作,提高了零序反时限电流保护的选择性。电磁暂态仿真软件(PSCAD)的仿真结果验证了所提方法的有效性。

1 零序反时限电流保护特性分析

1.1 特性方程

根据国际电工委员会标准和国家电网公司《线路保护及辅助装置标准化设计规范》,线路零序反时限电流保护采用正常反时限特性方程表示,写为

$$t(3I_0) = \frac{0.14t_p}{(3I_0/I_p)^{0.02} - 1} \quad (1)$$

式中: $t(3I_0)$ 为反时限曲线计算时间; I_0 为零序电流有效值; I_p 为启动电流定值; t_p 为时间系数定值。

1.2 动作逻辑

线路零序反时限电流保护的逻辑如图1所示。图中,反时限曲线计算时间 $t(3I_0)$ 由电流定值 I_p 和时间定值 t_p 共同决定,故线路零序反时限电流保护整定涉及4个定值: I_p 、 t_p 、 t_h 、 t_x 。其中, t_h 为零序反时限配合时间, t_x 为零序反时限最小时间。

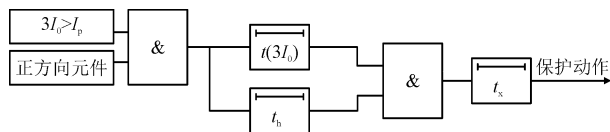


图1 零序反时限电流保护的逻辑

Fig. 1 Action logic of zero sequence inverse time current protection

由图1,零序反时限电流保护的逻辑时间可表示为

$$t_d = \max\{t(3I_0), t_h\} + t_x \quad (2)$$

在零序反时限电流保护的整定中,主要通过 t_h 与 t_x 时间的整定,躲开自动重合闸的延时以及接地距离保护和三相不一致保护的動作时间,其中 t_h 宜小于 $t(3I_0)$,以使保护始终保持反时限特性;而相邻线路零序反时限电流保护间的動作级差要求,可通过 I_p 与 t_p 时间的整定满足。

1.3 零序反时限电流保护相继動作情况分析

线路发生故障时,流过故障线路两端保护的电流一般不相等。本文中,定义故障线路中流过零序电流较大的保护为先动保护,流过零序电流较小的保护为后动保护,与先动保护相邻的非故障线路上的保护为近侧保护,与后动保护相邻的非故障线路上的保护为远侧保护。此外,若故障线路为平行双回线中的一回,则平行双回线中非故障线路上的保护定义为平行保护。

设先动保护動作时间为 t_{dx} ,表示为

$$t_{dx} = \frac{0.14t_p}{(3I_0/I_p)^{0.02} - 1} \quad (3)$$

则定义满足式(3)的零序电流 I_0 为临界电流 I_x 。

图1中的 $t(3I_0)$ 元件,是通过电流与时间的积分来实现的,当累积量达到動作门槛时,则满足 $t(3I_0)$ 元件的要求,随后进入 t_x 元件的固定延时,此时動作时间与电流值无关,只要 $3I_0 > I_p$,保护将正常動作。

先动保护動作后,流过其余保护的电流将会发生变化。设在先动保护動作前,流过某保护的零序电流为 I_q ,先动保护動作后,流过该保护的零序电流为 I_h 。若 $I_q > I_x$,则在 t_{dx} 时间内,该保护已进入 t_x 环节,先动保护動作后,该保护的動作时间与 I_h 无关;若 $I_q < I_x$,则在 t_{dx} 时间内,该保护还处于 $t(3I_0)$ 环节,先动保护動作后,其動作时间将受 I_h 的影响,此时動作时间可表示如下

$$\begin{cases} t' = \frac{0.14t_p - \int_0^{t_{dx}} [(3I_q/I_p)^{0.02} - 1] dt}{(3I_h/I_p)^{0.02} - 1} \\ t_d = t_{dx} + t' + t_x \end{cases} \quad (4)$$

式中: t' 为先动保护動作后,该保护处于反时限曲线计算环节的时间; t_d 为该保护总的動作时间。

2 零序电流分布特征与保护動作情况分析

2.1 单回线故障时的零序电流分布特征

含单回线的输电网典型结构如图2所示,其中数字1~10代表保护编号,线路 L 零序阻抗为 Z_L ,

母线A左侧系统等值零序阻抗为 Z_A ,母线B右侧系统等值零序阻抗为 Z_B 。设线路 L 发生故障,故障位置距母线A的距离与线路 L 全长之比为 α ,保护動作前的电流下标为 q ,保护動作后的电流下标为 h 。先动保护動作前后,各支路上零序电流的方向如图2(a)和2(b)所示。其中, I_{Fq} 为先动保护動作前故障点的零序电流, I_{Fh} 为先动保护動作后故障点的零序电流。

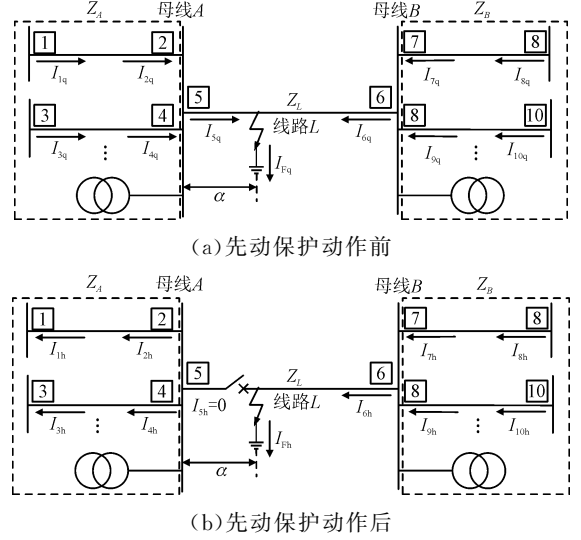


图2 含单回线的输电网典型结构

Fig. 2 Typical structure of transmission network with single circuit lines

根据回路电流法,可得到 I_{5q} 与 I_{6q} 的关系,如下所示

$$\frac{I_{5q}}{I_{6q}} = \frac{(1-\alpha)Z_L + Z_B}{\alpha Z_L + Z_A} \quad (5)$$

由式(5)可见,随着 α 增大,分子减小分母增大,即 I_{5q} 与 I_{6q} 的比值随 α 增大而单调递减。式(5)中,若令 $I_{5q} = I_{6q}$,可定义临界位置 α_0 ,如下所示

$$\alpha_0 = \frac{Z_B - Z_A + Z_L}{2Z_L} \quad (6)$$

当 $\alpha < \alpha_0$ 时, $I_{5q} > I_{6q}$,保护5将先于保护6動作,此时保护5为先动保护,保护6为后动保护,保护1~4为近侧保护,保护7~10为远侧保护。由于各母线上都接有多条支路,故流过保护1~4的电流 I_q 小于流过保护5的电流 I_q ,因此不会先于保护5動作。同理,保护7~10不会先于保护6動作,但保护1~4上的电流 I_q 有可能会大于保护6的电流 I_q 。

