

DOI:10.12158/j.2096-3203.2020.04.018

## 双回线 GIL 感应电流快速释放装置控制策略研究

王玉龙<sup>1,2</sup>, 徐渊<sup>3</sup>, 赵青春<sup>1,2</sup>, 谈浩<sup>1,2</sup>, 徐海洋<sup>1,2</sup>, 张宇驰<sup>1,2</sup>

(1. 南京南瑞继保电气有限公司, 江苏 南京 211102; 2. 南京南瑞继保工程技术有限公司, 江苏 南京 211102; 3. 国网江西省电力有限公司调控中心, 江西 南昌 330006)

**摘要:** 双回线气体绝缘输电线路(GIL)管廊段内部接地故障时故障点持续的感应电流可能导致管廊击穿。文中分析了双回线 GIL 管廊段内部产生感应电流、电压的机理和危害, 结合双回线 GIL 管廊安装大差和小差的保护配置特征, 提出通过判别 GIL 管廊段小差的动作行为、线路两侧运行状态和释放装置位置, 实现 GIL 管廊段内部故障断路器切除后经延时感应电流快速释放装置自动合闸的控制策略, 避免人工操作合闸。针对释放装置合闸不成功情况, 采集故障线路大差保护的选相动作结果判别出故障相合闸失灵情况, 提出合闸失灵告警策略和故障相合闸失灵联跳正常运行线的合闸失灵动作策略。根据所提合闸控制策略和合闸失灵策略开发自动控制装置并进行实时数字仿真(RTDS)试验, 试验结果表明在不同工况下该控制系统均能可靠动作, 从而尽可能地降低感应电流导致 GIL 管廊击穿的风险。

**关键词:** 气体绝缘输电线路(GIL); 感应电流; 释放装置; 合闸控制; 失灵

**中图分类号:** TM76

**文献标志码:** A

**文章编号:** 2096-3203(2020)04-0127-07

### 0 引言

现有一些输电线路建设中通过封闭气体绝缘输电线路(gas-insulated transmission line, GIL)管廊方式过江或过海提高输电的可靠性和安全性, GIL 管廊两端外仍采用架空线路<sup>[1]</sup>。为了合理利用空间和成本, 一般采用双回线或多回线进行输电, 但双回或多回输电线路间存在强烈的电磁耦合作用。

根据国内外 GIL 管廊工程试验发现, GIL 管廊在故障大电流下 200 ms 左右会击穿。因此, 双回 GIL 管廊段额外配置小差保护, 线路两端配置大差保护, 当 GIL 管廊段发生单相接地故障时, 线路小差保护三相跳闸并闭锁重合闸, 避免重合时 GIL 管廊遭受大电流冲击。故障线路两侧断路器三相跳开后, 由于输电线的另外一回或多回线正常运行时传输功率大, 其电容和电感的耦合作用会在故障线路中产生一定的感应电压使得故障点存在持续的感应电流。对于受大电流大热量破坏的 GIL 而言, 在感应电流的长时间作用下更容易造成击穿, 导致封闭 GIL 管廊内有毒气体泄漏, 给人员安全和故障检修带来严重影响。

为了降低感应电流的影响, 须采取一定措施抑制感应电流, 文献[2]针对特高压 GIL 提出了应用安装于 GIL 管廊首末端的接地开关, 即超 B 类感应

电流快速释放装置, 研究了释放装置的开合特性及过程, 但未研究该装置的自动合闸及失灵情况。文献[2—9]分析了超特高压输电线路感应电流、感应电压的产生机制和影响因素, 分析了检修回路中产生感应电压和感应电流对工作人员安全的危害, 强调了泄流的必要性, 但均未涉及自动控制策略。

针对感应电流释放控制问题, 一般解决方法是结合故障点位置, 人工通过远方主站或就地机构来手动控制感应电流释放装置的合闸<sup>[10—11]</sup>, 而不能自动结合线路的实际情况完成合闸控制。该方法会影响工作时效, 难以保证 GIL 管廊的安全, 同时增加现场工作环节和人为误操作可能性等。

为有效解决感应电流快速释放装置在故障断路器切除后的自动控制合闸问题, 文中分析了正常运行线对故障线产生感应电流的机理, 提出自动合闸策略以及合闸失灵的告警及联跳策略。该策略可有效地根据 GIL 管廊故障后的线路情况实现自动控制感应电流释放装置快速合闸, 以提高管廊的安全性和现场检修运维效率。实时数字仿真(real-time digital simulation, RTDS)验证了所提方案的正确性和可行性, 相关成果已在国内 GIL 管廊工程成功应用。

### 1 感应电量的机理

#### 1.1 GIL 释放装置工作方式

长距离超特高压输电线路经过特殊地段时, GIL 管廊是其重要组成部分。GIL 管廊首末端分别

收稿日期:2020-03-07; 修回日期:2020-04-13

基金项目: 国家电网有限公司总部科技项目(510020191902-0A)

