

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

张子衿¹, 丛伟¹, 肖静², 冯迎春², 王安宁³, 王孟夏¹

(1. 山东大学 电网智能化调度与控制教育部重点实验室, 山东 济南 250061;

2. 国网山东省电力公司检修公司, 山东 济南 250118; 3. 国网山东省电力公司调控中心, 山东 济南 250001)

摘要: 分析了同杆双回线内部发生接地故障时故障线路及相邻线路上零序反时限过流保护的动作特性。分析结果表明当故障位置与两侧系统参数满足特定条件时, 双回线相邻线路上的零序反时限保护可能误动, 故障线路两端保护的灵敏度配合可能存在问题。提出一种改变相邻线路保护时间整定系数的方法来避免可能出现的保护误动, 该方法通过增加相邻线路保护动作延时来保证双回线保护优先动作, 但也给相邻线路保护的速动性带来不利影响。此外故障线路两端保护的動作时间可能相差较大, 不利于故障的快速切除。为此设计了基于零序电流变化和零序功率方向的加速方案, 无论双回线故障还是双回线相邻线路故障, 均能确保故障线路保护优先动作, 从而保证各处保护的选择性和速动性。算例仿真验证了分析结论的正确性和所提加速方案的可行性。

关键词: 继电保护; 同杆双回线; 零序反时限; 过电流保护; 加速方案; 输电

中图分类号: TM 773

文献标识码: A

DOI: 10.16081/j.issn.1006-6047.2017.09.022

0 引言

零序反时限过流保护作为后备保护时可以获得较高的灵敏度^[1-2], 因此在高压电网中的应用日益广泛。实际应用中, 全网使用同一条反时限特性曲线^[3], 一般情况下, 发生接地故障时, 可由零序电流的自然分布特性来确保保护动作的选择性。然而, 同杆双回线结构将对发生接地故障时零序电流的分布产生很大影响^[4-5]。当线路参数及故障位置满足特定条件时, 同杆双回线相邻线路保护的选择性可能无法满足要求, 故障线路两端保护的灵敏度配合也会存在问题。

针对上述问题, 文献[6]分析了同杆双回线内部发生接地故障时相邻线路保护误动的临界条件, 并提出在反时限特性上增加一个延时, 将其作为接地距离保护的补充, 仅用于切除高阻接地故障, 该方案不利于充分发挥零序反时限保护的优势。文献[7]分析了故障线路与非故障线路保护的動作特性, 指出在特定条件下, 除上述问题外, 故障线路两端保护还存在灵敏度配合的问题, 并提出一种基于广域信息的改进算法, 引入算子调整保护動作时间, 文献[8]提出的“引入电压及电抗因子”的改进方法与之类似, 这 2 种方法可根据实际情况调整保护的動作时间, 但需要采用广域信息, 实现难度较大, 成本较高。

本文针对同杆双回线相邻线路保护在特定情况下可能误动的问题, 分析了发生误动的临界条件, 提出通过改变同杆双回线相邻线路的零序反时限保护

时间整定系数、实现与其他线路保护配合从而避免误动的方法。针对故障线路两端保护動作时间相差较大, 以及重新整定后相邻线路内部故障时保护動作延时较长的问题, 本文分别设计了基于零序功率方向的相继動作方案及基于零序电流变化的加速動作方案, 前者用于解决同杆双回线两侧保护由于零序电流大小差别较大而导致的灵敏度配合问题, 后者用于解决同杆双回线相邻线路零序反时限过流保护動作延时较长的问题。本文所提方法可以有效地避免同杆双回线内部发生接地故障时相邻线路零序反时限保护误动, 且通过加速動作方案能够确保无论是同杆双回线故障还是相邻线路故障, 故障线路零序反时限保护总能优先動作, 从而保证了系统各保护动作的选择性和灵敏性。算例仿真验证了所提方法的有效性和可行性。

1 同杆双回线对零序反时限过流保护的影响

1.1 相邻非故障线路保护的動作特性分析

包含同杆双回线的输电网局部模型如图 1 所示。图中, $A-D$ 为母线; Z_{L10} 、 Z_{L20} 、 Z_{AB0} 、 Z_{DC0} 为各条线路的零序阻抗, Z_{M0} 为同杆双回线间零序互感, Z_{A0} 、 Z_{D0} 分别为两侧系统的零序阻抗; I_{F0} 为故障点零序电流,

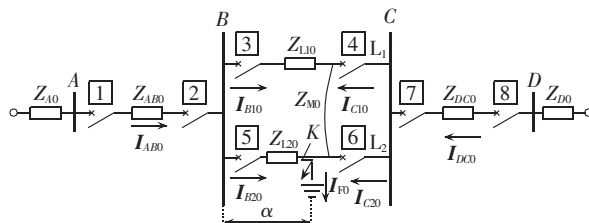


图 1 同杆双回线系统局部模型图

Fig.1 Partial model of double-circuit lines on same tower

收稿日期: 2016-07-26; 修回日期: 2017-05-18

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51377100)

Project supported by the National Natural Science Foundation of China(51377100)

