

引用格式:蒋江波,解超,李凤婷,等.适用于同杆双回线路接地故障改进跳闸与分相自适应重合闸策略[J].电力科学与技术学报,2024,39(3):48-57.

Citation: JIANG Jiangbo, XIE Chao, LI Fengting, et al. Improved tripping and phase-separation adaptive autoreclosing strategy suitable for ground fault on double-circuit transmission lines[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2024, 39(3): 48-57.

适用于同杆双回线路接地故障改进跳闸与 分相自适应重合闸策略

蒋江波, 解超, 李凤婷, 尹纯亚

(新疆大学电气工程学院, 新疆 乌鲁木齐 830046)

摘要:同杆双回线路发生接地故障时采用传统跳闸策略可能会产生负序分量,传统自动重合闸方案在合闸前不判定故障性质,重合失败时将影响系统稳定性。针对该问题,提出一种适用于同杆双回线路接地故障改进跳闸与分相自适应重合闸策略。首先,建立同杆双回输电线路各相之间的耦合模型并对其进行分析,提出一种能够避免负序分量注入系统的改进跳闸策略;其次,分别对瞬时性故障情况下和永久性故障情况下电容耦合电压特性进行分析,提出基于故障相电容耦合电压的故障性质判据;最后,结合改进跳闸策略和合闸策略,形成了适用于同杆双回输电线路接地故障分相自适应重合闸策略。通过 PSCAD/EMTDC 仿真验证了所提分相自适应重合闸策略能够避免负序分量注入系统,以及在不同接地故障类型、故障位置和过渡电阻情况下都能保证输电线路的重合成功率。

关键词:自适应重合闸;分相开关;故障性质判据;瞬时性故障;永久性故障

DOI: 10.19781/j.issn.1673-9140.2024.03.006

中图分类号: TM773

文章编号: 1673-9140(2024)03-0048-10

Improved tripping and phase-separation adaptive autoreclosing strategy suitable for ground fault on double-circuit transmission lines

JIANG Jiangbo, XIE Chao, LI Fengting, YIN Chunya

(School of Electrical Engineering, Xinjiang University, Urumqi 830046, China)

Abstract: When a ground fault occurs on double-circuit transmission lines, the conventional tripping strategy may inject negative-sequence components into the system. The traditional autoreclosing scheme does not determine the fault feature before the reclosing, and the stability of the power system will be affected if the reclose fails. To solve the above problems, an improved tripping strategy suitable for ground faults on double-circuit transmission lines is proposed, where phase-separation adaptive autoreclosing is used in the tripping strategy. Firstly, by establishing and analyzing the phase-to-phase coupling model of double-circuit transmission lines, an improved tripping strategy that can avoid the injection of negative-sequence components into the power system is proposed. Secondly, the capacitive coupling voltage characteristics are analyzed under transient and permanent faults respectively, and the fault feature identification criteria based on the capacitive coupling voltage of double-circuit transmission lines is proposed. Finally, the improved tripping and closing strategy are combined to form a phase-separation adaptive autoreclosing strategy suitable for ground faults on double-circuit transmission lines. The PSCAD/EMTDC simulation verifies that the proposed phase-separation adaptive autoreclosing strategy can avoid the injection of negative-sequence components into the system and ensure the reclosing success rate of the transmission line under different ground fault types, fault locations and transition resistances.

Key words: adaptive autoreclosing; phase segregated switches; fault criterion; transient failure; permanent failure

收稿日期: 2023-05-11; 修回日期: 2024-04-11

基金项目: 新疆维吾尔自治区自然科学基金(2021D01C087)

通信作者: 解超(1987—), 男, 博士, 副教授, 主要从事电力系统继电保护及可再生能源并网技术研究; E-mail: cheesemonster@sina.com

中国建设输电线路所需的土地资源日益匮乏,拆迁费用日益提高,使得输电线路的建设成本急剧增加。同杆双回输电线路由于其传输容量大和所占线路走廊小等优点,广泛应用于超高压甚至特高压输电线路^[1-2]。配置准确、可靠的重合闸策略,能够有效提高输电线路重合闸的成功率。根据数据统计显示,80%的输电线路故障属于瞬时性故障^[3-5]。自适应重合闸具有识别故障性质的功能^[6-8],传统自动重合闸在重合之前无法判断故障性质,如果重合时出现永久性故障可能会给系统造成二次冲击^[9-10]。当采用传统跳闸策略时可能会产生负序分量,增加高压直流输电系统换相失败的风险^[11-12]。

文献[13]提出准三相跳闸策略,即保留三相异名健全相。此策略虽不会给系统注入负序分量,但是由于三相对称,不利于故障性质的判定。文献[14]提出准两相跳闸策略,即保留两相异名健全相,这种策略尽管有助于故障性质的判定,却在系统中引入负序分量,且故障性质判据依赖于准确的电弧模型。文献[15-16]研究了当交流侧发生非对称故障时,会增大高压直流输电换相失败的风险的问题。文献[17]针对风电送出线路发生故障时采用三相全跳的方式会导致电气量迅速衰减的问题,提出利用风机变流器向风电送出线路注入电流的方式判别故障性质;文献[18]针对直流输电线路跳闸后极间不存在耦合量,导致故障性质难以判定的问题,提出了一种利用外加电容放电的方式判别故障性质,分析发现在故障消失前后电容电压存在显著变化;文献[19]针对输电线三相跳闸后电气量迅速衰减以及二次电弧持续时间难以确定的问题,提出利用预充电电容的方式判别故障性质,通过分析发现,在故障消失前后电容电压变化存在明显差异。采用引入辅助设备的方式判别故障性质虽不会给系统注入负序分量,但是外接设备的方法成本较高,以及有可能会影响电能质量,甚至可能对整个系统造成不良的影响。文献[20-22]采用参数识别的方法判别故障性质,即通过比较计算电容值与实际电容值,得出瞬时性故障时计算电容值与线路固有电容值基本相同,永久性故障时计算电容值与线路固有电容值相差很大。

文献[23-28]研究了基于电弧电流边际谱能量比、峭度值、等值阻抗相位变化和断开相电压相位的故障性质判据。此类判据都必须依靠准确的电弧模型,且当二次电弧自然熄灭时,该判据容易造