在以下分析中,假设 $I_{1q} \sim I_{4q} > I_{6q}$ 。若 $I_{1q} \sim I_{4q} > I_x$,则在 t_{dx} 时间内,保护1~4先于保护6进入 t_x 时间环节,保护5動作后,由于高压输电网为环网结构, $I_{1h} \sim I_{4h}$ 一般不会减小为0,此时各支路的零序电流方向如图2(b)所示。若流过保护1~4的电流

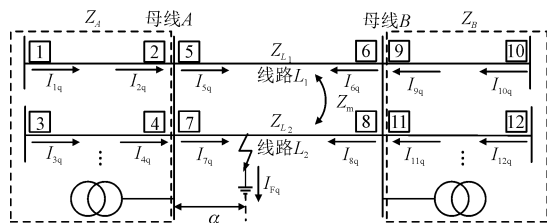
$3I_{1h}$ 大于 I_p , 则保护将继续动作, 且动作时间与 $3I_{1h}$ 无关, 保护 1~4 将先于保护 6 动作。若 $I_{1q} \sim I_{4q} < I_x$, 则在保护 5 动作后, 保护 1~4 和保护 6 仍处在 $t(3I_0)$ 时间环节, 保护动作时间将由式(4) 决定, 此时仍存在保护 1~4 先于保护 6 动作的可能性。综合以上两种情况, 无论 $I_{1q} \sim I_{4q}$ 与 I_x 的大小关系如何, 只要 $I_{1q} \sim I_{4q} > I_{6q}$, 保护 1~4 就可能先于保护 6 动作。同理, 当 $I_{5q} < I_{6q}$ 时, 保护 7~10 可能先于保护 5 动作。

保护 5 动作前, I_{5q} 和 I_{6q} 从 I_{Fq} 分得零序电流且 $I_{5q} > I_{6q}$, $I_{1q} \sim I_{4q}$ 从 I_{5q} 分得电流; 保护 5 动作后, I_{6h} 分得 I_{Fh} 的全部电流, 其有效值将增大, 而 $I_{1h} \sim I_{4h}$ 只能通过电网中的环流分得电流, 其有效值将减小。即单回线故障时, 先动保护动作前后, 流过近侧保护的零序电流减小, 流过后动保护的零序电流增大。

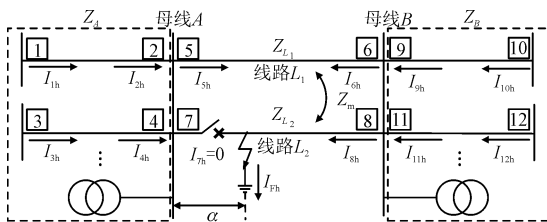
对比图 2(a) 和 2(b) 可以发现, 保护 5 动作前后, 流过保护 1~4 的电流方向改变, 流过保护 6 的电流方向不变。这表明单回线故障时, 先动保护动作前后, 流过近侧保护的零序电流方向改变, 流过后动保护的零序电流方向不变。

2.2 双回线故障时的零序电流分布特征

含双回线的输电网典型结构如图 3 所示, 其中, 数字 1~12 代表保护编号, 线路 L_1 、 L_2 为同杆双回线, 零序阻抗分别为 Z_{L1} 和 Z_{L2} , 零序互阻抗为 Z_m , 母线 A 左侧系统等值零序阻抗为 Z_A , 母线 B 右侧系统等值零序阻抗为 Z_B 。设线路 L_2 发生故障, 故障位置距母线 A 的距离与线路 L_2 全长之比为 α , 保护动作前的电流下标为 q, 保护动作后的电流下标为 h。保护动作前, 各支路上零序电流的方向如图 3(a) 所示。



(a) 先动保护动作前



(b) 先动保护动作后

图 3 含双回线的输电网典型结构

Fig. 3 Typical structure of transmission network with double circuit lines

根据回路电流法, 可得到 I_{5q} 、 I_{7q} 、 I_{8q} 之间的关系, 如下所示

$$\frac{I_{7q}}{I_{8q}} =$$

$$\frac{(1-\alpha)[Z'_{L2}(Z_A + Z_B) + Z_{L1}Z_{L2} - Z_m^2] + Z'_{L1}Z_B}{\alpha[Z'_{L2}(Z_A + Z_B) + Z_{L1}Z_{L2} - Z_m^2] + Z'_{L2}Z_A} \quad (7)$$

$$\frac{I_{5q}}{I_{8q}} = \frac{Z'_{L2}[(1-\alpha)Z_A - \alpha Z_B]}{\alpha[Z'_{L2}(Z_A + Z_B) + Z_{L1}Z_{L2} - Z_m^2] + Z'_{L1}Z_A} \quad (8)$$

式中: $Z'_{L1} = Z_{L1} - Z_m$; $Z'_{L2} = Z_{L2} - Z_m$ 。

式(7)中, 随着 α 增大, 分子减小分母增大, 即 I_{7q} 与 I_{8q} 的比值随 α 增大而单调递减。此时, 若令 $I_{7q} = I_{8q}$, 可定义临界故障位置 α_1 , 如下所示

$$\alpha_1 = \frac{Z'_{L1}(Z_B - Z_A) + [Z'_{L2}(Z_A + Z_B) + Z_{L1}Z_{L2} - Z_m^2]}{2[Z'_{L2}(Z_A + Z_B) + Z_{L1}Z_{L2} - Z_m^2]} \quad (9)$$

式(8)中, 若令 $I_{5q} = 0$, 可定义临界故障位置 α_2 , 如下所示

$$\alpha_2 = \frac{Z_A}{Z_A + Z_B} \quad (10)$$

当 $\alpha < \alpha_1$ 时, $I_{7q} > I_{8q}$, 保护 7 将先于保护 8 动作。 $I_{1q} \sim I_{4q}$ 从 I_{7q} 分得电流, $I_{9q} \sim I_{12q}$ 从 I_{8q} 分得电流, 假设保护 1~4 不会先于保护 7 动作, 保护 9~12 不会先于保护 8 动作, 这与实际系统中绝大多数情况相符。由于 $I_{7q} > I_{8q}$, 则 $I_{1q} \sim I_{4q}$ 可能大于 I_{8q} 。保护 7 动作后, 若流过其余保护的电流 $3I_{1h}$ 大于 I_p , 则保护将继续动作。与单回线故障类似, 无论 $I_{1q} \sim I_{4q}$ 与 I_x 的大小关系如何, 只要 $I_{1q} \sim I_{4q} > I_{8q}$, 都存在保护 1~4 先于保护 8 动作的可能性。同理, 当 $I_{7q} < I_{8q}$ 时, 保护 9~12 也可能先于保护 7 动作。