I_{AB0} 、 I_{B10} 、 I_{B20} 、 I_{C10} 、 I_{C20} 、 I_{DC0} 为对应线路的零序电流;带数字的矩形框表示各零序反时限保护(均装有无序功率方向元件)的安装位置及对应开关。

假设故障发生在平行线路 L_2 上的 K 点,故障位置 α 定义为故障点距母线 B 的长度与线路 L_2 的总长之比,因此 $0 < \alpha < 1$ 。

下文中,白斜体表示对应电流相量的模值,如 I_{AB0} 为 I_{AB0} 的模值。

将图 1 去耦合简后可以得到如图 2 所示的零序网络。

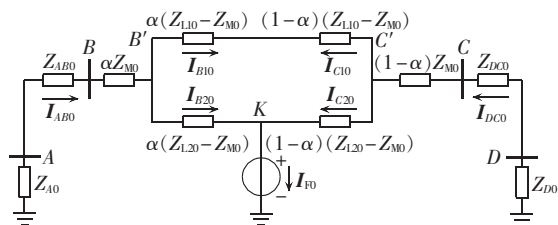


图 2 零序等值网络图

Fig.2 Zero-sequence equivalent network

接地故障发生时各支路零序电流方向如图 2 所示。但由于同杆双回线的存在,支路 $L_{B'C}$ 上的零序电流方向不定。不妨假设支路 $L_{B'C}$ 上的电流方向与 I_{B10} 相同,可以得到一个关于故障位置 α 的表达式:

$$\alpha > \frac{Z_{A0} + Z_{AB0}}{Z_{A0} + Z_{AB0} + Z_{D0} + Z_{DC0}} \quad (1)$$

分析式(1)可知,此时支路 $L_{B'C}$ 上的电流方向与 I_{B10} 相同,因此点 B' 上存在 $I_{AB0} = I_{B10} + I_{B20}$ 的电流关系,则 $I_{AB0} > I_{B20}$,流过相邻线路 L_{AB} 的零序电流比流过故障线路的电流大,从而导致线路 L_{AB} 的零序反时限过流保护误动。反之,若故障满足:

$$\alpha < \frac{Z_{A0} + Z_{AB0}}{Z_{A0} + Z_{AB0} + Z_{D0} + Z_{DC0}} \quad (2)$$

则将存在 $I_{DC0} > I_{C20}$ 的关系,即线路 L_{DC} 上的零序反时限过流保护将会误动。

1.2 故障线路保护的动作特性分析

为分析故障线路两端保护的动作特性,不妨假设 $I_{B20} > I_{C20}$,化简可得:

$$\alpha < \frac{1}{2} \frac{R(Z_{L10} - Z_{M0}) + M(Z_{L20} - Z_{M0})}{M(Z_{L20} - Z_{M0})} \quad (3)$$

$$\begin{cases} R = Z_{D0} + Z_{DC0} - Z_{A0} - Z_{AB0} + (1 - 2\alpha)Z_{M0} \\ M = Z_{A0} + Z_{AB0} + Z_{D0} + Z_{DC0} + Z_{L10} \end{cases} \quad (4)$$

分析式(3)、(4)可知,在特定条件使系数 $R > 0$ 时, α 的取值可能存在以下情况:

$$\frac{1}{2} < \alpha < \frac{1}{2} \frac{R(Z_{L10} - Z_{M0}) + M(Z_{L20} - Z_{M0})}{M(Z_{L20} - Z_{M0})} \quad (5)$$

假设前提条件为 $I_{B20} > I_{C20}$,即流过 B 侧保护的零序电流更大,则 B 侧保护具有较小的动作延时。但由式(4)可知,此时故障更靠近 C 侧,即远故障点一侧零序反时限过流保护先于近故障点一侧的保护动

作,二者灵敏度配合存在问题^[7]。如果流过两侧保护的零序电流幅值差别较大,则零序电流较小一侧保护的動作延时将会较长,不利于故障的快速切除。假设 $I_{B20} < I_{C20}$ 时同样存在此问题。

综合以上分析,可以得到以下结论:

a. 同杆双回线发生接地故障时,在特定条件下会出现相邻非故障线路的零序电流大于故障线路的零序电流的情况,此时相邻非故障线路上的零序反时限过流保护会误动。

b. 同杆双回线发生接地故障时,故障线路两端保护在特定条件下可能会出现远端保护先动作、近端保护后动作的情况,两端保护的灵敏度配合存在问题,且零序电流较小一侧保护的動作延时会增大。

c. 以上 2 种情况发生与否只与同杆双回线两侧系统的参数和故障位置有关,与同杆双回线本身的零序参数无关。

2 改变时间整定系数的防误动配合方案

实际应用中,为便于各条线路反时限保护之间进行配合,全网所有反时限保护采用统一的同特性反时限曲线且设定相同的启动电流值。这是因为故障点是唯一的零序电源,故障线路两侧的零序电流小于故障线路,因此各保护动作自然满足选择性要求。但同杆双回线的特殊结构会对零序电流的分布带来较大影响,从而导致同杆双回线内部发生故障时相邻线路保护的误动。随着同杆双回线结构应用的日益广泛,同杆双回线相邻线路保护误动已成为零序反时限保护应用中亟待解决的问题。