连接同塔双回架空输电线至两侧变电站。感应电流快速释放装置安装在 GIL 管廊两端,如图 1 所示。

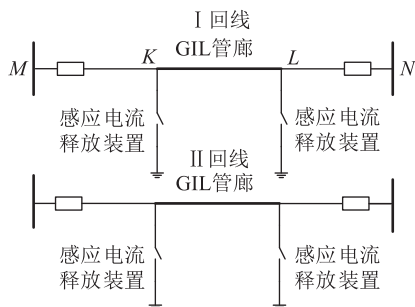


图 1 双回线 GIL 管廊示意

Fig.1 Double return line GIL pipe gallery

由于超特高压架空输电线路的特点,相间耦合作用尤为强烈,当 GIL 管廊发生单线接地故障跳闸后,产生的感应电流数值较大、潜供电弧不易熄灭,需要通过感应电流释放装置快速关合来有效抑制潜供电弧,因此需要研究感应电流的形成机理。

## 1.2 感应电流计算分析

### 1.2.1 静电感应电流

静电感应电流是当停运回路线路一端开路,另一回路运行,停运回路另一端感应电流快速释放装置开合时,开合允许的容性电流,此时感性分量较小。I 回线 N 端开路, M 端三相释放装置闭合,以 I 回路 A 相为例, II 回线路对其产生静电感应作用的示意如图 2 所示。

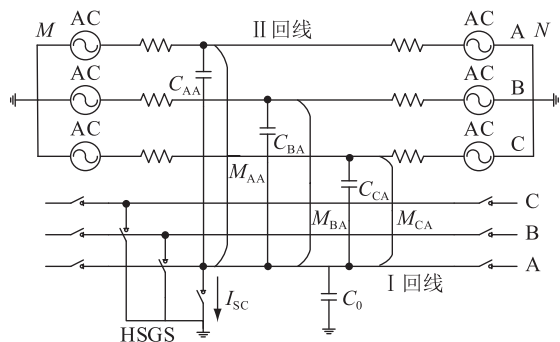


图 2 以 A 相为例静电感应分布

Fig.2 Electrostatic induction distribution map using phase A as an example

图 2 中, I 回线停运, II 回线路正常工作时,  $\dot{U}_A, \dot{U}_B, \dot{U}_C$  分别为 II 回路的三相电压相量;  $\dot{I}_A, \dot{I}_B, \dot{I}_C$  分别为 II 回路的三相电流相量;  $C_{AA}, C_{BA}, C_{CA}$  分别为 II 回线各相与 I 回线 A 相的单位长度线路的相间电容;  $C_0$  为线路单位长度的对地电容;  $M_{AA}, M_{BA}, M_{CA}$  分别为 II 回线各相与 I 回线 A 相的单位长度线路的互电感; HSGS 为感应电流快速释放装置;  $l$  为线路长度。

I 回线 A 相的释放装置流过的静电感应电流  $I_{sc}$  的大小根据文献[11—17]可表达为:

$$I_{sc} \approx |j\omega l(C_{AA}\dot{U}_A + C_{BA}\dot{U}_B + C_{CA}\dot{U}_C)| \quad (1)$$

管廊发生故障时的静电感应电流同式(1)。相感应电势  $E_m$  的大小为:

$$E_m \approx |j\omega l(M_{AA}\dot{I}_A + M_{BA}\dot{I}_B + M_{CA}\dot{I}_C)| \quad (2)$$

### 1.2.2 电磁感应电流

电磁感应电流是当停运回路输电线路一端已经接地时,另一回线路运行,停运回路另一端感应电流快速释放装置开合时,开合允许的感性电流。I 回线 M 端接地,距离 M 端  $x$  处释放装置三相开合,以 I 回路 A 相接地为例, II 回线路对其产生电磁感应作用的示意如图 3 所示。

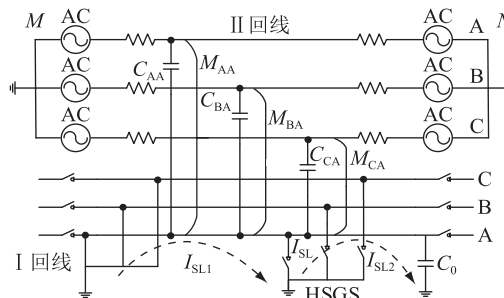


图 3 电磁感应分布

Fig.3 Electromagnetic induction distribution map

图 3 中,释放装置安装于 I 回线上,  $I_{sl1}, I_{sl2}$  分别为释放装置左右侧的电磁感应电流分量,释放装置的电磁感应电流为  $I_{sl} = I_{sl1} - I_{sl2}$ ,其中  $I_{sl2}$  较小,产生原理同静电感应回路。