成误判或者漏判。基于二次电弧阶段的故障性质判据不仅需要电弧模型具有高准确度,还对数据采集有着较高要求^[29]。

针对上述问题,本文首先提出一种既能避免负序分量注入系统,又能为故障相重新提供充足耦合电气量的改进跳闸策略;其次,分别对瞬时性故障和永久性故障情况下故障相电容耦合电压特性进行分析,根据其存在显著差异,进而提出基于故障相电容耦合电压的故障性质判据;最后,结合改进跳闸策略和合闸策略,提出同杆双回输电线路接地故障分相自适应重合闸策略,仿真验证所提判据能够快速、准确地识别故障性质,以及在不同接地故障类型、故障位置和过渡电阻情况下都能保证输电线路重合成功率。

1 改进跳闸方式

目前,对自适应重合闸策略的研究存在着以下几个问题。

1) 当输电线路自适应重合闸采用综合和准两相跳闸策略时,可能会给系统注入大量负序分量,影响系统的稳定运行。

2) 现有自适应重合闸策略的熄弧判据大部分都集中在二次电弧的恢复电压阶段或者利用输电线路断路器跳闸后的残余能量进行识别。二次电弧的熄灭可分为3个阶段,即二次电弧初始阶段熄灭、二次电弧中间阶段熄灭和二次电弧的自然熄灭。当二次电弧在初始阶段熄灭时,线路残余能量没有释放,此时有利于熄弧判据。但是当二次电弧自然熄灭时,线路中的残余能量也随之释放,此时熄弧判据难以判定故障性质。基于二次电弧阶段的故障性质判据不仅需要电弧模型具有高准确度,还需要对数据采集有着较高要求。

针对上述问题,基于分相重合的方式,本文提出基于准三相思想的改进跳闸策略。通过重合单端分相开关的方式为故障相提供较强的耦合量。单端分相开关的重合方式如表1所示。本文提出的改进跳闸策略流程图如图1所示,本文中 I A II BG 表示同杆双回输电线路中的 I 回线路的 A 相和 II 回线路的 B 相发生跨线接地故障,其余故障表示同理,故不再解释说明。

1) 当输电线路发生接地故障,依据跳闸策略进行跳闸,计时器归零,首先判断是否为人操作,如果是,则闭锁重合闸等待检修人员检修;如果不是,则判断异名健全相数量。

表1 各种接地故障下单端分相开关的重合方式

Table 1 Reclosing method of single-ended split-phase switches under various ground faults

接地故障	跳闸相	重合单端分相开关
I AG	I ABC	I B或I C
I A II BG	I A II BC或I AC II B	I B或I C或II A或II C
I AB II BCG	全部六相	I C或II A

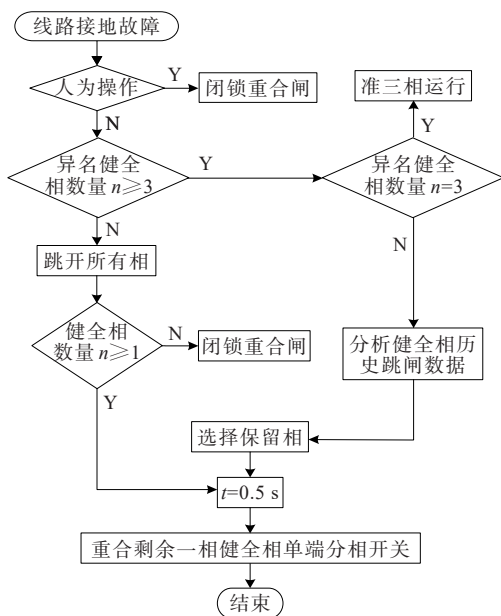


图1 改进跳闸流程图

Figure 1 Improved tripping flow diagram

2) 若异名健全相数量大于等于3,则判断异名健全相数量是否等于3,如果是,则保留准三相运行;如果否,则需要分析健全相历史跳闸数据,选取3个异名相;若异名健全相数量小于3,则跳开输电线路所有相,判断是否有健全相。

3) 若有健全相,则延时0.5 s后重合剩余一相的单端分开关为故障相提供充足的耦合电气量;若没有健全相,则闭锁重合闸等待检修。

为了准确判定保留相,将接地故障健全相进行赋值,保留相赋值如表2所示。

表2 保留相赋值

Table 2 Reserved phase assignment

相名称	基础值	最近一次保留	次近一次保留
I A	1.6	基础值×0	基础值×0.5
I B	1.4	基础值×0	基础值×0.5
I C	1.2	基础值×0	基础值×0.5
II A	1.5	基础值×0	基础值×0.5
II B	1.3	基础值×0	基础值×0.5
II C	1.1	基础值×0	基础值×0.5

依次取保留赋值最大的三相异名健全相,为说明同杆双回输电线路发生接地故障后保留相的判定过程,以发生I A II BG接地故障为例:I C和II B相在最近一次操作中保留过,I B和II A相在次近一次操作中保留过,I A和II C相未保留过。

I A II BG接地故障情况下各健全相的赋值如表3所示。

表3 发生I A II BG接地故障情况下健全相的赋值

Table 3 Assignment in the case of I A II BG ground fault on transmission line

健全相赋值				保留相	跳闸健全相
I B	I C	II A	II C		
0.70	0	0.75	1.60	I B II AC	I C

2 故障特性分析

输电线路的等效模型如图2所示, $\dot{E}_{M\varphi}$ 为M端电源; $\dot{E}_{N\varphi}$ 为N端电源; φ 为A、B、C三相。

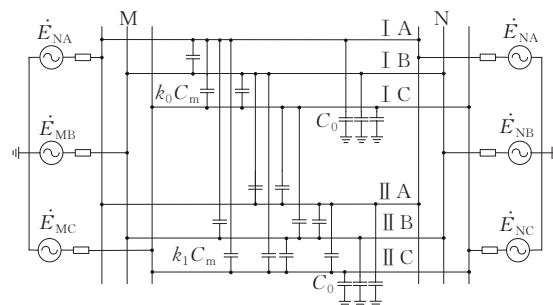


图2 同杆双回输电线路等效模型

Figure 2 Equivalent model of double-circuit transmission lines

由于同杆双回线回间距离比相间距离较大,近似认为每回相间电容为 $k_0 C_m$,线间电容为 $k_1 C_m$ 。图3为相间电容拓扑结构。

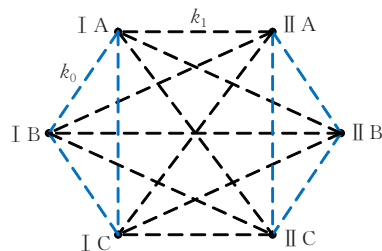


图3 同杆双回输电线路相间电容拓扑结构示意图

Figure 3 Schematic diagram of the inter-phase capacitance topology of double-circuit transmission lines