为避免保护误动,可以改变相邻线路零序反时限保护的動作曲线,增大其動作延时,使各保护之间形成配合。国际电工委员会在 IEC255-3 标准中将常见的反时限特性曲线分为一般反时限、非常反时限和极端反时限 3 种。最常用的一般反时限特性方程如下:

$$t = 0.14 \frac{T_{DS}}{(I/I_{pu})^{0.02} - 1} \quad (6)$$

其中, T_{DS} 为时间整定系数; I 为流过保护安装处的零序电流; I_{pu} 为启动电流。改变反时限特性曲线有 2 种方法,即修改分母中比值的幂次或修改时间整定系数 T_{DS} 的取值^[9-10]。修改分母中比值的幂次可以完全改变反时限特性曲线的形状,但也可能会与已有保护的曲线发生交叉从而引入新的复杂问题,本文不进行讨论;而修改时间整定系数只会对反时限曲线进行上下移动,相对而言更有利于保护间的配合,本文选择这种方法来避免同杆双回线相邻保护误动。

需要说明的是,只有同杆双回线两侧相邻线路远端的零序反时限过流保护的動作曲线需要重新整定,其余保护的整定值不变。零序反时限过流保护配合整定图如图 3 所示,当点 K_2 发生故障且故障位置

α 满足式(1)时,流过同杆双回线相邻线路保护 1 和 2 的零序电流将大于故障线路保护 5 处的零序电流,保护 1 和 2 可能误动。但考虑到各保护装有零序功率方向元件,保护 2 会被方向元件闭锁,故只有保护 1 可能误动;同样的结论适用于保护 8。因此只需对保护 1 与 8 的动作曲线重新进行整定,其余保护的整定值保持不变。

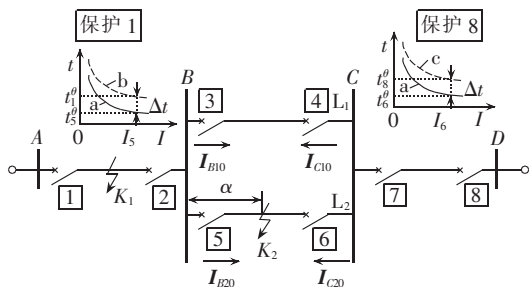


图 3 零序反时限过流保护配合整定图

Fig.3 Cooperative setting of zero-sequence inverse-time overcurrent protections

如图 3 所示,传统的零序反时限过流保护采用统一的同特性反时限曲线,以曲线 a 表示。平行线路 L_2 上发生故障且 $\alpha = \frac{Z_{A0}+Z_{AB0}}{Z_{A0}+Z_{AB0}+Z_{D0}+Z_{DC0}}$ 时,线路 L_1 上无零序电流,此即为相邻线路保护 1 与 8 是否误动的临界点。为确保同杆双回线与相邻线路保护的配合,需要增加保护 1 与保护 8 的动作延时,整定后的动作特性曲线分别如曲线 b、c 所示。下面以保护 1 为例说明整定计算步骤(保护 8 同理)。

a. 求出点 K_2 发生故障且故障点位于误动临界点时流过保护 5 的零序电流 I_5 ,根据式(6)求得保护 5 此时的动作时间 t_5^0 ,作为动作延时配合的基准。

b. 保护 1 的动作延时以 t_5^0 为基础增加一个 Δt ,即 $t_1^0 = t_5^0 + \Delta t$,得到保护 1 新的动作时间。

c. t_1^0 为当故障位置位于误动临界点对应的动作延时。为了得到完整的保护 1 反时限特性曲线,应求出其新的时间整定系数 T_{DS1} 。由式(6)可得:

$$T_{DS} = \frac{t[(I/I_{pu})^{0.02} - 1]}{0.14} \quad (7)$$

将 t_1^0 、误动临界点处发生故障时流过保护 1 的零序电流(此时平行线路 L_1 上无零序电流,故流过保护 1 与保护 5 处的零序电流相同)、启动电流 I_{pu} 代入式(7),即可求出保护 1 新的时间整定系数 T_{DS1} ,如图 3 中的曲线 b 所示。

需要说明的是,为了保证重新整定后保护 1 在任何恶劣情况下均不误动, Δt 的取值应满足在保护 5 出口处发生接地故障时(此时流过保护 1 处零序电流最大)仍有 $t_1^0 < t_5^0$ 。同样的要求也适用于保护 8。

通过修改保护 1 与保护 8 的反时限特性曲线固然可以避免上述故障情况下相邻线路保护的误动,

但当线路 L_{AB} 或 L_{DC} 内部发生故障时也会导致较长的动作延时,保护的速动性得不到保证。此外,受系统参数的影响,同杆双回线内部发生故障时流过两端保护 5 和 6 的零序电流可能相差较大,导致零序电流较小侧保护的動作延时较大,也不利于故障的快速切除。