当位于线路的首、末端时,根据文献[11—17]可知,电磁感应电流较大且为:

$$I_{slmax} \approx \left| \frac{M_{AA}\dot{I}_A + M_{BA}\dot{I}_B + M_{CA}\dot{I}_C}{L} \right| \quad (3)$$

式中:  $L$  为线路自感。

从静电感应电流和电磁感应电流的研究和文献[11]中的数据发现,图 1 中 GIL 管廊内故障,线路跳开后故障点主要流过静电感应电流;GIL 管廊两端释放装置闭合后故障点主要流过 GIL 管廊的电磁感应电流,GIL 管廊互感较小则由式(3)可知电磁感应电流较小,相对于线路全长而言感应电流有效释放和降低,因此有必要对释放装置进行自动控制。

## 2 释放装置合闸控制策略研究

感应电流快速释放装置作为一次设备,不能感知系统的运行工况,需要对应的自动控制设备来决策和控制释放装置。另外释放装置位于线路中部,

自动控制装置对线路两端的运行工况不能就地判别,从而需要远端采集。为了实现就地控制和判别,文中提出控制主机和控制辅机相配合的策略,系统配置见图 4。

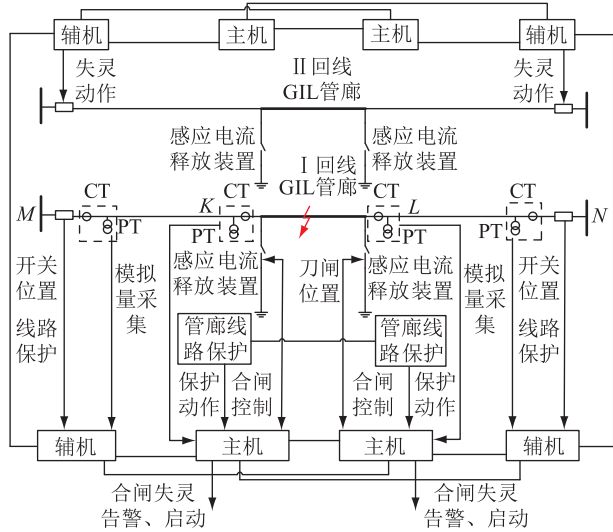


图 4 合闸控制系统

Fig.4 RTDS system configuration diagram

图 4 中, GIL 管廊两端配置了主机, 线路两端配置了辅机, GIL 管廊两端控制主机不能在正常运行或故障发生时刻控制合闸避免造成接地故障, 必须定位在 GIL 管廊段内故障且线路停运后才能控制释放装置合闸。

GIL 管廊段小差保护的动作为定位了段内故障, 线路的停运情况可以采用保护思维通过本身线路模拟量和断路器位置进行综合判别。

当线路两端无压无流、开关分位以及 GIL 管廊两端无压无流则可以判别线路停运, GIL 管廊两侧线路小差保护动作则可以判断其区内动作, 从而给主机判别是否能合闸提供了充分条件, 结合此充分条件, 合闸控制策略逻辑如图 5 所示。

主机采集 GIL 管廊段的模拟量、释放装置的位置和 GIL 管廊线路小差的动作为; 辅机采集模拟量和开关量, 2 台主机之间、各侧主机和辅机之间通过光纤进行信息传输, 见图 4。线路两侧和 GIL 管廊两侧的信息均参与逻辑运算。

在合闸策略中, 线路各侧辅机进行如下条件判别线路停运:

条件 1: 线路两侧断路器需三相跳位无流状态, 其中无流状态的门槛定义为  $I_{set1}$ , 按躲过断路器切除后辅机采样误差和零漂电流整定, 取  $0.1I_n$ ,  $I_n$  为线路电流互感器 (current transformer, CT) 额定值;

条件 2: 线路两侧电压互感器 (potential transformer, PT) 三相电压均小于无压门槛, 无压门槛定

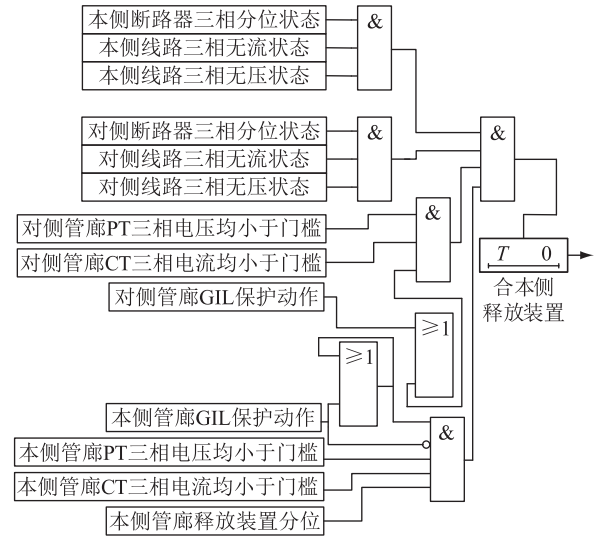


图 5 合闸控制策略逻辑

Fig.5 Closing control strategy logic diagram

义为  $U_{set1}$ , 按可靠躲过式 (2) 最大感应电压  $E_m$  整定, 可靠系数取 1.5~3。

各侧主机本身故障定位进行判别, 同时也进行线路停运的双重化判别以提高合闸可靠性:

条件 1: 本侧 GIL 管廊 GIL 小差保护动作且故障切除后动作返回进而定位故障发生在 GIL 管廊内;

条件 2: 本侧 GIL 管廊感应电流快速释放装置三相均处于分位状态;

条件 3: 本侧 GIL 管廊 PT 三相电压均小于无压门槛, 无压门槛定义为  $U_{set2}$ , 该门槛值和  $U_{set1}$  整定一样;

条件 4: 本侧 GIL 管廊 CT 三相电流均小于电流门槛值, 电流门槛定义为  $I_{set2}$ ,  $I_{set2}$  可靠躲过最大感应电流  $I_{sLmax}$ , 可靠系数取 1.5~4。

合闸策略相关定值如表 1 所示。

表 1 合闸策略控制定值

Table 1 Closing strategy control setting

序号	定值名称	单位
1	合闸无电压门槛值 $U_{set1}$ (辅机), $U_{set2}$ (主机)	V
2	合闸无流门槛值 $I_{set1}$ (辅机), $I_{set2}$ (主机)	A
3	合闸延时定值 $T$	s

当 GIL 管廊本侧主机满足条件 2—4 则基本判别出线路停运, 为了可靠性需要再次确定对侧主机和线路两侧辅机满足均停运条件, 避免误合造成接地故障。条件 1 满足则可以定位故障发生在 GIL 管廊内。当所有条件满足, 本侧主机经过确认延时  $T$  实现控制合闸出口, 其中延时  $T$  按躲过线路故障切除后断路器断开延时及拍频电压衰减时间选取, 一



般取 2~3 s。合闸控制策略有效保障线路在故障切除且线路多处满足无压无流情况下的合闸操作,避免误合造成人为短路故障。

### 3 合闸失灵控制策略研究

感应电流快速释放装置收到合闸控制命令后会进行合闸,但是释放装置分相合闸不成功时会出现合闸失灵情况,需要有相应的应对措施。

释放装置合闸失灵后若非故障相合闸失灵则不会导致故障点持续放电从而仅需要有相应的告警提示。若故障相合闸失灵则故障点会持续放电,GIL 管廊击穿会受到威胁,需要定位故障相和合理切除相邻运行线路。

#### 3.1 合闸失灵告警及启动策略

对于合闸失灵告警则只需通过合闸信号发出一段时间后装置没有合上即可给出,但对故障相的判别则需进行选相。根据系统保护配置发现线路大差保护选相跳闸,进而根据大差选相结果进行精准定位故障相实现合闸失灵启动,提高判别可靠性。以 A 相为例,图 6 为合闸失灵告警及启动逻辑。

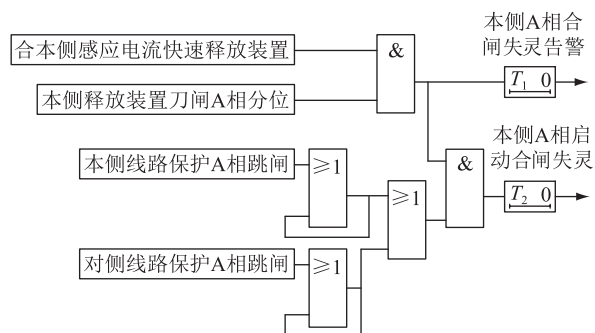


图 6 A 相合闸失灵告警及启动逻辑

Fig.6 Phase A closing failure alarm and startup logic

由图 6 合闸失灵逻辑可以看出,当主机发出合闸命令后且释放装置 A 相为分位,则经过延时  $T_1$  告警。 $T_1$ 按躲过释放装置正常合闸时间整定,释放装置正常合闸时间不大于 10 s,可取 12 s。B、C 两相同理。线路两侧线路大差选相跳闸结果通过辅机传输给主机,再结合闸失灵告警判据经过延时  $T_2$  后启动对应相合闸失灵, $T_2$ 整定同  $T_1$ 一致。

#### 3.2 合闸失灵动作策略

当故障相发出合闸失灵启动时其目的为联跳相邻运行线路,彻底消除故障相中存在的感应电流。同时 GIL 管廊两侧释放装置可能单侧或两侧失灵,从而有必要处理单双侧合闸失灵动作的策略。