当线路发生接地故障时,首先根据改进跳闸策略进行跳闸,故障相对地电容的储存电压快速衰

减,至故障消失时电压基本降为零^[7],待绝缘完全恢复后,合闸非故障相的单端分相开关,通过相间电容与故障相的对地电容形成回路,为故障性质的判定提供充足的电容耦合电压量。由于只合闸非故障相单端分相开关,故不会形成电流回路,也不会给系统注入负序分量。以输电线路发生单一单不同名 I B II CG 和双一双同名 I AC II BCG 接地故障为例,分析瞬时性故障和永久性故障情况下的故障特性。

首先,分析准三相运行对故障相耦合的影响,当 I B II CG 发生跨线接地故障后,根据跳闸策略跳开 I AB II C,剩余健全相 I C II AB 保持准三相运行。准三相运行为故障相提供耦合源,并与相间电容、故障相对地电容以及大地形成通路。线路阻抗相对于相间容抗和对地容抗很小,故忽略线路阻抗;电磁耦合电压相对电容耦合电压很小,故忽略电磁耦合电压。稳态时准三相运行对故障相电容耦合电压等效电路如图4所示。

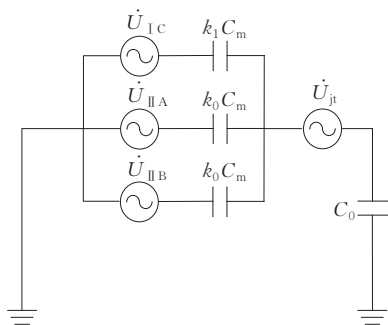


图4 准三相运行对故障相耦合等效电路

Figure 4 Quasi-three-phase operation for fault-phase coupled equivalent circuit

故障相电容耦合电压为

$$\dot{U}_{\varphi t} = \frac{k_1 C_m \dot{U}_{IC} + k_0 C_m (\dot{U}_{IIA} + \dot{U}_{IIB})}{C_0} = \frac{k_1 C_m \dot{U}_{IC} - k_0 C_m \dot{U}_{IIC}}{C_0} = \frac{C_m (k_1 - k_0)}{C_0} U \angle 120^\circ \quad (1)$$

式中, $\dot{U}_{\varphi t}$ 为故障相测量电压; \dot{U}_{IIB} 、 \dot{U}_{IIA} 、 \dot{U}_{IC} 为准三相耦合电压源; \dot{U}_{IIC} 为 \dot{U}_{IIB} 和 \dot{U}_{IIA} 的等效耦合电压源; U 为相电压有效值; C_m 为相间电容; C_0 为对地电容; 取 $k_0=1$, $k_1=0.8$, 相间电容和对地电容通常在 $10^{-8} \sim 10^{-7}$ F 数量级范围内, 且对地电容大于相间电容^[7], 因此准三相运行时对故障相影响较小, 并且通过改进跳闸策略跳闸后, 故障相二次电弧能够快速熄灭。

2.1 瞬时性故障时特性分析

当输电线路发生 I B II CG 瞬时性接地故障时,

跳开 I AB II C 相, I C II AB 相保持准三相运行, 借助合闸 I A 相单侧开关的方式为故障相提供较强的耦合源。单一单不同名瞬时性接地故障等效电路如图5所示。

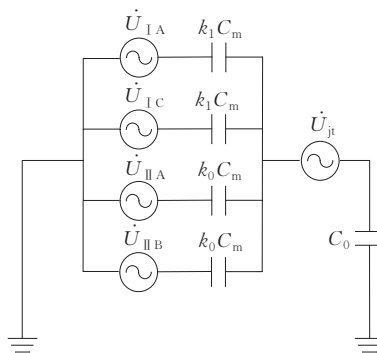


图5 单一单不同名瞬时性接地故障等效电路

Figure 5 Single-single non-homonymous transient ground fault equivalent circuit

故障相电容耦合电压为

$$\begin{aligned} \dot{U}_{\varphi t} &= \frac{k_1 C_m (\dot{U}_{IA} + \dot{U}_{IC}) + k_0 C_m (\dot{U}_{IIA} + \dot{U}_{IIB})}{C_0} = \\ &= -k_0 \frac{C_m}{C_0} \dot{U}_{IIC} - k_1 \frac{C_m}{C_0} \dot{U}_{IB} = \\ &= -k_0 \frac{C_m}{C_0} U \angle 120^\circ - k_1 \frac{C_m}{C_0} U \angle -120^\circ = \\ &= \frac{C_m U}{2C_0} (k_1 + k_0) - j \frac{\sqrt{3} C_m U}{2C_0} (k_0 - k_1) \end{aligned} \quad (2)$$

式中, \dot{U}_{IB} 为 \dot{U}_{IA} 和 \dot{U}_{IC} 的等效耦合电压源; \dot{U}_{IA} 为重合单侧开关的耦合电压源。

当输电线路发生 I AC II BCG 瞬时性接地故障时, 跳开输电线路所有相, 借助合闸 I B 相的单侧开关的方式为故障相提供较强的耦合, 进行故障性质的判定。双一双同名瞬时性接地故障等效电路如图6所示。

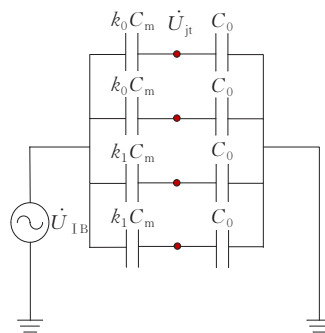


图6 双一双同名瞬时性接地故障等效电路

Figure 6 Double-double homonymous transient ground fault equivalent circuit

故障相 I A 和 I C 的电容耦合电压为

$$\dot{U}_{I\varphi t} = \frac{k_0 C_m}{C_0 + k_0 C_m} \dot{U}_{IB} \quad (3)$$

故障相 II B 和 II C 的电容耦合电压为

$$\dot{U}_{II\varphi t} = \frac{k_1 C_m}{C_0 + k_1 C_m} \dot{U}_{IB} \quad (4)$$

瞬时性接地故障时,等效电路中等值阻抗对应线路全长的相间电容和对地电容的容抗,故障相测量电压为耦合源在对地电容上的压降,因此瞬时性故障时,故障相电容耦合电压幅值较大。