针对上述问题,本文分别提出了基于零序电流变化的相邻线路保护加速方案及基于零序功率方向的同杆双回线保护相继动作方案^[11-12]。其中,相邻线路保护加速方案针对同杆双回线两侧相邻线路零序保护,如图 3 中的保护 1 与保护 8;同杆双回线保护相继动作方案针对同杆双回线两端零序保护,如图 3 中的保护 5 与保护 6(保护 3 和 4 也同样适用)。

3 零序反时限过流保护加速方案

3.1 基于零序功率方向的同杆双回线保护相继动作方案

本方案用于解决同杆双回线内部发生故障时,故障线路两端保护的灵敏度配合问题。该方案基于故障隔离过程中自身零序功率方向元件与同一变电站内另一双回线上零序功率方向元件的判断结果,可快速判断出同杆双回线内部是否发生故障,从而确保故障线路两端保护以相继动作的方式快速切除故障。

以图 3 所示系统中保护 3 和 5 为例说明同杆双回线保护相继动作原理,保护 4 与 6 的原理与之类似。当同杆双回线中一条线路发生故障且对端断路器跳闸后,本端 2 条线路上的保护检测到的零序功率方向正好相反;故障线路上的方向元件判为正方向(由母线指向被保护线路为正方向),非故障线路判为反方向。据此即可确定为发生区内故障并以相继动作的方式实现保护加速。对应的保护逻辑如图 4 所示。图中,延时 t_2 的目的是对本端另一保护的零序功率方向判断结果进行保持。

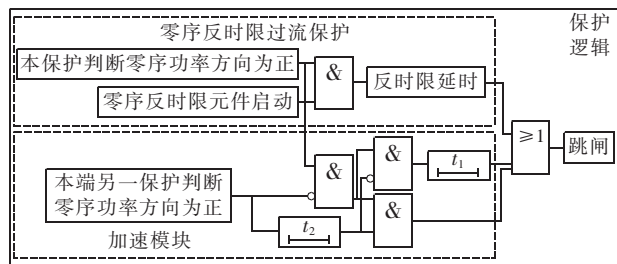


图 4 双回线保护相继动作方案

Fig.4 Successive operation scheme of protections for double-circuit lines

下文结合图 3 对同杆双回线内部发生故障时,同杆双回线两侧保护的相继动作方案的性能进行分析。

同杆双回线内部发生故障(点 K_2 故障)时,保护 5 处的零序功率方向元件判为正方向,但受故障位置及系统参数的影响保护 3 处的零序电流方向无法确定,这就需结合对端保护方向元件判断情况进行进一步分析。此时各保护方向元件可能的 2 种判断情况如表 1 所示。

表 1 发生区内故障时各保护零序功率方向元件判断情况
Table 1 Zero-sequence power directions of protections during in-zone fault

保护	情况 A		情况 B	
	零序功率方向	L_1 零序电流方向	零序功率方向	L_1 零序电流方向
3	正方向	与 I_{m0} 相同	反方向	与 I_{c0} 相同
5	正方向		正方向	
4	反方向		正方向	
6	正方向		正方向	

对于情况 A,由于保护 3 与保护 5 所判方向均为正方向,因此其加速模块相互闭锁不会启动。对于零序反时限过流保护自身而言,由于非故障线路上流过的故障电流一般较小,因此保护 3 不会启动,但保护 5 的零序反时限过流保护将会启动并开始计算延时;对于对端保护而言,保护 4 所判方向为反方向,所以其加速模块与零序反时限过流保护均被闭锁;但保护 6 此时已满足加速动作条件,因此保护 6 将会经延时 t_1 后出口跳开相应断路器。此时保护 3 会因断路器 6 跳闸、零序电流反向而判为反向故障,从而使得保护 5 的加速判据得以满足,因此保护 5 会在保护 6 动作后相继加速动作切除故障。

对于情况 B,故障发生时保护 5 的加速条件立即得到满足。此时只需设置合理的动作延时 t_1 即可保证保护 5 动作的选择性和快速性。保护 6 也会在保护 5 动作后相继动作隔离故障。

由以上分析可以看出,动作延时 t_1 的设定十分重要。由于零序反时限过流保护作为后备保护,因此 t_1 应避开主保护的動作时间;另一方面,在流过保护的零序电流较小时,保护的動作延时将会很长,甚至可能发生由于达不到零序反时限元件的启动电流导致保护拒动的情况,此时加速模块就应发挥作用,不能无限制地等待下去。因此, t_1 应在综合考虑主保护的動作时间与零序反时限元件流过启动电流时所对应的最大動作时间的基础上确定,使得在同杆双回线内部任意位置发生故障时,改进后的零序反时限过流保护的動作时间不大于 t_1 。

综上所述,同杆双回线内部发生故障时,对于故障线路两端保护而言,只需通过设置合理的動作延时 t_1 ,即可实现无论故障点位于同杆双回线内部何处,总有一端保护会在保证选择性和延时配合的基础上先动作,进而使得对端保护相继动作,这不仅解决了两侧保护灵敏度的配合问题,而且能够达到快速切除