保护 7 动作前, I_{7q} 和 I_{8q} 从 I_{Fq} 分得零序电流且 $I_{7q} > I_{8q}$, $I_{1q} \sim I_{4q}$ 从 I_{7q} 分得电流; 保护 7 动作后, I_{8h} 分得 I_{Fh} 的全部电流, 其有效值将增大, $I_{1h} \sim I_{4h}$ 从 I_{5h} 分得电流, 由于 $I_{5h} < I_{7q}$, 其有效值将减小。即双回线故障时, 先动保护动作前后, 流过近侧保护的零序电流减小, 流过后动保护的零序电流增大。

保护 7 动作后, 各线路流过的零序电流方向如图 3(b) 所示。对比图 3(a) 和 3(b) 可以发现, 保护 7 动作前后, 流过保护 1~4、保护 8 的零序电流方向不变。这表明双回线故障时, 先动保护动作前后, 流过近侧保护的零序电流方向不变, 流过后动保护的零序电流方向也不变。

对于双回线中的非故障线路,保护7动作前,流过其的零序电流方向不定,需分情况讨论。

当 $0 < \alpha < \alpha_2$ 时,双回线中的非故障线路中实际电流方向与 I_{6q} 相同,随着 α 增大,式(8)的分子减小而分母增大,比值单调递减,当 $\alpha = 0$ 时,有

$$\frac{I_{5q}}{I_{8q}} = \frac{Z_{L_2} - Z_m}{Z_{L_1} - Z_m} \quad (11)$$

若 $Z_{L_2} > Z_{L_1}$,则在 $\alpha = 0$ 附近区间,将有 $I_{5q} > I_{8q}$,保护5、6可能先于保护8动作,保护7动作后,流过保护5、6的零序电流可能增大或减小,方向变为与 I_{5h} 相同,即 $0 < \alpha < \alpha_1$ 时,先动保护动作前后,流过平行保护的零序电流可能增大或减小,方向改变。当 $\alpha = \alpha_2$ 时,保护7动作前, $I_{5q} = 0$,保护7动作后,流过保护5、6的零序电流必然增大;当 $\alpha > \alpha_2$ 时,保护7动作前后,双回线中的非故障线路中实际电流方向均与 $I_{5q}(I_{5h})$ 相同,即流过平行保护的零序电流方向不变。但根据基尔霍夫电流定律,双回线中的非故障线路和母线B上其它支路均从 I_{8q} 分得电流,故 I_{5q}, I_{6q} 将远小于 I_{8q} ,保护不会误动。同理,当 $I_{7q} < I_{8q}$ 时,若 $Z_{L_2} > Z_{L_1}$,在 $\alpha = 1$ 附近区间,保护5、6有可能先于保护7动作。

本节分析了近侧保护和平行保护的电流大于后动保护的电流而导致误动的情况。此外,若流过近侧保护和平行保护的零序电流小于流过后动保护的零序电流,且二者相差不大,此时将再满足动作级差的要求。考虑到保护分闸时间和时间继电器的正负误差等因素^[17],不满足动作级差要求的情况也可能造成近侧保护和平行保护误动。

综上所述,可得到以下结论。

(1) 单回线或双回线发生故障时,近侧保护的零序电流可能大于后动保护的零序电流,或二者相差不大,保护将误动。

(2) 双回线发生故障时,平行保护的零序电流可能大于后动保护的零序电流,或二者相差不大,保护将误动。

3 基于零序电流有效值与相位突变量判据的零序反时限电流保护

通过对先动保护动作前后各线路中零序电流有效值和方向的变化进行分析,可以发现:

(1) 单回线发生故障,先动保护动作后,流过近侧保护的零序电流将减小,方向改变;流过后动保护的零序电流将增大,方向不变。

(2) 双回线发生故障,先动保护动作后,流过近侧保护的零序电流将减小,方向不变;流过后动保护

的零序电流将增大,方向不变。

(3) 双回线发生故障,先动保护动作后,流过平行保护的零序电流可能增大或减小,方向可能改变,也可能不变。若方向不变,平行保护不会先于后动保护动作,即只有在方向改变的情况下平行保护才可能误动。

基于先动保护动作前后,其余线路中零序电流的有效值与方向发生变化的特点,可在零序反时限电流保护动作逻辑中增加检测零序电流有效值与相位突变量的判据,如下所示

$$I_0^{t+\Delta t} - I_0^t < 0 < -I_d \quad (12)$$

$$|\arg(I_0^{t+\Delta t}) - \arg(I_0^t)| > \theta_d \quad (13)$$

式中: $I_0^{t+\Delta t}$ 为 $t + \Delta t$ 时刻零序电流的有效值; I_0^t 为 t 时刻零序电流的有效值; I_d 为零序电流有效值突变量的门槛值; $\arg(I_0^{t+\Delta t})$ 为 $t + \Delta t$ 时刻零序电流的相角值; $\arg(I_0^t)$ 为 t 时刻零序电流的相角值; θ_d 为零序电流相位突变量的门槛值。

电流相位突变量判据原理上依靠电流方向的突变,无需采集零序电压。对于电流方向发生突变的线路,相位突变量在 180° 附近;对于电流方向未发生突变的线路,相位突变量在 0° 附近,不受高阻接地的影响。

增加零序电流有效值与相位突变量判据后的零序反时限电流保护动作逻辑如图4所示。

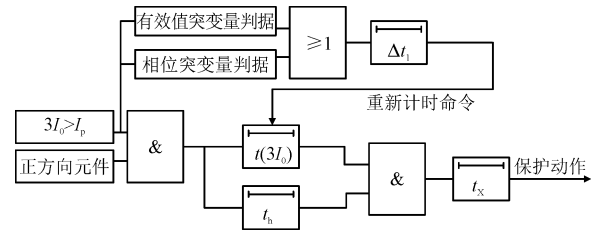


图4 基于电流有效值与相位突变量判据的保护动作逻辑

Fig. 4 Action logic based on current effective value and phase mutation criterion

由图4可见,当电流 $3I_0$ 大于 I_p 时,零序电流有效值突变量与相位突变量检测元件将会启动。实际应用中,需先确定零序反时限电流保护的定值及上下级线路最小的动作时间级差 Δt_m 。令 $\Delta t < \Delta t_m$,即可保证该判据在相邻线路误动前启动, Δt 越小,该判据生效所需时间越短。此外,由于受衰减直流分量的影响^[26-27],前几个周波内得到的相角值不准确。设前几个周波时间为 Δt_c ,延时元件 Δt_1 的作用为防止误判,只有在 Δt_1 时间内始终满足判据才会输出高电平信号。在 Δt_c 时间内,可能存在原本不满足判据的保护,由于受衰减直流分量的影响从而满足了