2.2 永久性故障时特性分析

当输电线路发生 I B II C G 永久性接地故障时,跳开 I AB II C 相, I C II AB 相保持准三相运行,借助合闸 I A 相的单侧开关的方式为故障相提供较强的耦合,进行故障性质的判定。

通过合闸非故障相的单端分相开关和健全相的准三相运行来提供耦合源,与相间电容、故障相的对地电容以及大地形成通路,稳态时等效电路如图 7 所示。

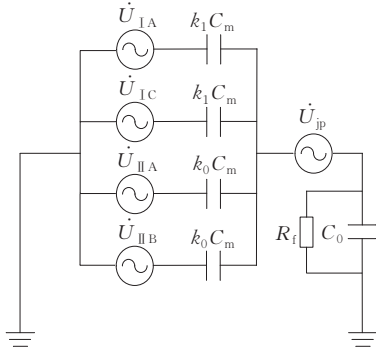


图 7 单一单不同名永久性接地故障等效电路

Figure 7 Single-single non-homonymous permanent ground fault equivalent circuit

故障相电容耦合电压为

$$\begin{aligned} \dot{U}_{\varphi p} &= \frac{j\omega C_m [k_1(\dot{U}_{IA} + \dot{U}_{IC}) + k_0(\dot{U}_{IIA} + \dot{U}_{IIB})]}{j\omega C_0 + 1/R_f} = \\ &= \frac{j\omega C_m (k_0 U \angle 120^\circ + k_1 U \angle -120^\circ)}{j\omega C_0 + 1/R_f} = \\ &= \frac{\omega C_m U [j(k_0 + k_1) + \sqrt{3}(k_0 - k_1)]}{2(j\omega C_0 + 1/R_f)} \end{aligned} \quad (5)$$

当输电线路发生 I AC II BCG 永久性接地故障时,跳开输电线路所有相,借助合闸 I B 相的单侧开关的方式为故障相提供较强的耦合,进行故障性质的判定,双—双同名永久性接地故障等效电路如图 8 所示。

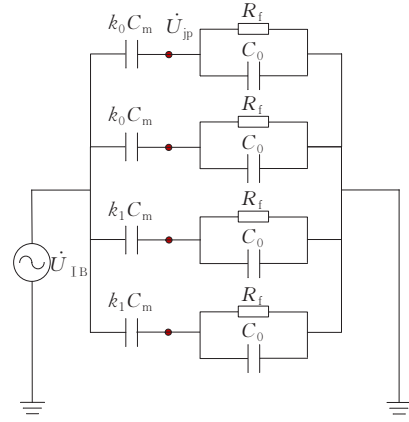


图 8 双—双同名永久性接地故障等效电路

Figure 8 Double-double homonymous permanent ground fault equivalent circuit

故障相 I A 和 I C 的电容耦合电压为

$$\dot{U}_{I\varphi p} = \frac{j\omega k_0 C_m}{j\omega(k_0 C_m + C_0) + 1/R_f} \dot{U}_{IB} \quad (6)$$

故障相 II B 和 II C 的电容耦合电压为

$$\dot{U}_{II\varphi p} = \frac{j\omega k_1 C_m}{j\omega(k_1 C_m + C_0) + 1/R_f} \dot{U}_{IB} \quad (7)$$

由于过渡电阻阻抗远小于对地电容的容抗,可近似地认为过渡电阻短路对地电容,耦合源的电压几乎全部集中在相间电容上,故障相测量到的电压很小,因此永久性故障时故障相电容耦合电压幅值减小至约等于零。

其他类型接地故障分析过程同理,本文不再赘述。

3 故障性质判据

通过对线路接地故障瞬时性故障和永久性故障的故障相电容耦合电压特性的分析可以看出,发生瞬时性接地故障时,对地电容的容抗值相对较大,故障相的压降也相对较大;而发生永久性接地故障时,由于过渡电阻的阻值要远小于对地电容的容抗值,故电容耦合电压几乎全部集中在相间电容上,使得故障相电容耦合电压非常小。故根据输电线路发生接地故障时,故障消失前后故障相基波电压幅值差异显著这一特征制定故障性质判据。同杆双回输电线路接地故障的故障性质判据可表述为

$$U_\varphi > KU_{set} \quad (8)$$

$$U_{set} = U_{\varphi t, \min} + U_{\varphi p, \max} \quad (9)$$

式(8)、(9)中, U_φ 为接地故障时故障相电压; U_{set} 为接地故障的整定电压的门槛值; $U_{\varphi t, \min}$ 为瞬时性接地故障时故障相电压的最小有效值,当重合单端分

相开关的一相与故障相不在同一回线时故障相电压的有效值最小; $U_{op,max}$ 为永久性接地故障时故障相电压最大有效值,当重合单端分相开关的一相与故障相在同一回线且故障为非金属接地时,故障相电压有效值最大; K 为裕度系数,取0.5,其既保证了判据的可靠性,又确保在永久性接地故障时不会误判^[30]。若式(8)在0.03 s内连续成立^[14],则判定输电线路接地故障已消失,否则认为接地故障未消失。

针对传统熄弧判据容易造成误判,以及传统跳闸策略会产生负序分量的问题,提出基于故障相电容耦合电压的故障性质判据,进而提出适用于同杆双线路接地故障分相自适应重合闸策略,流程图如图9所示。

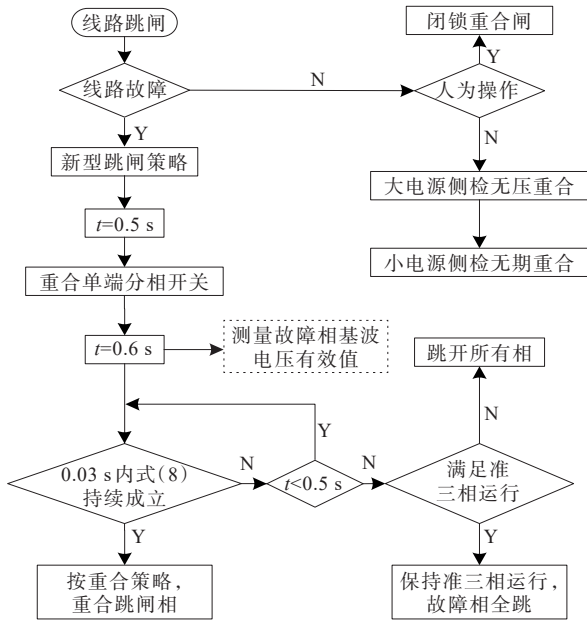


图9 同杆双回输电线路接地故障自适应重合闸策略流程

Figure 9 Flow chart of adaptive autoreclosing strategy for ground fault of double-circuit transmission lines