相邻运行线正常运行且收到故障相合闸失灵启动信号则进行合闸失灵动作处理,合闸失灵动作逻辑见图 7。

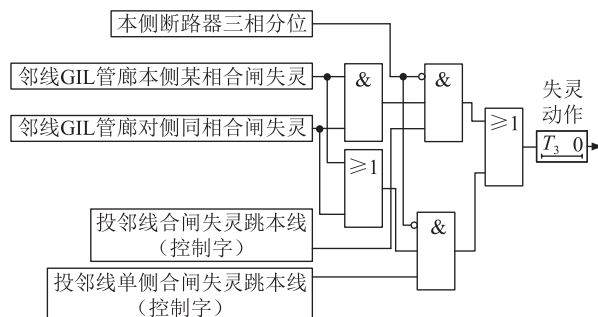


图 7 失灵动作逻辑

Fig.7 Failure action logic diagram

因合闸失灵动作作用于线路断路器,则可以由辅机实现合闸失灵动作出口,根据图 7 其动作条件为:

条件 1:本侧正常运行线路运行状态;

条件 2:收到相邻故障线路本侧或对侧分相启动合闸失灵信号;

条件 3:由“投邻线合闸失灵跳本线”和“投邻线单侧合闸失灵跳本线”控制字来实现合闸失灵动作功能的投入与否和单双侧失灵处理策略。

由图 7 看出,当条件 1 和 2 满足,同时“投邻线合闸失灵跳本线”控制字投入时,GIL 两侧释放装置同相失灵启动经确认延时  $T_3$  动作,可以取 2 s,按故障后 GIL 耐受感应电流时间确定。当条件 3 的 2 个控制字均投入时,GIL 管廊任一侧释放装置任一相失灵均动作。合闸失灵相关定值如表 2 所示。

表 2 合闸失灵控制定值

Table 2 Closing failure control setting

序号	定值名称	单位
1	合闸失灵告警时间定值 $T_1$	s
2	合闸失灵启动时间定值 $T_2$	s
3	失灵保护动作延时 $T_3$	s
4	投邻线合闸失灵跳本线	
5	投邻线单侧合闸失灵跳本线	

合闸控制策略有效保障线路在故障切除且线路多处满足无压无流情况下合闸操作,避免误合造成人为短路故障。

失灵动作逻辑根据工程需要进行投退,防止运行线路跳开后导致系统失电而失稳。

### 4 仿真分析

为了验证合闸控制、合闸失灵控制策略的性能和正确性开发了主辅机控制装置,在 RTDS 中建立如图 4 所示的 1 000 kV 的仿真系统模型,同时在双回路两端配置了辅机装置,在 GIL 管廊两端配置了主机装置,线路 CT 变比均为 3 000/1。

在图 4 中,以 I 回线 GIL 管廊发生故障,仿真 I 回线主机的合闸控制出口,合闸后模拟 I 回线释放装置合闸失灵告警和启动,并最终由相邻 II 回线的辅机跳开运行的 II 回线。

仿真 I 回线 A 相故障后,GIL 管廊两侧成功合闸仿真结果见图 8,合闸失灵仿真结果见图 9。其中, $U_{L,M}, U_{GIL,K}, U_{L,N}, U_{GIL,L}$  分别为线路 M 侧电压,GIL K 侧电压,线路 N 侧电压,GIL L 侧电压; $I_{L,M}, I_{GIL,K}, I_{L,N}, I_{GIL,L}$  分别为其相应电流。1 为 GIL K 侧合闸信号;2 为 GIL K 侧合闸失灵启动;3 为 GIL K 侧合闸失灵告警;4 为 GIL L 侧合闸信号;5 为 GIL L 侧合闸失灵启动;6 为 GIL L 侧合闸失灵告警;7 为 II 回线 K 侧失灵动作;8 为 II 回线 L 侧失灵动作。

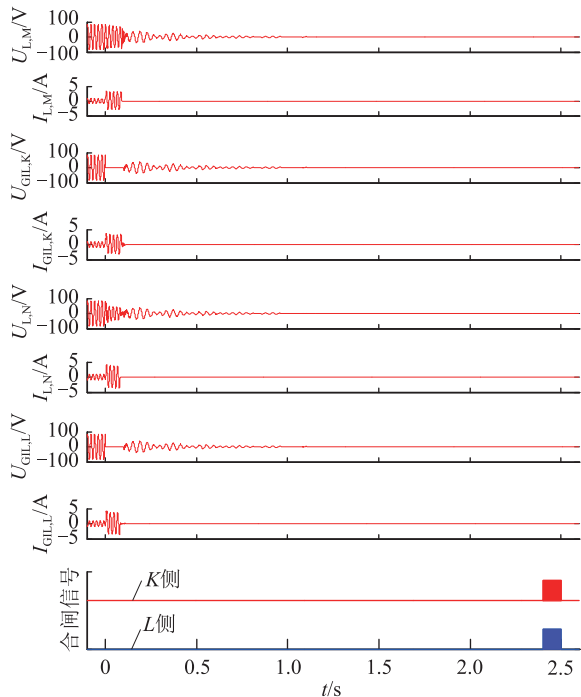


图 8 合闸控制动作(A相)