故障的目的。

3.2 基于零序电流变化的相邻线路保护加速方案

本方案用于解决同杆双回线两侧相邻线路发生故障时,经重新整定后的相邻线路远端保护動作延时较长的问题。该方案通过判断当其他保护動作后流过保护安装处零序电流的变化情况,判别故障是否位于被保护线路内部,从而确定是否加速動作切除故障。

以图 3 中相邻线路 L_{AB} 上的保护 1 为例说明其基本原理(保护 8 的動作原理与之相似):同杆双回线相邻线路内部发生故障时,在其他保护動作后,保护 1 处的零序电流虽然有所变化但仍然存在,据此即可判断故障发生位置并采取相应的動作。本方案对应的保护逻辑如图 5 所示,下文结合图 3 分析加速方案的性能。

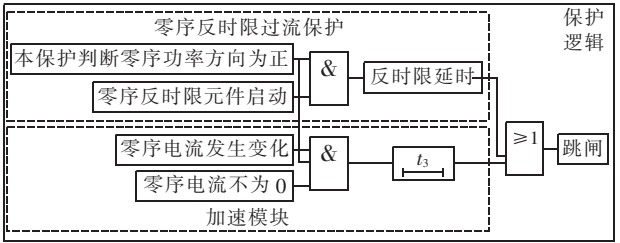


图 5 相邻线路保护加速方案

Fig.5 Acceleration scheme for protections of adjacent lines

当相邻线路 L_{AB} 内部发生故障(点 K_1 故障)时,由于已经对保护 1 进行了重新整定,因此保护 1 不会率先動作。此时保护 2 由于具有較小的動作延时将会先于保护 1 動作,此后流过保护 1 的零序电流虽因零序网络结构发生变化而有所增减,但因零序电源仍然存在故不会完全消失。此时保护 1 的加速動作条件得到满足,因此保护 1 将加速動作切除故障。

本方案中動作延时 t_3 的作用是使本方案与 3.1 节所述同杆双回线保护相继動作方案形成时限配合。当双回线内 K_2 点故障时,由 3.1 节分析可知,保护 5、6 将会相继動作,在不超过 t_1 的时间内切除故障,此后流过保护 1 处的零序电流将会消失,保护 1 返回不动作。因此,只需设置合理的動作延时 t_3 ,使得 $t_3 = t_1 + \Delta t$,即与同杆双回线内部保护的動作延时形成配合,即可保证保护 1 的选择性。

3.3 不同位置故障对 2 种方案的影响分析

下文结合图 3,分析不同的接地故障位置对 2 种方案产生的影响。

当线路 L_{AB} 上 K_1 处发生接地故障时,由 3.2 节分析可知,此时保护 2 先動作,然后保护 1 在相邻线路保护加速方案的加速下動作切除故障。此处重点分析此情况下同杆双回线路保护(保护 5 和 6)及其相继動作模块的工作情况。同杆双回线上零序电流方

向与 I_{C10} 、 I_{C20} 相同,保护 3 和 5 处零序功率方向为负,故保护 3 和 5 不会动作。对于保护 4 和 6 而言,由于两保护处的零序功率方向相同,不满足同杆双回线保护相继动作的条件,因此加速模块不会启动。此时流过保护 2 的零序电流为保护 4 与 6 处零序电流之和,上述保护均采用相同的动作特性曲线,故保护 2 的动作延时较保护 4 和 6 更短,保护 4 和 6 不会误动。线路 L_{DC} 上点 K_3 处发生接地故障时的情况类似,将由保护 7 与 8 先后动作切除故障,本文不再赘述。

同杆双回线路 L_{BC} 上点 K_2 处发生接地故障时,根据 3.1 节的分析,保护 6 和 5 会相继动作切除故障。本文重点分析该情况下相邻线路保护 1 和 2 的动作情况。接地故障发生后,保护 2 处的零序功率方向为负,不会动作。对于保护 1 而言,在同杆双回线保护动作之前,由于零序电流没有变化,因此其加速模块不启动。在保护 6 动作后,流过保护 1 的零序电流将发生变化,可能会满足加速条件。但由于已设置动作延时 $t_3 > t_1$,因此同杆双回线保护的相继动作模块会先于保护 1 的加速模块动作,不会导致保护 1 误动而失去选择性。若 L_1 上的零序电流方向与 I_{B1} 相同,则流过保护 1 的零序电流为保护 3 与 5 处零序电流之和。但在选择保护 1 的动作特性曲线时选取的 Δt ,能够确保在最严重的情况下保护 1 也不会先于保护 5 动作。综上所述,保护 1 此时不会误动。 L_1 上的零序电流方向与 I_{C10} 相同时分析与此类似,不再赘述。