1) 当线路跳闸后,首先判定线路是否发生故障,如果线路没有发生故障,则需要判断是否为人为操作,如果是,则需要闭锁重合闸;如果不是,则大电源侧需要检无压重合,小电源侧需要检同期重合。

2) 当输电线路发生接地故障时,依据跳闸策略跳闸,与此同时开始计时。延时0.5 s后^[31],借助合闸非故障相单侧开关的方式为故障相提供电容耦合电压,考虑故障相电容耦合电压上升时间,延时0.1 s后测量故障相基波电压有效值。

3) 若故障相电容耦合电压在0.03 s内满足故障性质判据式(8),则表明故障已消失,输电线路可

合闸;若在最大重合时间1.5 s内^[14],故障相电容耦合电压不满足故障性质判据式(8),则表明故障未消失,故障相不能合闸。

4) 考虑合闸过电压,检同期后先合闸大电源一侧断路器,再重合小电源侧断路器。

4 仿真结果与分析

本文以新疆库尔勒地区某220 kV同杆双回输电线路为例进行仿真验证,线路总长度为131 km,以输电线路发生单一不同名I A II BG接地故障为例,其同杆双回输电线路地理接线图如图10所示。单位长度输电线路参数如表4所示。基于PSACD/EMTDC平台搭建模型,验证其正确性。

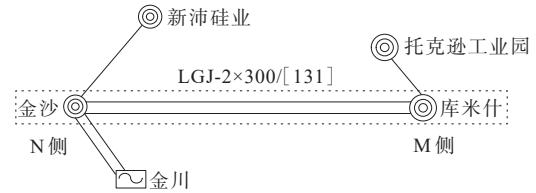


图10 仿真算例地理结构

Figure 10 Geographical structure of the simulation example

表4 单位长度同杆双回输电线路参数

Table 4 Unit length parameters of double-circuit transmission lines

正序电阻/ ($\Omega \cdot \text{km}^{-1}$)	正序电抗/ ($\Omega \cdot \text{km}^{-1}$)	正序容抗/ ($\text{M}\Omega \cdot \text{km}$)	零序电阻/ ($\Omega \cdot \text{km}^{-1}$)	零序容抗/ ($\text{M}\Omega \cdot \text{km}$)	正序电阻/ ($\Omega \cdot \text{km}^{-1}$)
0.107	0.418	0.273	0.321	0.414	0.107

当输电线路发生单一不同名I A II BG接地故障时,基于改进跳闸策略,跳开I A II BC相,I BC II A相保持准三相运行。由图11可以看出,当故障相断路器跳开后,故障相I A II B的电容耦合电压谐波量迅速衰减即二次电弧快速熄灭,并且故障相电容耦合电压幅值很小,和理论分析一致。

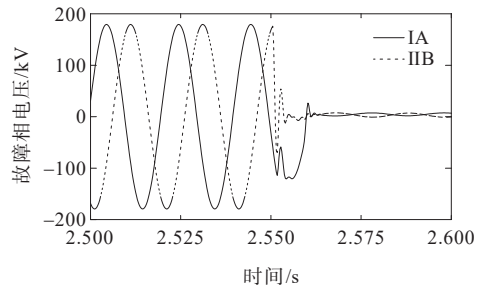


图11 准三相运行时故障相电压

Figure 11 Fault phase voltage during quasi-three-phase operation

4.1 故障性质判据仿真

假设同杆双回输电线路发生接地故障时间为2.5 s;过渡电阻分别为0、100 Ω ;故障位置分别为线路首端、线路中点和线路末端;故障相和相应健全相跳闸初始时间为2.55 s。

基于上述故障特性分析,根据表2和式(2)~(4)求得同杆双回线路发生瞬时性接地故障时,故障相电压的最小有效值为15.43 kV;根据式(5)~(7)求得同杆双回线路发生永久性接地故障时,故障相电压的最大有效值为0.69 kV;根据式(8)求得故障性质判据整定门槛值为8.06 kV。过渡电阻为0 Ω 的故障相电容耦合电压的仿真波形如图12、13所示,过渡电阻为100 Ω 的仿真波形如图14、15所示。

1) 发生单一不同名 I A II BG 接地故障时,借助合闸非故障相 II C 中端分相开关的方式判别故障性质。如果为瞬时性故障,则故障相基波电压有效值迅速超过整定值;如果为永久性故障,则故障相基波电压有效值很小,远小于整定值,无论故障发生在线路什么位置(首端、中点或末端),以及过渡电阻为何值,所提故障性质都能准确判别,仿真结果与理论分析一致。

2) 仿真验证了本文所提判据能够快速、准确地识别故障性质,以及在不同接地故障类型、故障位置和过渡电阻情况下都能保证同杆双回输电线路的重合成功率。

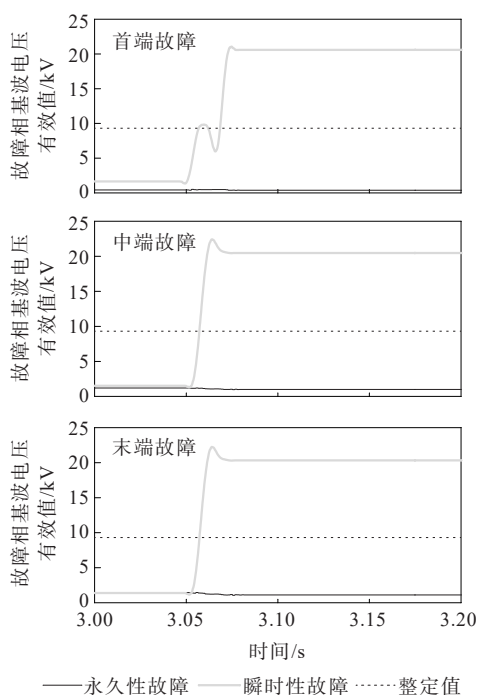


图12 过渡电阻为0 Ω , I A II BG 中 I A 相基波电压有效值

Figure 12 The RMS value of the IA phase fundamental voltage in the IAIIBG when transition resistance is 0 Ω