判据,也可能存在原本满足判据的保护变得不满足判据。故设置 $\Delta t_e < \Delta t_1 < \Delta t - \Delta t_e$, 可避免由于衰减直流分量引起的该判据误动或拒动。

故障发生后,先动保护将按照正常的反时限逻辑动作。先动保护动作后,对于单回线相邻的近侧保护,将满足式(12)和(13);对于双回线相邻的近侧保护,将满足式(12);对于双回线中的平行保护,若电流方向发生突变,则满足式(13)。不论单回线还是双回线故障,后动保护将不受判据影响而正常动作。

对于满足式(12)或(13)的保护,无论其处于哪个环节,都将在重新计时命令的作用下回到 $t(3I_0)$ 环节重新计时。由于先动保护动作后,流过后动保护的电流最大,故其它保护重新计时后将不会再误动。

4 仿真分析

根据文献[8]和[16]中的整定原则,为躲开重合闸延时及接地距离保护、三相不一致保护的动作时间,应有 $t_h + t_x \geq 3\text{ s}$,即零序反时限电流保护间的动作级差应大于 0.3 s。根据此原则,本文中零序反时限电流保护的定值参数如表 1 所示。

表 1 零序反时限电流保护的定值设置

Table 1 Zero sequence inverse time current protection setting parameters			
电流定值 I_p/A	时间定值 t_p/s	配合时间 t_h/s	最小时间 t_x/s
300	0.6	0.5	2.5

采用 PSCAD 软件建立如图 5 所示的 750 kV 环网模型,阻抗参数如表 2 所示。设置故障位置为 $\alpha=0,0.5,1.0$,在 0.1 s 发生故障,0.6 s 先动保护切除,1.2 s 后动保护切除。对于有效值突变量和相位突变量判据,设置 $\Delta t = 0.08\text{ s}, \Delta t_1 = 0.04\text{ s}, I_d = 300\text{ A}, \theta_d = 90^\circ$ 。

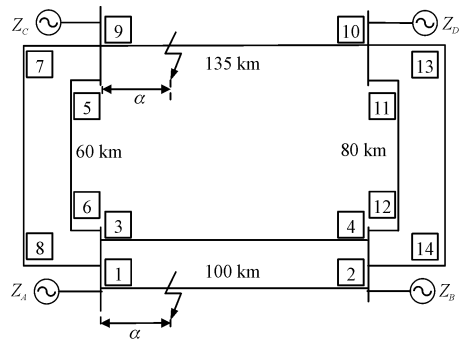


图 5 PSCAD 仿真模型示意图

Fig. 5 Schematic diagram of PSCAD simulation model

表 2 仿真模型中的阻抗参数

Table 2 Simulation model parameters

参数	正负序阻抗	零序阻抗
Z_A/Ω	$6.5\angle 87^\circ$	$15\angle 86^\circ$
Z_B/Ω	$20\angle 85^\circ$	$50\angle 80^\circ$
Z_C/Ω	$12\angle 85^\circ$	$25\angle 82^\circ$
Z_D/Ω	$15\angle 80^\circ$	$21\angle 84^\circ$
$Z_L/(\Omega \cdot \text{km}^{-1})$	$0.013\ 7 + \text{j}0.270$	$0.159\ 0 + \text{j}0.796$
$Z_m/(\Omega \cdot \text{km}^{-1})$		$0.137\ 0 + \text{j}0.333$

4.1 单回线单相接地故障

单回线发生金属性故障时,流过各保护的零序电流与动作时间如表 3 所示,其中, $3I_q$ 为先动保护动作前的 3 倍零序电流, $3I_h$ 为先动保护动作后的 3 倍零序电流, $3\Delta I = 3I_h - 3I_q$, ①、②、③ 分别为第 1、2、3 个动作。

表 3 单回线不同故障位置下流过保护的零序电流与动作时间

Table 3 Current and action time of protection under different fault positions on single circuit lines

保护	故障位置	$3I_q/\text{kA}$	$3I_h/\text{kA}$	$3\Delta I/\text{kA}$	动作时间/s	动作顺序
5~8	$\alpha=0$	7.682	0.061	-7.621		
9		45.620	0	-45.620	3.295	①
10		5.868	6.359	0.491	3.871	②
11~14	$\alpha=0.5$	0.115	0.681	0.566	10.876	③
5~8		1.024	0.060	-0.964		
9		6.364	6.606	0.242	3.833	①
10	$\alpha=1.0$	6.366	0	-6.366	3.833	②
11~14		0.605	0.699	0.094	8.082	③
5~8	$\alpha=1.0$	0.502	1.102	0.600	7.700	③
9		5.201	6.477	1.276	3.931	②
10		40.234	0	-40.234	3.316	①
11~14		4.254	0.074	-4.180		

由表 3 可见,当 $\alpha = 0$ 时,流过保护 9 的电流 $3I_q$ 最大,其动作时间为 3.295 s,对应的电流 $3I_x$ 为 1.056 kA。此时,保护 9 为先动保护,保护 10 为后动保护,保护 5~8 为近侧保护,流过保护 5~8、10 的电流 $3I_q$ 均大于 $3I_x$,且流过保护 5~8 的电流 $3I_q$ 大于保护 10 的电流 $3I_q$,因此存在误动的可能性。但由于保护 9 动作后,保护 5~8 的电流 $3I_h$ 小于 300 A,故不会误动。当 $\alpha = 0.5$ 时,流过保护 9、10 的电流

$3I_q$ 相差不大,且均大于流过其它保护的电流,动作级差满足要求。当 $\alpha = 1.0$ 时,故障发生后,流过保护 10 的电流 $3I_q$ 最大,其动作时间为 3.316 s,对应的电流 $3I_x$ 为 1.048 kA。此时,保护 10 为先动保护,保护 9 为后动保护,保护 11~14 为近侧保护,流过保护 11~14 的电流 $3I_q$ 小于保护 9 的电流 $3I_q$,且保护 9 动作后,流过保护 11~14 的电流 $3I_h$ 小于 300 A,故不会发生误动。

从有效值变化情况上看,在以上 3 个故障位置,先动保护动作后,后动保护的电流有效值均增大,近侧保护的电流有效值均减小且减小量大于 I_d 。这表明先动保护动作后,后动保护不能满足有效值突变量判据,而近侧保护则能满足。