Fig.8 Closing control action simulation (phase A)

图 8 中模拟 I 回线 A 相故障,故障后 80 ms 左右线路两侧开关跳开,小差保护则动作后返回。线路两侧电流小于 0.1 A,GIL 两侧流过 0.02 A 的感应电流,小于 0.2 A 定值,满足无流条件,拍频电压现象持续 0.3 s 满足无压条件。仿真时感应电流释放装置处于分位则 GIL 管廊两侧满足合闸条件后进行 2 s 延时后在 2.4 s 左右成功发出合闸动作信号,动作行为满足本控制合闸策略要求,合闸成功后 GIL 管廊感应电流有效释放。

图 9 中模拟 I 回线 GIL 管廊 ABCN 相故障后释放装置 A 相均失灵,“投邻线合闸失灵跳本线”控制字置“1”,“投邻线单侧合闸失灵跳本线”控制字置“0”,失灵告警和失灵时间定值为 12 s。故障中线

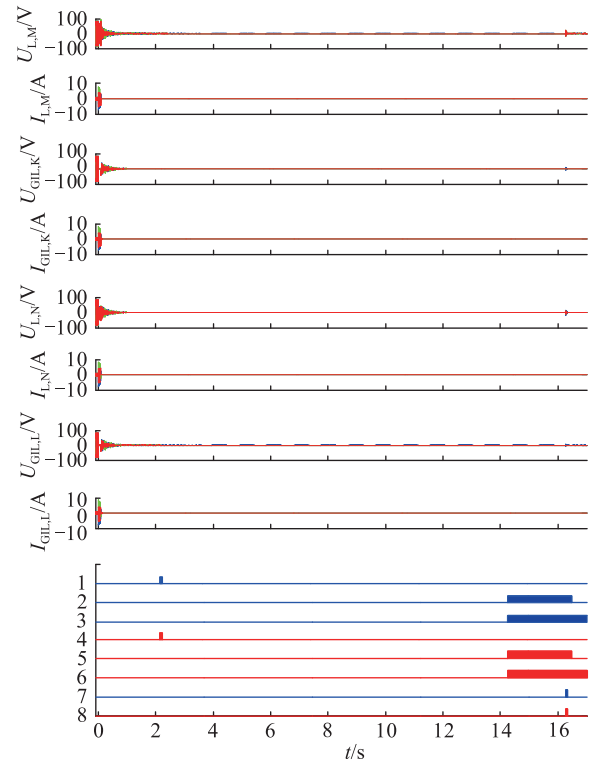


图 9 合闸失灵告警和动作仿真

Fig.9 Closing failure alarm and action simulation

路两侧大差保护三相均跳闸出口完成了故障选相,故障后 80 ms 左右线路两侧开关跳开,GIL 管廊两侧在 2.3 s 左右发出合闸动作信号。仿真两侧释放装置 A 相均合闸失灵,图 9 中 GIL 管廊两侧主机发出合闸命令后经 12 s 延时在 14.3 s 左右正确发出失灵告警信号,同时进行启动失灵,符合合闸失灵控制策略方案。II 回线辅机收到启动失灵信号后经过确认延时 2 s 后进行失灵动作出口切除 II 回线的断路器,仿真中成功切除了产生感应电流的线路源,有效避免感应电流持续烧蚀 GIL 管廊而可靠防止击穿泄放有毒气体。

在搭建的 RTDS 系统中,分别模拟了 I 回线断路器异常、释放装置位置异常、小差线路保护动作异常工况,主机合闸功能动作行为均正确。另外仿真了大差保护动作异常,释放装置不同相合闸失灵,无失灵启动信号输出,辅机动作行为均正确。控制装置的动作行为见附表 A1。

文中释放装置自动控制策略能够有效控制释放装置在故障后进行快速合闸降低感应电流,避免正常运行情况下误合导致的接地故障。根据合闸情况进行相应的合闸失灵控制,将对故障线路产生感应电流的运行回线可靠切除,提升了 GIL 管廊的安全性和运维管理水平,对实际工程应用具有借鉴意义。

## 5 结语

对含有 GIL 管廊的同塔双回线而言, GIL 管廊故障时,故障线路切除后故障点与 GIL 之间可能存在感应电流和感应电压,有必要安装感应电流释放装置,文中解决了释放装置的合闸控制问题。分析了双回线故障产生感应电流的机理和危害,为合闸控制判据相关无压无流定值提供依据。针对感应电流和释放装置控制问题,提出一种根据 GIL 管廊线路小差的动作行为、线路和 GIL 两侧运行状态实现 GIL 管廊内部故障后感应电流快速释放装置的自动合闸策略,根据合闸情况提出了合闸失灵相关的告警和联跳方案。