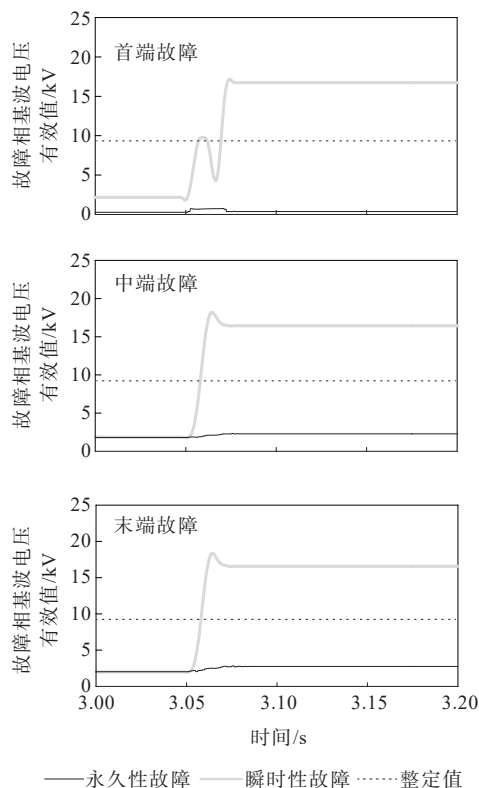


图13 过渡电阻为0 Ω , I A II BG 中 I B 相基波电压有效值

Figure 13 The RMS value of the IB phase fundamental voltage in the IAIIBG when transition resistance is 0 Ω

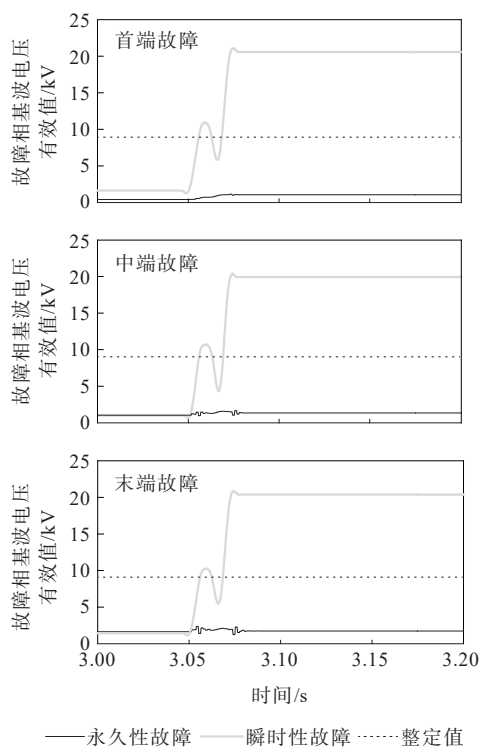


图14 过渡电阻为100 Ω , I A II BG 中 I A 相基波电压有效值

Figure 14 The RMS value of the IA phase fundamental voltage in the IAIIBG when transition resistance is 100 Ω

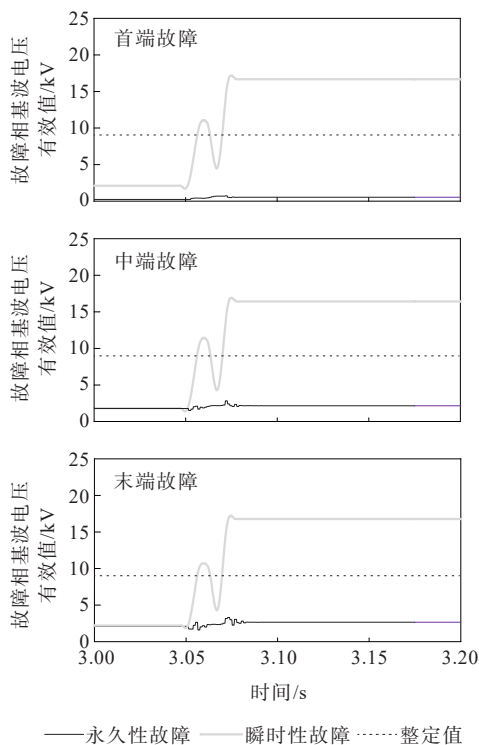


图15 过渡电阻为 $100\ \Omega$, I A II BG 中 I B 相基波电压有效值

Figure 15 The RMS value of the IB phase fundamental voltage in the IAII BG when transition resistance is $100\ \Omega$

4.2 自适应重合闸策略仿真

当同杆双回输电线路在 2.5 s 时刻发生单一不同名 I A II BG 接地故障时,跳开 I A II BC 相, I BC II A 相保持准三相运行, $t=3.05\text{ s}$ 时借助合闸 II C 相 N 端开关的方式为故障提供较强的电容耦合电压, $t=3.15\text{ s}$ 时判别故障性质,如果故障已消失, $t=3.2\text{ s}$ 时 N 侧 I A II B 相检无压重合, $t=3.25\text{ s}$ 时 M 侧 I A II BC 相检同期重合;如果故障未消失,则需要闭锁重合闸。故障消失后合闸跳开相电压与电流的波形如图 16 所示,由图 16 可以得出以下几点。

1) 由仿真波形可以看出合闸跳开相电压能够快速恢复,表明所提分相自适应重合闸准确可靠。

2) 准三相运行时三相对称,故准三相运行对跳开相电磁耦合电流很小,可忽略不计;由于重合非故障相单端分相开关时线路处于断开状态,因此对跳开相也没有电磁耦合电流。综上,当相应跳闸相跳闸后相电流几乎接近零。分析结果与跳开相相电流仿真结果相对应。

3) 仿真验证了本文所提改进跳闸与分相自适应重合闸策略能够保证同杆双回输电线路重合的成功率,以及输电线路尽快恢复供电。

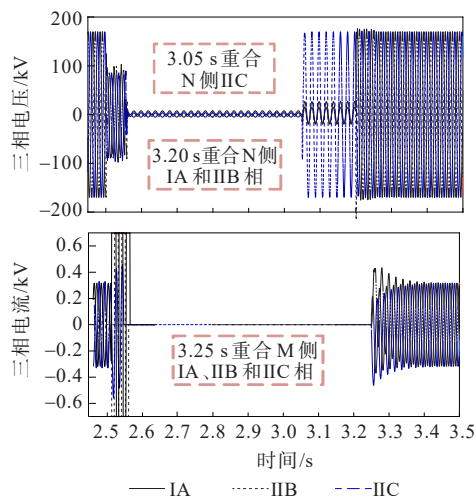


图16 瞬时性故障后合闸跳开相电压与电流波形

Figure 16 Closing and tripping phase voltage and current waveforms after transient fault