当 $\alpha = 0$ 时,保护 5~8、10 以及 11~14 零序电流的相位变化量如图 6 所示。

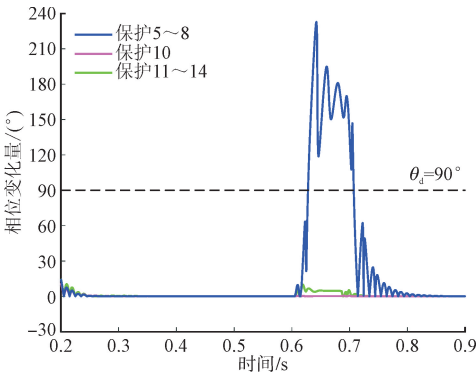


图 6 各保护零序电流的相位变化量

Fig. 6 Phase change of zero sequence current for each protection

由图 6 可见,在 0.6 s 时,保护 9 动作,保护 10、保护 11~14 零序电流的相位突变量基本无变化,保护 5~8 零序电流的相位突变量大于 90° 且持续时间大于 0.04 s。由于 $\alpha = 0.5、1.0$ 时的波形与 $\alpha = 0$ 时相类似,所以不再单独列出。因此可知,先动保护动作后,后动保护不满足相位突变量判据,而近侧保护可满足相位突变量判据。

另外还发现,当单回线故障时,先动保护动作后,由于近侧保护只能通过环网获得电流,流过的零序电流较小,达不到启动电流 I_p 值,于是近侧保护将会在瞬间返回,故而单回线故障时,近侧保护误动的可能性很小。

在表 3 中,由于在金属性接地时近侧保护不会误动,则经过渡电阻接地时更不会误动。即使某种情况下,先动保护动作后近侧保护的零序电流大于启动定值,也能依靠有效值突变量判据和相位突变量判据

将近侧保护重新计时,防止其先于后动保护动作。

4.2 双回线单相接地故障

双回线发生金属性故障时,流过各保护的零序电流与动作时间如表 4 所示。

表 4 双回线不同故障位置下流过保护的零序电流与动作时间

Table 4 Current and action time of protection under different fault positions on double circuit lines

保护	故障位置	$3I_q/\text{kA}$	$3I_h/\text{kA}$	$3\Delta I/\text{kA}$	动作时间/s	动作顺序
1	$\alpha=0$	67.409	0	-67.409	3.234	①
2		4.224	9.192	4.968	4.046	③
3,4		4.082	4.885	0.803	4.067	④误动
5~8		6.592	0.472	-6.120	3.818	②误动
11~14		1.659	0.950	-0.709	4.914	⑤
1	$\alpha=0.5$	14.250	0	-14.25	3.546	①
2		12.031	14.183	2.152	3.596	②
3,4		1.164	5.440	4.276	5.556	⑤
5~8		1.515	0.484	-1.031	5.052	④
11~14		2.359	1.921	-0.438	4.495	③
1	$\alpha=1.0$	5.643	9.744	4.101	3.890	③
2		33.788	0	-33.788	3.348	①
3,4		5.644	3.817	-1.827	3.890	④误动
5~8		0.900	0.593	-0.307	6.549	⑤
11~14		6.128	0.826	-5.302	3.851	②误动

由表 4 可见,当 $\alpha = 0$ 时,故障发生后,流过保护 1 的电流 $3I_q$ 最大,其动作时间为 3.234 s,对应的电流 $3I_x$ 为 1.082 kA。此时,保护 1 为先动保护,保护 2 为后动保护,保护 3、4 为平行保护,保护 5~8 为近侧保护,流过所有保护的电流 $3I_q$ 均大于 $3I_x$,其中流过保护 3、4 的电流 $3I_q$ 与保护 2 的电流 $3I_q$ 基本相同,流过保护 5~8 的电流 $3I_q$ 大于保护 2 的电流 $3I_q$ 。保护 1 动作后,流过其余保护的电流 $3I_h$ 均大于 300 A,因此将继续动作,此时保护 3~8 将误动。当 $\alpha = 0.5$ 时,流过保护 1、2 的电流 $3I_q$ 相差不大,且均大于流过其它保护的电流,动作级差满足要求。当 $\alpha = 1.0$ 时,故障发生后,流过保护 2 的电流 $3I_q$ 最大,其动作时间为 3.348 s,对应的电流 $3I_x$ 为 1.036 kA。此时,保护 2 为先动保护,保护 1 为后动保护,保护 3、4 为平行保护,保护 11~14 为近侧保护,流过保护 1、3、4、11~14 的电流 $3I_q$ 大于 $3I_x$,流过保护 3、4、11~14 的电流 $3I_q$ 均大于保护 1 的电流

$3I_q$ 。保护 2 动作后,流过保护 1、3、4、11~14 的电流 $3I_h$ 均大于启动电流,因此将继续动作,此时保护 3、4、11~14 将误动。

当 $\alpha = 1.0$ 时,不同过渡电阻 R_g 下流过各保护的零序电流与动作时间如表 5 所示。

表 5 不同过渡电阻下流过保护的零序电流与动作时间

Table 5 Current and action time of protection under different transition resistances

保护	R_g/Ω	$3I_q/\text{kA}$	$3I_h/\text{kA}$	$3\Delta I/\text{kA}$	动作 时间/s	动作 顺序
1	50	1.215	6.359	5.144	5.461	③
2		7.232	0	-7.232	3.778	①
3,4		1.215	2.491	1.276	5.461	④误动
5~8		0.194	0.387	0.193	22.730	⑤
11~14		1.319	0.539	-0.780	5.294	②误动
1	80	0.780	4.717	3.937	6.615	③
2		4.643	0	-4.643	3.992	①
3,4		0.780	1.848	1.068	6.680	④
5~8		0.124	0.287	0.163		
11~14		0.847	0.400	-0.447	6.539	②误动
1	90	0.696	4.318	3.622	6.834	②
2		4.146	0	-4.146	4.058	①
3,4		0.696	1.691	0.995	6.988	③
5~8		0.111	0.263	0.152		
11~14		0.756	0.366	-0.390	8.639	④
1	200	0.318	2.164	1.846	9.183	②
2		1.896	0	-1.896	4.736	①
3,4		0.318	0.848	0.530	10.973	③
5~8		0.051	0.132	0.081		
11~14		0.346	0.184	-0.162		