可见,本文提出的同杆双回线保护相继动作方案与相邻线路保护加速方案是 2 个相对独立的方案且应用对象各不相同,前者用于同杆双回线两端零序反时限过流保护,后者用于同杆双回线相邻线路远端保护,二者之间通过设置合理的动作延时形成配合关系。当接地故障位于同杆双回线内部时,同杆双回线相继动作模块启动相继快速切除故障,此时相邻线路保护加速模块虽然可能启动,但由于动作时限的配合关系不会误动;当接地故障发生于相邻线路时,同杆双回线保护相继动作模块不会启动,由相邻线路保护加速模块加速动作切除故障。

4 仿真与分析

在 PSCAD 中建立如图 1 所示的同杆双回线模型。模型两侧系统电压均为 500 kV,故障类型为单相接地故障,0.2 s 时发生故障,其他参数如表 2 所示。

表 2 仿真模型参数表
Table 2 Parameters of simulation model

序别	Z_A/Ω	Z_B/Ω	$Z_L/(\Omega\cdot\text{km}^{-1})$	$Z_M/(\Omega\cdot\text{km}^{-1})$
正序	$5\angle 85^\circ$	$20\angle 75^\circ$	$0.0258+\text{j}0.2845$	—
零序	$5.5\angle 80^\circ$	$50\angle 74^\circ$	$0.2863+\text{j}0.9137$	$0.0901+\text{j}0.2764$

由表 2 可以求得保护正确动作对应的临界故障位置为 $\alpha=0.4098$ 。分别取 $\alpha=0.25$ 与 $\alpha=0.52$ 对各保护的動作延时进行仿真计算,结果如表 3 所示。

表 3 系统各保护动作仿真结果
Table 3 Simulative results of protections

保护编号	α	零序电流/kA	理论延时/s	仿真延时/s
1	0.25	4.265	1.087	1.096
3		0.404	4.154	—
4		0.445	3.673	—
5		4.648	1.062	1.067
6		2.130	1.356	1.337
8		2.599	1.264	1.272
1	0.52	3.662	1.135	1.141
3		0.303	6.912	—
4		0.264	10.257	—
5		3.340	1.167	1.183
6		3.026	1.203	1.213
8		2.789	1.235	1.237

$\alpha=0.25$ 时,结合前文分析与仿真数据可知此时平行线路 L_1 上的零序电流为 I_{C10} ,即存在 $I_{B20}=I_{AB0}+I_{C10}$ 、 $I_{DC0}=I_{C10}+I_{C20}$ 的关系。对故障线路两侧保护而言,保护 5 先于相邻线路保护 1 动作,满足选择性要求;但保护 8 处的零序电流为两平行线路之和,所以保护 8 将会先于保护 6 动作,即相邻线路保护发生误动。非故障线路上的保护 3、4 由于零序电流较小而不动作,保护 2、7 由于判为反方向故障而闭锁。 $\alpha=0.52$ 时各保护的動作情况类似。可以看出,同杆双回线内部发生接地故障时,总存在一侧相邻线路保护误动的情况。

此外, $\alpha=0.52$ 时,故障靠近保护 6 侧,但保护 5 会先于保护 6 动作切除故障,即故障线路两端保护的灵敏度配合存在问题,符合前文分析。

按前述方法对保护 1 与保护 8 的时间整定系数 T_{DS} 重新进行整定,并仍取 $\alpha=0.25$ 和 $\alpha=0.52$ 对各保护的動作延时重新进行仿真,结果如表 4 所示。

表 4 采用改进方法后系统各保护动作仿真结果
Table 4 Simulative results by improved method

保护编号	α	理论延时/s	仿真延时/s
1	0.25	1.087	—
5		1.062	1.067
6		1.356	1.304
8		1.264	—
1	0.52	1.135	—
5		1.167	1.172
6		1.203	1.206
8		1.235	—

可以看出,重新整定后,同杆双回线发生内部故障时相邻线路的保护 1 与 8 均不动作,由故障线路的两端保护 5 与 6 动作切除故障。但分析動作延时可以发现,即使各保护均正确整定,但受系统参数影响,某些情况下(如 $\alpha=0.25$ 时)故障线路两端保护

5、6 的动作延时存在较大差别,不利于故障的快速切除。

以 B 端保护 3 与 5 为例,在 $\alpha=0.52$ 时对同杆双回线内部保护的加速方案进行仿真。其中,保护 3 与 5 均采用传统零序功率方向判据,如式(8)所示。

$$\varphi < \arg \frac{3I_0}{3U_0} < 180^\circ - \varphi \quad (8)$$

其中, I_0 、 U_0 分别为零序电流、电压。

图 6 为保护 3 与保护 5 在保护 6 动作前后零序功率方向的变化情况。

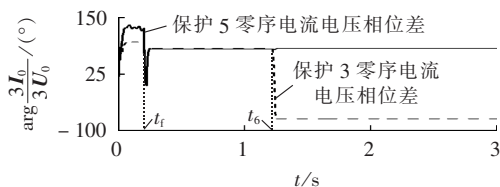


图 6 故障线路保护零序电流电压相位差

Fig.6 Phase difference between zero-sequence current and voltage of protection of faulty line