5 结语

针对输电线路采用传统跳闸策略会给系统注入负序分量,以及传统熄弧判据可能造成误判或者漏判的问题,本文提出了改进跳闸与分相自适应重合闸策略,总结如下。

1) 基于准三相思路,提出了一种能避免负序分量注入系统,加速二次电弧的熄灭,又能为故障相提供足够耦合量的改进跳闸策略,为故障性质判据奠定了基础。

2) 基于分相跳闸策略,分别对不同故障性质情况下故障相电容耦合电压特性进行分析,根据其存在显著差异,提出了基于故障相电容耦合电压的故障性质判据;结合改进跳闸策略和合闸策略,提出了同杆双回输电线路接地故障分相自适应重合闸策略。仿真验证了本文所提判据能够快速、准确地识别故障性质,以及在不同接地故障类型、故障位置和过渡电阻情况下都能保证输电线路重合成功率。

3) 本文所提接地故障分相自适应重合闸策略仅依靠仿真进行了验证,后续需要通过动模实验验证其工程应用的可靠性。限于篇幅,本文只研究了接地故障,没有考虑不接地故障。

参考文献:

- [1] 王帅,熊凌飞,郭庆雷,等.渝鄂背靠背柔性直流工程交流侧单相重合闸问题分析[J].电力系统保护与控制,2020,48(10):174-181.
WANG Shuai,XIONG Lingfei,GUO Qinglei,et al.Analysis of AC side single-phase reclosing problem of Chongqing-Hubei back to back MMC-HVDC project[J]. Power System Protection and Control,2020,48(10):174-181.

- [2] 梁振锋,索南加乐,宋国兵,等.输电线路自适应重合闸研究综述[J].电力系统保护与控制,2013,41(6):140-147. LIANG Zhenfeng, SUONAN Jiale, SONG Guobing, et al. Research review of adaptive reclosure in transmission lines[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(6):140-147.
- [3] NING J X, HE B N, WANG Z Z, et al. Algorithm for adaptive single-phase reclosure on shunt-reactor compensated extra high voltage transmission lines considering beat frequency oscillation[J]. IET Generation, Transmission & Distribution, 2018, 12(13):3193-3200.
- [4] 王毅,陈晓红,彭峰,等.基于故障行波方向的电缆-架空线混合线路自适应重合闸控制研究[J].电力科学与技术学报,2013,28(3):96-101. WANG Yi, CHEN Xiaohong, PENG Feng, et al. A study of self-adaptive reclosure control method for cable-overhead mixed lines based on traveling wave direction [J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2013, 28(3):96-101.
- [5] 章宝歌,焦越敏,平善言,等.具有重合闸功能的限流型混合式高压直流断路器[J].电力建设,2022,43(10):37-47. ZHANG Baoge, JIAO Yuemin, PING Shanyan, et al. Current-limiting hybrid high voltage DC circuit breaker with reclosing function[J]. Electric Power Construction, 2022, 43(10):37-47.
- [6] 王鸿,牛博,杨鼎革,等.具有转移电容电压调整功能的重合闸机械式直流断路器[J].高压电器,2022,58(12):9-13+20. WANG Hong, NIU Bo, YANG Dingge, et al. Reclosing mechanical DC circuit breaker with transfer capacitive voltage adjustment capability[J]. High Voltage Apparatus, 2022, 58(12):9-13+20.
- [7] 罗勋华,黄纯,戴永梁,等.输电线路瞬时性故障的恢复电压直流偏移特性研究[J].电力自动化设备,2015,35(1):107-111. LUO Xunhua, HUANG Chun, DAI Yongliang, et al. DC offset characteristics of recovery voltage for transient transmission line fault[J]. Electric Power Automation Equipment, 2015, 35(1):107-111.
- [8] 宋劲扬,黄潇恺,李舒适,等.一种改进型闭锁重合闸信号跨双网配合方式及其风险分析[J].电力科学与技术学报,2022,37(6):173-180. SONG Jinyang, HUANG Xiaokai, LI Shushi, et al. An improved cross double network locking reclosing signal coordination mode and its risk analysis[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2022, 37(6):173-180.
- [9] 杨柳林,李宇.基于改进的两支路ResNet的配电网接地故障辨识和选线[J].电测与仪表,2022,59(10):100-107. YANG Liulin, LI Yu. Grounding fault identification and line selection of distribution network based on improved two-branch ResNet[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2022, 59(10):100-107.
- [10] 邵能灵,冯希科.分布式电源对配电网自动重合闸的影响研究[J].电力科学与技术学报,2010,25(1):21-26. TAI Nengling, FENG Xike. Distributed generation impact to distribution network's auto-reclosing[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2010, 25(1):21-26.
- [11] 刘对,李晓华,蔡泽祥,等.换相电压负序分量对LCC-HVDC输电系统换相的影响分析及其抑制策略[J].电力自动化设备,2022,42(3):45-52. LIU Dui, LI Xiaohua, CAI Zexiang, et al. Influence analysis of negative sequence components of commutation voltage on commutation of LCC-HVDC transmission system and its suppression strategy[J]. Electric Power Automation Equipment, 2022, 42(3):45-52.
- [12] 曾亮,李永丽,张云柯,等.逆变侧交流系统不对称故障引发HVDC系统连续换相失败的机理及抑制策略研究[J].中国电机工程学报,2019,39(11):3159-3168. ZENG Liang, LI Yongli, ZHANG Yunke, et al. Research on mechanism and control strategy of continuous commutation failures in HVDC system caused by asymmetrical fault in inverter-side AC system[J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39(11):3159-3168.
- [13] 邹耀,陈卫,李世龙,等.同杆双回线准三相运行与跳合闸策略[J].电力系统自动化,2015,39(15):137-142. ZOU Yao, CHEN Wei, LI Shilong, et al. Quasi-three-phase operation and tripping and reclosing strategy of double-circuit transmission lines on the same tower[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(15):137-142.
- [14] 周伟绩,李凤婷,解超.带并联电抗器同杆双回输电线路跨线接地故障自适应重合闸策略[J].电力系统保护与控制,2022,50(1):33-41. ZHOU Weiji, LI Fengting, XIE Chao. Adaptive autoreclosing scheme for line-to-line grounded faults on double-circuit transmission lines with shunt reactors[J]. Power System Protection and Control, 2022, 50(1):33-41.
- [15] 周星伯,韩民晓,王志春,等.牵引负荷接入产生的负序分量对近端发电机影响的评估[J].电网技术,2013,37(12):3497-3502. ZHOU Xingbo, HAN Minxiao, WANG Zhichun, et al. Assessment on impact of negative-sequence component on nearby generators due to grid-connected traction load of electrified railway[J]. Power System Technology, 2013, 37(12):3497-3502.
- [16] 汤奕,郑晨一.高压直流输电系统换相失败影响因素研究综述[J].中国电机工程学报,2019,39(2):499-513+647. TANG Yi, ZHENG Chenyi. Review on influencing factors of commutation failure in HVDC systems[J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39(2):499-513+647.
- [17] 王婷,宋国兵,张晨浩,等.风电场110 kV单回送出线主动探测式三相重合闸方法[J].电力系统自动化,2019,43(19):149-155. WANG Ting, SONG Guobing, ZHANG Chenhao, et al.