由表 5 可见,当 $R_g = 50 \Omega$ 时,保护 2 的动作时间为 3.778 s,对应的电流 $3I_x$ 为 0.901 kA,流过保护 1、3、4、11~14 的电流 $3I_q$ 均大于 $3I_x$ 。保护 2 动作后,流过保护 1、3、4、11~14 的电流 $3I_h$ 均大于 300 A,于是将继续动作,此时保护 3、4、11~14 将误动。当 $R_g = 80 \Omega$ 时,保护 2 动作时间为 3.992 s,对应的电流 $3I_x$ 为 0.850 kA,流过保护 1、3、4、11~14 的电流 $3I_q$ 均小于 $3I_x$ 。保护 2 动作后,流过保护 1、3、4、11~14 的电流 $3I_h$ 均大于启动电流,于是将继续动作,此时根据式(4)计算出它们的动作时间,可发现保护 3、4 不会先于保护 1 动作,但由于动作级差不满足要求,保护 11~14 仍先于保护 2 动

作,此时保护 3、4、11~14 将误动。当 $R_g = 90 \Omega$ 时,保护 2 的动作时间为 4.058 s,对应的电流 $3I_x$ 为 0.836 kA,流过保护 1、3、4、11~14 的电流 $3I_q$ 均小于 $3I_x$ 。保护 2 动作后,流过保护 1、3、4、11~14 的电流 $3I_h$ 均大于启动电流,于是将继续动作,此时根据式(4)计算出它们的动作时间,可发现保护 3、4、11~14 不会先于保护 2 动作,且动作级差满足要求,不会误动。当 $R_g = 200 \Omega$ 时,保护 2 的动作时间为 4.736 s,对应的电流 $3I_x$ 为 0.722 kA,流过保护 1、3、4、11~14 的电流 $3I_q$ 均小于 $3I_x$ 。保护 2 动作后,流过保护 1、3、4 的电流 $3I_h$ 均大于启动电流,于是将继续动作,此时根据式(4)计算出它们的动作时间,可发现保护 3、4 不会先于保护 2 动作,且动作级差满足要求,不会误动;而此时,保护 11~14 的电流 $3I_h$ 小于启动电流,已不会再动作。

以上仿真结果表明,在线路两侧出口处发生故障时,流过先动保护的电流远大于后动保护的电流,近侧保护的电流大于后动保护的电流的可能性也较大,此时较易发生误动;而当故障位置向线路中间移动时,近侧保护的电流大于后动保护的电流的可能性减小,不易发生误动。当故障点存在一定的过渡电阻时,仍会存在近侧保护及双回线中非故障线路的保护与后动保护动作时间不满足级差要求的情况。随着过渡电阻的增大,临界电流 I_x 减小,同时流过近侧保护和平行保护的电流 $3I_q$ 将逐渐由大于 I_x 变为小于 I_x 。当过渡电阻增大到某一临界值时,近侧保护和平行保护将不会再误动。

从有效值变化情况来看,在 3 个不同的故障位置,先动保护动作后,后动保护的电流有效值均增大,近侧保护的电流有效值均减小,因此,通过引入有效值突变量判据可以防止近侧保护误动。当 $R_g = 90 \Omega$ 时,流过保护 11~14 的电流 $3\Delta I$ 最小,为 -390 A,故将 I_d 设置为 300 A,能够保证有效值突变量判据正确动作,且具有足够的灵敏度。当 $R_g \geq 90 \Omega$ 时,已不会再发生误动,因此不需要该判据启动。实际应用中,可以通过降低电流 I_d 的值,提升该判据对过渡电阻的耐受能力,以保证零序反时限电流保护在任何过渡电阻下都不会发生误动。当 $\alpha = 0、0.5、1.0$ 时,经过渡电阻接地先动保护动作后,平行保护的电流有效值增大;而当 $\alpha = 1.0$ 金属接地时,平行保护的电流有效值减小,因此,有效值突变量判据无法防止平行保护发生误动。

当 $\alpha = 1.0$ 时,不同过渡电阻 R_g 下各保护零序电流的相位变化量如图 7 所示。

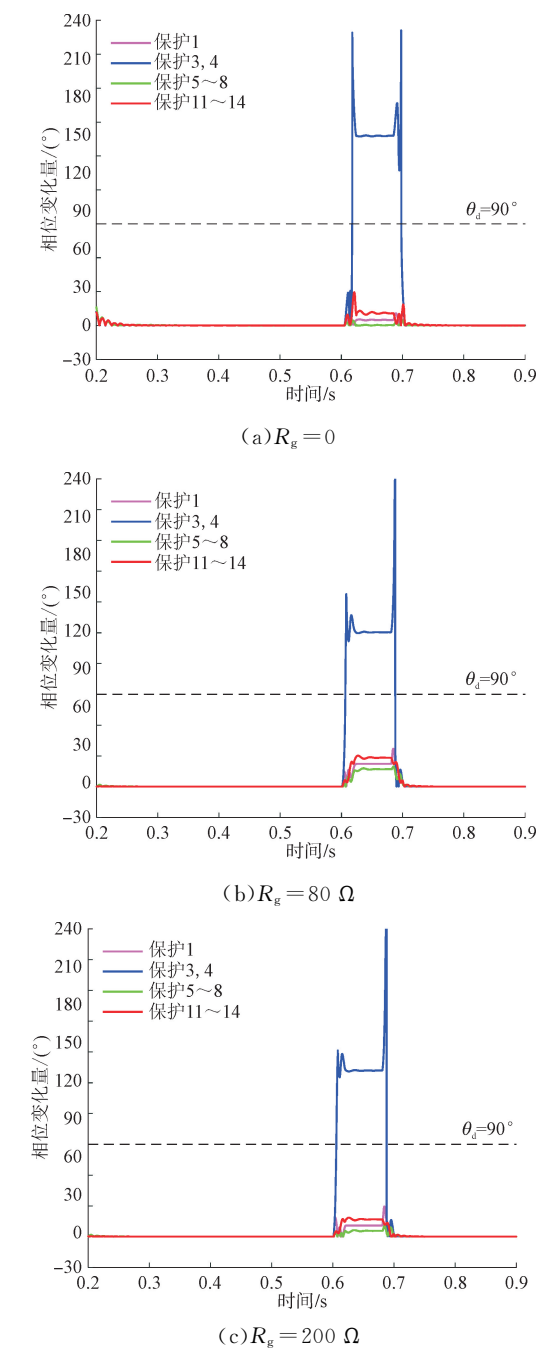


图 7 不同过渡电阻下各保护零序电流的相位变化量
Fig. 7 Phase change of zero sequence current for each protection under different transition resistances

由图 7 可见,在不同过渡电阻下,当保护 2 动作后,保护 1、5~8、11~14 零序电流的相位变化量均远小于 90°,而保护 3、4 零序电流的相位变化量均大于 90°且持续时间大于 0.04 s。因此可知,双回线故障时,先动保护动作前后,后动保护和近侧保护不满足相位突变量判据,而平行保护满足相位突变量判据,此时引入零序电流相位突变量判据可防止平行保护误动。