分析图 6 可知, t_f 时刻发生故障后,保护 3 与保护 5 的零序电流电压相位差均为 81° 左右,零序功率方向均为正方向。但当 t_6 时刻故障线路的远端保护 6 动作后,保护 3 处的零序电压、电流相位差由 81° 突变至 -75° 左右,所判故障方向由正方向变为反方向;而故障线路上保护 5 仍判为正方向故障。此时满足保护 5 加速条件,保护 5 将会在保护 6 动作后相继动作隔离故障。

对前述相邻线路保护的加速方案进行仿真。图 7 为发生正向区外故障(保护 7 动作前后)和区内故障(保护 2 动作前后)时流过同杆双回线相邻线路上保护 1 处零序电流的变化情况。对于区内故障,由于保护 2 动作后流过保护 1 的零序电流变化情况受两侧系统电源的影响较大,因此本文分 3 种情况进行仿真。

a. 情况 1:区内故障,系统两侧电源电压均为 500 kV。

b. 情况 2:区内故障,系统 A 侧电源电压为 500 kV、系统 D 侧电源电压为 220 kV。

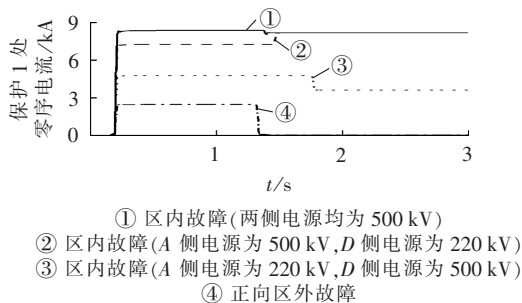


图 7 相邻线路保护 1 零序功率方向变化情况

Fig.7 Variation of zero-sequence power direction of protection 1 of adjacent line

c. 情况 3:区内故障,系统 A 侧电源电压为 220 kV、系统 D 侧电源电压为 500 kV。

相邻线路保护 1 的零序功率方向变化情况见图 7。由图 7 可见,发生正向区外故障时,流过保护 1 的零序电流将在故障线路保护 7 动作后降为 0;而发生区内故障时,流过保护 1 的零序电流的变化情况与两侧系统电源电压有关。当两侧系统电源电压均为 500 kV 时,保护 1 处零序电流在保护 2 动作前后基本不变;当 A 侧、D 侧系统电源电压分别为 500 kV、220 kV 时,保护 1 处的零序电流增大;当 A 侧、D 侧系统电源电压分别为 220 kV、500 kV 时,保护 1 处的零序电流减小但并未消失。综上所述,流过保护 1 的零序电流虽然在保护 2 动作后有所增减,但仍然存在,与发生正向区外故障时保护 7 动作后零序电流消失存在较大差别,符合前文分析。

5 结语

对含有同杆双回线结构的输电网而言,当同杆双回线内发生接地故障时,相邻线路保护在特定条件下可能发生误动。本文主要完成了以下工作:

a. 分析了同杆双回线内发生接地故障时故障线路与相邻线路零序反时限过流保护的動作特性,分析发现在两侧系统参数及故障位置满足特定条件时,相邻非故障线路保护会出现误动,故障线路两端保护的灵敏度配合会存在一定问题。

b. 针对上述问题,提出一种改变相邻线路保护时间整定系数的方法来避免误动。针对故障线路两端保护动作时间相差较大,以及重新整定后相邻线路内部故障时保护动作延时较长的问题,本文分别设计了基于零序功率方向的相继动作方案及基于零序电流变化的加速动作方案。

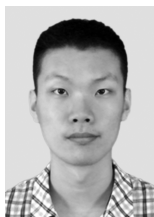
c. 本文所述防误动及加速方案原理清晰,实现方便。无论同杆双回线还是同杆双回线相邻线路故障,均能够确保故障线路保护优先动作,从而保证各处保护的选择性与速动性。

参考文献:

- [1] 严琪,肖万芳. 反时限电流保护整定计算相关问题研究[J]. 电力自动化设备,2008,28(7):77-80.
YAN Qi,XIAO Wanfang. Setting coordination of inverse-time over-current relays[J]. Electric Power Automation Equipment, 2008,28(7):77-80.
- [2] 郭煜华,姜军,范春菊,等. 改进的配电网反时限过电流保护[J]. 电力自动化设备,2015,35(10):45-50.
GUO Yuhua,JIANG Jun,FAN Chunju,et al. Improved inverse-time over-current for distribution network[J]. Electric Power Automation Equipment,2015,35(10):45-50.
- [3] 张旭俊,上官帖,唐建洪,等. 采用零序功率绝对值构成反时限零序电流保护的方案探讨[J]. 电力系统保护与控制,2009,37(23):