文中所述感应电流快速释放装置合闸和合闸失灵策略可避免人工操作和线路运行中误合释放装置,尽可能在故障切除后快速降低感应电流防止 GIL 管廊被击穿。

### 参考文献:

- [1] 特高压苏通 GIL 综合管廊工程[J]. 电力工程技术,2017,36(1):2.  
UHP Sutong GIL integrated pipe gallery project[J]. Electric Power Engineering Technology,2017,36(1):2.
- [2] 张浩民. 同塔多回输电线路感应电流、电压的研究[D]. 广州:华南理工大学,2014.  
ZHANG Haomin. The study on induced currents and induced voltage of multi-circuit transmission lines on same tower[D]. Guangzhou:South China University of Technology,2014.
- [3] 张瑞. 500 kV 同塔双回线路感应电压和感应电流的仿真分析[J]. 计算技术与自动化,2019,38(3):48-54.  
ZHANG Rui. Simulation analysis of induced voltage and current for 500 kV double circuit line[J]. Computing Technology and Automation,2019,38(3):48-54.
- [4] 赵华,阮江军,黄道春. 同杆并架双回输电线路感应电压的计算[J]. 继电器,2005,33(22):37-40.  
ZHAO Hua, RUAN Jiangjun, HUANG Daochun. Calculation of the induction voltage on double circuit transmission lines[J]. Relay,2005,33(22):37-40.
- [5] 吴世敏. 500 kV 平行输电线路感应电压、电流及其谐振问题研究[D]. 上海:上海电力学院,2011.  
WU Shimin. Study on induced voltage and current of 500 kV parallel transmission line and its resonance problem[D]. Shanghai:Shanghai University of Electric Power,2011.
- [6] 周文灿. 架空输电线路感应电压的计算方法研究[D]. 北京:华北电力大学,2017.  
ZHOU Wencan. Calculation method research on the induced voltage of overhead transmission line[D]. Beijing:School of Electrical and Electronic Engineering,2017.
- [7] 罗日成,李志前,李稳,等. 同塔四回混压输电线路感应电压与电流分析[J]. 电力科学与技术学报,2015,30(1):52-59.  
LUO Richeng, LI Zhiqian, LI Wen, et al. Induced voltage and current analysis for four-circuit transmission line with different voltage classes on the same tower[J]. Journal of Electric Power Science and Technology,2015,30(1):52-59.
- [8] 潘俊文,罗日成,吴东. 500 kV 同塔双回输电线路下平行排列油气管道上的感应电压和感应电流仿真分析[J]. 高压电器,2017,53(10):209-214.  
PAN Junwen, LUO Richeng, WU Dong. Simulation analysis for induced voltage and induced current in the oil & gas pipeline parallel under 500 kV AC double-circuit transmission lines on same tower[J]. High Voltage Apparatus,2017,53(10):209-214.
- [9] 黎斌,张烈,张微,等. 江河隧道/城市管廊 GIL 的可靠性与适用性设计[J]. 高压电器,2019,55(6):1-14.  
LI Bin, ZHANG Lie, ZHANG Wei, et al. Reliability and applicability design of river tunnel/urban pipe gallery GIL[J]. High Voltage Apparatus,2019,55(6):1-14.
- [10] 刘振祥. 特高压 GIL 用超 B 类感应电流快速释放装置开断特性研究[D]. 沈阳:沈阳工业大学,2019.  
LIU Zhenxiang. Research on breaking characteristics of ultra class B induction current rapid release device[D]. Shenyang:Shenyang University of Technology,2019.
- [11] 王艳杰. 500 kV 同塔双回输电线路感应电压电流仿真试验研究[D]. 沈阳:沈阳工业大学,2008.  
WANG Yanjie. Simulation test research on induced voltage and current of 500 kV double-circuit transmission lines on the same tower[D]. Shenyang:Shenyang University of Technology,2008.
- [12] 谢金泉. 500 kV 输电线路潜供电弧特性及其对重合闸的影响研究[D]. 广州:华南理工大学,2013.  
XIE Jinquan. Study of characteristics of secondary arc on 500 kV transmission lines and its influence to the auto reclosing[D]. Guangzhou:South China University of Technology,2013.
- [13] 秦威南,方玉群,潜力群,等. 超/特高压架空输电线路短路接地线烧伤分析[J]. 中国电力,2019,52(9):110-117.  
QIN Weinan, FANG Yuqun, QIAN Liqun, et al. Research on electricity burn of shorting grounding wires in EHV and UHV transmission lines[J]. Electric Power,2019,52(9):110-117.
- [14] 张文杰,张弓达,岳灵平,等. 并行多回交流输电线路检修作业时稳态感应电压技术与分析[J]. 电网技术,2014,38(8):2310-2314.  
ZHANG Wenjie, ZHANG Gongda, YUE Lingping, et al. Calculation and analysis on steady-state induced voltage during maintenance operation of multi parallel circuits of EHV/UHV AC transmission lines[J]. Power System Technology,2014,38(8):2310-2314.
- [15] 牛浩然,谭杰,周杰,等. 同塔六回输电线路感应电压与感应电流的计算分析[J]. 电力学报,2019(2):123-129.  
NIU Haoran, TAN Jie, ZHOU Jie, et al. Calculation and analysis of induced voltage and current in six-circuit on one tower[J]. Journal of Electric Power,2019(2):123-129.
- [16] 廖民传,黎景辉,彭向阳,等. 复杂输电网络感应电压与感应电流的计算方法[J]. 高电压技术,2016,42(10):

3308-3314.