4.3 双回线两相接地故障

两相接地与单相接地,仅在零序电流的大小上有所区别,在出现零序电流这一本质现象上基本没有区别。下面,以 $\alpha=0$ 时双回线两相金属性接地故障为例,说明所提方法在两相接地时的适用性。表 6 给出了双回线两相金属性接地故障时,流过保护的零序电流与动作时间。两相接地时各保护零序电流的相位变化量如图 8 所示。

表 6 双回线两相接地故障时流过保护的零序电流与动作时间

Table 6 Zero sequence current and action time flowing through protection during two-phase grounding faults on double circuit lines						
保护	故障位置	$3I_q/\text{kA}$	$3I_h/\text{kA}$	$3\Delta I/\text{kA}$	动作时间/s	动作顺序
1	$\alpha=0$	50.764	0	-50.764	3.277	①
2		3.135	7.142	4.007	4.248	③
3, 4		3.029	3.796	0.767	4.275	④误动
5~8		4.891	0.367	-4.524	3.963	②误动
11~14		1.232	0.738	-0.494	5.431	⑤

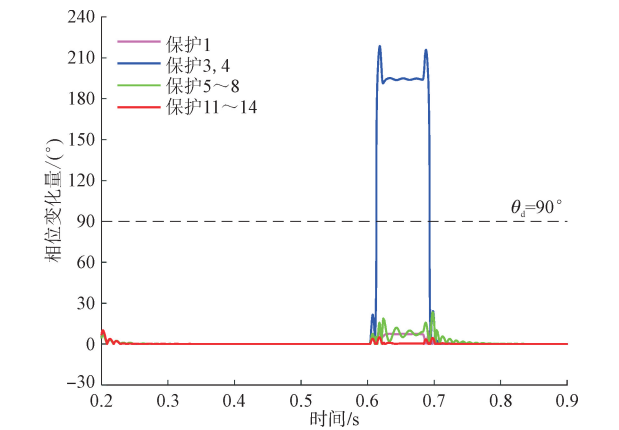


图 8 两相接地时各保护零序电流的相位变化量
Fig. 8 Phase change of zero sequence current for each protection during two-phase grounding

由表 6 可见,保护 3~8 将误动,其中保护 5~8 的有效值突变量为 -4.524 kA,通过有效值突变量判据可以防止保护 5~8 发生误动。由图 8 可见,保护 3、4 的零序电流相位变化量大于 90°,通过相位突变量判据可以防止保护 3、4 发生误动。由此可知,有效值突变量和相位突变量判据同样适用于两相接地的故障类型。

5 结 论

本文分析了单回线和双回线发生接地故障时,

零序电流的分布特征以及故障线路中零序电流较大的一侧保护动作前后,其余各线路中零序电流有效值和方向的变化情况,提出了引入零序电流有效值突变量和相位突变量判据的零序反时限电流保护方案。通过理论分析和仿真验证,得到以下结论。

(1) 高压电网发生接地故障,非故障线路的反时限零序电流保护可能先于故障线路中流过故障电流小的一侧保护动作。

(2) 故障线路中零序电流较大的一侧保护动作后,流过相邻非故障线路的零序电流有效值将减小,或方向突变;而对于故障线路中零序电流较小的一侧保护,流过其的零序电流有效值将增大,且方向不变。

(3) 通过在零序反时限电流保护中引入零序电流有效值突变量和相位突变量判据,可以有效防止非故障线路的零序反时限电流保护误动,且在经过渡接地时,该判据仍然适用。

参考文献:

- [1] 王宏宇,李永丽,张云柯,等. 单电源多级串供型输电线路距离保护误动原因分析及改进[J]. 电力自动化设备, 2021, 41(2): 179-185.
WANG Hongyu, LI Yongli, ZHANG Yunke, et al. Analysis and improvement of mal-operation in distance protection of multi-stage series transmission line with single power source [J]. Electric Power Automation Equipment, 2021, 41(2): 179-185.
- [2] 金瑞,林湘宁,时伯年. 基于测量阻抗轨迹的接地距离保护自适应整定方法[J]. 电力系统自动化, 2022, 46(14): 185-192.
JIN Rui, LIN Xiangning, SHI Bonian. Adaptive setting method of grounding distance protection based on measured impedance trajectory [J]. Automation of Electric Power Systems, 2022, 46(14): 185-192.
- [3] 薛永端,汪洋,徐丙垠. 小电阻接地系统高灵敏度阶段式零序过电流保护[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(19): 6217-6226.
XUE Yongduan, WANG Yang, XU Bingyin. High sensitive zero-sequence stage current protection for low-resistance grounding system [J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(19): 6217-6226.
- [4] 薛永端,任伟,唐毅,等. 基于热稳定原理的中性点小电阻接地系统间歇接地故障保护[J]. 电力系统自动化, 2021, 45(18): 122-130.
XUE Yongduan, REN Wei, TANG Yi, et al. Intermittent grounding fault protection based on principle of

thermal stability for low resistance neutral grounded system [J]. Automation of Electric Power Systems, 2021, 45(18): 122-130.

- [5] 吴海江,陈锦荣,廖峰,等. 小电阻接地配电系统集中式接地保护研究[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(21): 141-149.
WU Haijiang, CHEN Jinrong, LIAO Feng, et al. Centralized protection for a grounding fault in a low-resistance grounding distribution system [J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(21): 141-149.
- [6] 任伟,薛永端,徐丙垠,等. 小电阻接地系统高阻接地故障纵联差动保护[J]. 电网技术, 2021, 45(8): 3276-3282.
REN Wei, XUE Yongduan, XU Bingyin, et al. Longitudinal differential protection of high resistance grounding faults in low-resistance grounding system [J]. Power System Technology, 2021, 45(8): 3276-3282.
- [7] 区伟潮,廖峰,陈锦荣,等. 小电阻接地有源配电网比幅比相式接地保护[J]. 电力系统及其自动化学报, 2023, 35(6): 124-131.
OU Weichao, LIAO Feng, CHEN Jinrong, et al. Grounding fault protection based on amplitude and phase comparison for low-resistance grounding active distribution network [J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2023, 35(6): 124-131.
- [8] 乔一达,吴红斌,吴通华,等. 含分布式电源的小电阻接地系统分区域零序保护[J]. 电力系统自动化, 2023, 47(10): 186-194.
QIAO Yida, WU Hongbin, WU Tonghua, et al. Regionalized zero-sequence protection for low-resistance grounded system with distributed generator [J]. Automation of Electric Power Systems, 2023, 47(10): 186-194.
- [9] 李玉敦,徐宪泽,孙孔明,等. 基于相序电流一致性的小电流接地故障方向算法[J]. 电力系统及其自动化学报, 2023, 35(1): 68-77.
LI Yudun, XU Xianze, SUN Kongming, et al. Algorithm of small current grounding fault direction based on consistency of phase current fault component and zero-sequence current [J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2023, 35(1): 68-77.
- [10] 李景丽,杨旭晨,褚双伟,等. 基于波形相似度的小电阻接地系统高阻接地保护方法[J]. 电瓷避雷器, 2023(1): 39-48.
LI Jingli, YANG Xuchen, CHU Shuangwei, et al. High resistance grounding protection method of low resistance grounding system based on waveform simi-