- 41-44.
- ZHANG Xujun, SHANGGUAN Tie, TANG Jianhong, et al. Research on inverse time current relay based on absolute value of zero-sequence power[J]. Power System Protection and Control, 2009, 37(23):41-44.
- [4] 林军. 超高压同杆双回路多重故障的计算[J]. 中国电机工程学报, 2010, 30(13):89-93.
- LIN Jun. Multi-fault calculation of EHV double circuits transmission lines[J]. Proceedings of the CSEE, 2010, 30(13):89-93.
- [5] 曾耿晖, 蔡泽祥, 陈桥平, 等. 同塔双回线路接地故障零序电流分布特性分析[J]. 电网技术, 2011, 35(11):212-217.
- ZENG Genghui, CAI Zexiang, CHEN Qiaoping, et al. Analysis on zero sequence current distribution characteristic of grounding faults occurred in double-circuit transmission lines on the same tower[J]. Power System Technology, 2011, 35(11):212-217.
- [6] 臧睿, 廖晓玉, 张予鄂. 对输电线反时限零序电流保护选择性的分析[J]. 继电器, 2006, 34(22):12-13.
- ZANG Rui, LIAO Xiaoyu, ZHANG Yu'e. Analysis of inverse time zero sequence current relay and its selectivity[J]. Relay, 2006, 34(22):12-13.
- [7] 吴麟琳, 黄少锋. 平行双回线对反时限零序电流保护选择性的分析[J]. 电网技术, 2013, 37(3):708-712.
- 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):708-712.
- [8] 李欧. 引入变速因子的反时限零序电流保护[D]. 北京:华北电力大学, 2015.
- LI Ou. Research of inverse time zero sequence current protection with introduction of speed-changing factor[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2015.
- [9] 邹东霞, 梁海宁, 苏毅, 等. 通用反时限特性在微机保护中的实现方法[J]. 电力系统自动化, 2007, 31(5):80-83.
- ZOU Dongxia, LIANG Haining, SU Yi, et al. Realization of the universal inverse time lag characteristic in microprocessor based protection[J]. Automation of Electric Power Systems, 2007, 31(5):80-83.
- [10] 徐厚东. 微机反时限过流保护算法[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2006, 46(1):1-4.
- XU Houdong. Microprocessor-based inverse time over-current protection algorithm[J]. Journal of Tsinghua University (Science and Technology), 2006, 46(1):1-4.
- [11] 董新洲, 李幼仪, 薄志谦. 双回线无通道保护(一)故障分析和保护原理[J]. 电力系统自动化, 2004, 28(11):53-56.
- DONG Xinzhou, LI Youyi, BO Zhiqian. Non-communication protection of double-circuit line systems part one fault analysis and protection principle[J]. Automation of Electric Power Systems, 2004, 28(11):53-56.
- [12] 李幼仪, 董新洲, 孙元章, 等. 双回线无通道保护研究(二)仿真试验[J]. 电力系统自动化, 2004, 28(12):56-59.
- LI Youyi, DONG Xinzhou, SUN Yuanzhang, et al. Non-communication protection of double-circuit line systems part two simulation[J]. Automation of Electric Power Systems, 2004, 28(12):56-59.

作者简介:



张子衿

张子衿(1992—),男,河南洛阳人,硕士研究生,通信作者,主要研究方向为电力系统继电保护(E-mail:zijinzhangsdu@163.com);

丛伟(1978—),男,山东文登人,副教授,博士,主要研究方向为电力系统继电保护(E-mail:weicong@sdu.edu.cn);

肖静(1978—),女,山东泰安人,高级工程师,主要研究方向为超高压电网检修与运行(E-mail:violet.xx@163.com)。

Acceleration scheme of zero-sequence inverse-time overcurrent protection for double-circuit lines on same tower

ZHANG Zijin¹, CONG Wei¹, XIAO Jing², FENG Yingchun², WANG Anning³, WANG Mengxia¹

(1. Key Laboratory of Power System Intelligent Dispatch and Control, Ministry of Education, Shandong University, Ji'nan 250061, China; 2. Maintenance Company of State Grid Shandong Electric Power Company, Ji'nan 250118, China; 3. Power Dispatch Control Centre of State Grid Shandong Electric Power Company, Ji'nan 250001, China)

Abstract: The operating characteristics of zero-sequence inverse-time overcurrent protections of the faulty and adjacent lines during the internal grounding fault of double-circuit lines on same tower are analyzed and results show that, when the fault location and the system parameters of both sides meet some conditions, the zero-sequence inverse-time overcurrent protections of the adjacent lines may malfunction and the protection sensitivities of two ends of the faulty line may mismatch. It is proposed to change the protection TDS (Time Dial Setting) of adjacent line to avoid the possible malfunction, which ensures the protections of double-circuit lines function first by increasing the time-delay of the protections of adjacent lines, but also reduces their sensitivity. Besides, the protections at both sides of faulty line may have quite different operating times, unfavourable for the rapid fault removal. Therefore, acceleration schemes respectively based on zero-sequence power direction and zero-sequence current variation are put forward, which ensures the protections of faulty line function first, either double-circuit lines or adjacent lines. The selectivity and sensitivity of all the protections are ensured. Simulative results prove the validity of the analytical results and the feasibility of the proposed acceleration scheme.

Key words: relay protection; double-circuit lines on same tower; zero-sequence inverse-time; overcurrent protection; acceleration scheme; electric power transmission