LIAO Minchuan, LI Jinghui, PENG Xiangyang, et al. Calculation method of induced voltage and induced current for complex transmission network [J]. High Voltage Engineering, 2016, 42(10): 3308-3314.

- [17] 李宝聚, 周浩. 1 000 kV 同塔双回线路感应电压和电流的计算分析[J]. 电网技术, 2011, 35(3): 14-19.

LI Baoju, ZHOU Hao. Calculation and analysis on induced voltage and current of 1 000 kV transmission line adopting structure of double circuit on the same tower[J]. Power Sys-

tem Technology, 2011, 35(3): 14-19.

作者简介:



王玉龙

王玉龙(1988),男,硕士,工程师,从事电力系统继电保护及开发工作(E-mail: wnyulong@nrec.com);

徐渊(1969),男,通信作者,学士,高级工程师,从事电力系统继电保护及专业管理工作;

赵青春(1980),男,硕士,高级工程师,从事电力系统继电保护及专业管理工作。

## 附录 A

表 A1 异常工况控制装置动作行为

Table A1 Abnormal behavior control device action behavior

异常类型	设备行为异常侧	释放装置失灵	I 回线主机-合闸动作结果		II 回线辅机-失灵动作结果	
			K 侧	L 侧	M 侧	N 侧
释放装置位置异常	K 侧异常, L 侧正常	无	不动	动作	不动	不动
	K 侧异常, L 侧异常	无	不动	不动	不动	不动
I 回线断路器位置异常	M 侧异常, N 侧正常	无	不动	不动	不动	不动
	M 侧异常, N 侧异常	无	不动	不动	不动	不动
小差动作异常	K 侧动作, L 侧不动	无	不动	不动	不动	不动
	K 侧不动, L 侧不动	无	不动	不动	不动	不动
大差动作异常	M 侧动作, N 侧不动	同相失灵	动作	动作	动作	动作
	M 侧不动, N 侧不动	同相失灵	动作	动作	不动	不动
	M 侧动作, N 侧动作	不同相失灵	动作	动作	不动	不动
II 回线断路器异常	M 侧异常, N 侧正常	同相失灵	动作	动作	动作	动作
	M 侧异常, N 侧异常	同相失灵	动作	动作	动作	动作

## Control strategy of inductive current rapid release device for GIL with double-circuit lines

WANG Yulong<sup>1,2</sup>, XU Yuan<sup>3</sup>, ZHAO Qingchun<sup>1,2</sup>, TAN Hao<sup>1,2</sup>, XU Haiyang<sup>1,2</sup>, ZHANG Yuchi<sup>1,2</sup>

(1. NR Electric Co., Ltd., Nanjing 211102, China; 2. NR Engineering Technology Co., Ltd., Nanjing 211102, China;

3. Control Center of State Grid Jiangxi Electric Power Co., Ltd., Nanchang 330006, China )

**Abstract:** The continuous induced current at the fault point during the internal ground fault of the double circuit line GIL pipe section may cause the pipe gallery to break down. The mechanism and hazards of induced current and voltage in the GIL section of the double circuit line are analyzed. Combining the protection configuration features of check zone and differential zone in the installation of the double-line GIL, the automatic control closing strategy of GIL induced current quick release device is proposed. The method realizes the automatic closing of delayed high speed grounding switch after the circuit breaker cuts off the internal fault of the GIL pipe gallery by discriminating the operation of the line differential protection at the GIL, the operating state of the line and the GIL and the release device position, thereby avoiding manual operation. Aiming at the unsuccessful closing of the release device, the phase selection action results of the check zone protection of the fault line are collected to determine the faulty closing failure condition. The closing failure warning strategy and the closing failure inter-tripping strategy of the healthy line are proposed to reduce risks of GIL breakdown caused by the induced current. And it means to improve the efficiency of the on-site GIL operation and maintenance. The closing failure alarm strategy and the closing failure action strategy of the normal operating line based on the closing failure fault are proposed. According to the proposed closing control strategy and closing failure strategy, automatic control devices are developed and RTDS test is performed. The test results show that the control system can reliably operate under different conditions, and minimize the risk of the induced current breaking through the pipe gallery.

**Keywords:** gas-insulated line (GIL); induced current; release device; closing control; closing failure

(编辑 方晶)