- larity [J]. *Insulators and Surge Arresters*, 2023(1): 39-48.
- [11] 罗美玲, 国兴超, 于晓军, 等. 基于波形相关性分析的换流变压器零序差动保护方案 [J]. *电力系统保护与控制*, 2020, 48(12): 80-89.
- LUO Meiling, GUO Xingchao, YU Xiaojun, et al. Zero-sequence differential protection scheme for a converter transformer based on waveform correlation analysis [J]. *Power System Protection and Control*, 2020, 48(12): 80-89.
- [12] 张延鹏. 东北电网 500 kV 线路零序反时限保护应用研究 [J]. *东北电力技术*, 2010, 31(5): 18-20.
- ZHANG Yanpeng. Study on zero-sequence inverse-time protection for 500 kV transmission line in north-east power grid [J]. *Northeast Electric Power Technology*, 2010, 31(5): 18-20.
- [13] 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/OL]. *电力自动化设备*, 2023: 1-11 [2023-03-01]. <https://doi.org/10.16081/j.epae.202302002>.
- 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/OL]. *Electric Power Automation Equipment*, 2023: 1-11 [2023-03-01]. <https://doi.org/10.16081/j.epae.202302002>.
- [14] 束洪春, 安娜, 代月, 等. 基于电流上升速率的柔性直流环网输电线路反时限保护 [J]. *电力系统自动化*, 2023, 47(6): 206-215.
- SHU Hongchun, AN Na, DAI Yue, et al. Inverse-time protection for flexible DC transmission lines in ring network based on current rising rate [J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2023, 47(6): 206-215.
- [15] 黄景光, 赵珩, 李浙栋, 等. 基于动作时限曲线拟合思想的含 DG 型配电网后备保护新方法 [J/OL]. *电网技术*, 2023: 1-9 [2023-06-15]. <https://doi.org/10.13335/j.1000-3673.pst.2023.0688>.
- HUANG Jingguang, ZHAO Heng, LI Zhedong, et al. A new backup protection method for distribution network with DG based on action time curve fitting [J/OL]. *Power System Technology*, 2023: 1-9 [2023-06-15]. <https://doi.org/10.13335/j.1000-3673.pst.2023.0688>.
- [16] 黄景光, 张宇鹏, 李江峡, 等. 基于阻抗修正的反时限过流保护新方案 [J]. *电力系统保护与控制*, 2020, 48(9): 88-94.
- HUANG Jingguang, ZHANG Yupeng, LI Jiangxia, et al. A novel impedance correction-based inverse-time overcurrent protection scheme [J]. *Power System Protection and Control*, 2020, 48(9): 88-94.
- [17] XIN Zeyu, WANG Haozong, DONG Xinzhou, et al. Inverse time zero sequence protection based on traveling wave startup information [C]//2021 3rd Asia Energy and Electrical Engineering Symposium (AEEES). Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2021: 772-775.
- [18] 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.
- [19] 吴麟琳, 黄少锋. 平行双回线对反时限零序电流保护的影响及改进算法 [J]. *电网技术*, 2013, 37(3): 707-712.
- WU Linlin, HUANG Shaofeng. Influence of parallel double-circuit transmission lines on inverse-time zero-sequence current protection and its improved algorithm [J]. *Power System Technology*, 2013, 37(3): 707-712.
- [20] 于游, 田景辅, 李涛. 平行双回线对反时限零序电流保护的影响及改进算法 [J]. *电网与清洁能源*, 2020, 36(7): 64-68, 74.
- YU You, TIAN Jingfu, LI Tao. Influence of parallel double circuits on inverse time-sequence zero-sequence current protection and the improved algorithm [J]. *Power System and Clean Energy*, 2020, 36(7): 64-68, 74.
- [21] 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.
- ZHANG Zijin, CONG Wei, XIAO Jing, et al. Acceleration scheme of zero-sequence inverse-time overcurrent protection for double-circuit lines on same tower [J]. *Electric Power Automation Equipment*, 2017, 37(9): 159-165.
- [22] ZHANG Zijin, CONG Wei, GAI Wuyang, et al. Operational analysis of zero-sequence inverse-time overcurrent protection in parallel double-circuit transmission lines [C]//2016 IEEE PES Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conference (APPEEC). Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2016: 491-495.
- [23] 李欧. 引入电压变速因子的反时限零序电流保护方案 [J]. *广东电力*, 2020, 33(2): 109-116.

- LI Ou. Inverse time zero sequence current protection with introduction of speed-changing factor [J]. Guangdong Electric Power, 2020, 33(2): 109-116.
- [24] 王英英, 王玉龙, 吕东晓, 等. 同塔双回线接地故障断路器误动的改进策略 [J]. 高压电器, 2022, 58(5): 172-179.
- WANG Yingying, WANG Yulong, LÜ Dongxiao, et al. Improving strategy of ground fault mal-operation of circuit breaker with double-circuit transmission line in the same tower [J]. High Voltage Apparatus, 2022, 58(5): 172-179.
- [25] 丁晓兵, 赵曼勇, 徐振宇. 接地故障零序方向元件拒动保护改进方案 [J]. 电力系统自动化, 2006, 30(9): 88-90.
- DING Xiaobing, ZHAO Manyong, XU Zhenyu. Improvement on zero sequence current protection when directional element fails to operate during earth faults [J]. Automation of Electric Power Systems, 2006, 30(9): 88-90.
- [26] 高子林, 曹龙汉, 姜坤. 滤除衰减直流分量的改进傅氏算法探讨 [J]. 华北电力大学学报(自然科学版), 2013, 40(1): 19-23.
- GAO Zilin, CAO Longhan, JIANG Kun. A improved Fourier algorithm for decaying DC component filtration [J]. Journal of North China Electric Power University (Natural Science Edition), 2013, 40(1): 19-23.
- [27] 吴继维, 童晓阳, 廖小君, 等. 一种滤除衰减直流分量的全波傅氏改进算法研究 [J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(2): 9-17.
- WU Jiwei, TONG Xiaoyang, LIAO Xiaojun, et al. A full-wave Fourier improved algorithm of filtering decaying DC component [J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(2): 9-17.
- (编辑 刘杨 李慧敏)