- Active detection based three-phase auto-reclosing method for 110 kV single outgoing line in wind farm[J]. Automation of Electric Power Systems, 2019, 43(19): 149-155.
- [18] 黄越,李凤婷,易鹏,等.应用附加电容的柔性直流输电线路自适应重合闸策略[J].电力系统保护与控制,2019,47(23):30-36.
- HUANG Yue, LI Fengting, YI Peng, et al. Adaptive reclosure scheme of MMC-HVDC transmission lines using additional capacitors[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(23): 30-36.
- [19] 黄飞,李凤婷,解超,等.基于电容电压的并补输电线路自适应三相重合闸策略[J].电力自动化设备,2020,40(6):170-176+197.
- HUANG Fei, LI Fengting, XIE Chao, et al. Adaptive three-phase auto-reclosing strategy based on capacitor voltage for power transmission lines with shunt reactors[J]. Electric Power Automation Equipment, 2020, 40(6): 170-176+197.
- [20] 李浩,宋国兵,樊艳芳,等.利用分相开关探测的配电网永久性故障识别方法[J].电力系统保护与控制,2023,51(5):11-21.
- LI Hao, SONG Guobing, FAN Yanfang, et al. Permanent fault identification method of a distribution network based on detection using a phase segregated switch[J]. Power System Protection and Control, 2023, 51(5): 11-21.
- [21] 李育强,宋国兵,王维庆,等.基于参数识别光伏接入配电网永久性故障判别方法[J].电力系统保护与控制,2017,45(16):1-7.
- LI Yuqiang, SONG Guobing, WANG Weiqing, et al. Permanent fault identification method based on parameter identification for photovoltaic access to distribution network[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(16): 1-7.
- [22] 梁振锋,索南加乐,宋国兵,等.基于模量电容参数识别的永久性故障判别方法[J].高电压技术,2011,37(4):916-922.
- LIANG Zhenfeng, SUONAN Jiale, SONG Guobing, et al. Permanent faults identification method for three-phase autoreclosing based on capacitance parameter[J]. High Voltage Engineering, 2011, 37(4): 916-922.
- [23] 李博通,赵盛,李斌,等.基于电弧电流边带谱能量比的输电线路永久性故障识别方法[J].电力系统及其自动化学报,2018,30(10):61-67.
- LI Botong, ZHAO Sheng, LI Bin, et al. Permanent fault identification method for transmission line based on marginal spectral energy ratio of arc current[J]. Proceedings of the CSU-EPSCA, 2018, 30(10): 61-67.
- [24] 潘志敏,刘琨,梁勇超,等.基于峭度值的超高压输电线路单相故障性质识别[J].电力系统及其自动化学报, 2017, 29(4): 104-109.
- PAN Zhimin, LIU Kun, LIANG Yongchao, et al. Kurtosis values based recognition of single-phase fault property for extra high voltage transmission lines[J]. Proceedings of the CSU-EPSCA, 2017, 29(4): 104-109.
- [25] 苏超,杨强.基于多视图稀疏特征选择的架空输电线路故障原因判别[J].智慧电力,2023,51(3):96-103.
- SU Chao, YANG Qiang. Fault cause identification of overhead transmission line based on multi-view sparse feature selection[J]. Smart Power, 2023, 51(3): 96-103.
- [26] 巩泉役,彭克,陈羽,等.基于电弧随机性和卷积网络的交流串联电弧故障识别方法[J].电力系统自动化,2022,46(24):162-169.
- GONG Quanyi, PENG Ke, CHEN Yu, et al. Identification method of AC series arc fault based on randomness of arc and convolutional network[J]. Automation of Electric Power Systems, 2022, 46(24): 162-169.
- [27] 邵文权,刘朋跃,王斌,等.基于等值阻抗相位特征的带并补电抗线路单相自适应重合闸故障识别方法[J].电网技术,2020,44(5):1796-1805.
- SHAO Wenquan, LIU Pengyue, WANG Bin, et al. Single-phase adaptive reclosure fault identification for transmission lines with shunt reactors based on equivalent impedance phase property[J]. Power System Technology, 2020, 44(5): 1796-1805.
- [28] 王鑫,陈海东,蒙飞,等.电压相位特征的线路单相重合闸故障识别判据[J].电网与清洁能源,2023,39(3):56-62.
- WANG Xin, CHEN Haidong, MENG Fei, et al. Single-phase reclosure fault identification for transmission lines based on terminal voltage phase characteristics[J]. Power System and Clean Energy, 2023, 39(3): 56-62.
- [29] 宋金钊,李永丽,张云柯,等.逆变侧交流线路单相自适应重合闸的适用性分析与改进策略[J].高电压技术,2022,48(3):1001-1010.
- SONG Jinzhao, LI Yongli, ZHANG Yunke, et al. Applicability analysis and improved strategy of adaptive single-phase reclosure for AC lines on inverter side[J]. High Voltage Engineering, 2022, 48(3): 1001-1010.
- [30] 李浩,解超,周伟绩,等.采用分相重合方式的风电送出线路自适应重合闸策略[J].电力建设,2023,44(5):94-107.
- LI Hao, XIE Chao, ZHOU Weiji, et al. Adaptive reclosing scheme for wind power outgoing line using partial-phase reclosing[J]. Electric Power Construction, 2023, 44(5): 94-107.
- [31] 刘培,杨军,陶丁涛.一种输电线路瞬时故障最佳重合闸时刻实用计算方法[J].电网技术,2013,37(3):635-640.
- LIU Pei, YANG Jun, TAO Dingtao. Practical online calculation of optimal reclosing time for transmission line under transient fault[J]. Power System Technology, 2013, 37(3): 635-640.