

DOI:10.12158/j.2096-3203.2022.05.030

特高压 GIL 接入对断路器瞬态恢复电压的影响

孙义¹, 刘景晖¹, 郑昕雷², 李江涛², 徐逸清¹, 史大军¹

(1. 中国电力工程顾问集团华东电力设计院有限公司, 上海 200063;

2. 西安交通大学电气工程学院, 陕西 西安 710049)

摘要:特高压气体绝缘金属封闭输电线路(GIL)的接入对断路器瞬态恢复电压(TRV)幅值和瞬态恢复电压上升率(RRRV)均会产生影响,可能危及断路器开断能力。文中基于同塔双回特高压交流架空线-双回 GIL 混合输电线路,利用 EMTP-ATP 仿真研究变电站内断路器端部发生三相短路故障时,GIL 长度、接入位置与 GIL 引接站测量设备对断路器 TRV 幅值和 RRRV 的影响。仿真结果表明,GIL 的接入对断路器 TRV 幅值和 RRRV 有较大影响;GIL 长度增加对 TRV 幅值产生较大影响,但对 RRRV 影响较小;为了限制 RRRV,应将 GIL 安装在架空线中段,且应安装金属氧化物避雷器(MOV)限制 TRV 幅值;GIL 引接站测量设备对断路器 TRV 幅值和 RRRV 影响均较小。文中研究成果可为含 GIL 的特高压线路中断路器的 TRV 计算及参数设计提供参考。

关键词:特高压气体绝缘金属封闭输电线路(GIL);断路器;瞬态恢复电压(TRV);瞬态恢复电压上升率(RRRV);混合输电线路;EMTP-ATP 仿真

中图分类号:TM75

文献标志码:A

文章编号:2096-3203(2022)05-0240-06

0 引言

近年来,气体绝缘金属封闭输电线路(gas-insulated transmission line, GIL)技术凭借输送容量大、运行安全、敷设要求低以及经济性好等优势,被广泛应用于特高压输电线路,如苏通 GIL 综合管廊工程等^[1-3]。特高压 GIL 工频电气参数与传统架空线差异较大,其正序电容约为架空线的 3 倍,阻抗以及波阻抗均低于架空线,约为架空线的 1/3^[4-5]。GIL 引接站一般还要接入不同的测量设备,因此 GIL-架空线混合输电线路沿线故障特性与架空线路存在较大差异,这势必影响输电线路开关设备的开断特性,危及线路安全运行。断路器作为主要的开关设备之一,在开断故障电流时存在瞬态恢复电压(transient recovery voltage, TRV)。TRV 具有幅值大、上升速度快的特点,对断路器开断能力和绝缘性能要求较高,是设计断路器时必须考虑的主要因素之一。如果 TRV 幅值过大或瞬态恢复电压上升率(rate of rise of TRV, RRRV)过大,会引起熄弧重燃,导致断路器开断故障失败。TRV 波形与故障类型、回路参数、断路器特性等有关^[6]。现有研究表明,特高压断路器的 TRV 幅值是 500 kV 断路器的 1.7~2 倍,发生三相短路故障时 TRV 最为严重^[7-8]。

目前国内外学者已针对特高压交流断路器 TRV 特性开展大量研究。文献[9-10]研究特高压

双回输电线路感应电压对断路器 TRV 特性的影响,结果表明感应电压会使断路器 TRV 幅值及 RRRV 超过国标规定值。文献[11]研究特高压半波长输电线路不同位置发生短路故障时断路器的 TRV 特性,结果表明半波长输电线路与常规输电线路相比,TRV 幅值及 RRRV 均存在较大差异。文献[12-13]研究特高压断路器发生重合闸时的 TRV 特性,结果表明发生重合闸过程时,断路器 TRV 幅值和 RRRV 均会增加,开断更加困难。文献[14]基于 Matlab 研究特高压输电线路在不同位置发生不同类型故障时断路器的 TRV 特性,研究结果表明,断路器端部发生三相短路故障时,TRV 幅值和 RRRV 最大。文献[15-19]研究限流器对断路器 TRV 的影响,结果表明限流装置会有效降低 TRV 幅值,但会引起 RRRV 超出国标规定值。

GIL 为近几年兴起的新型输电技术,关于其工程应用的相关研究中,鲜有对含 GIL 的特高压输电系统断路器 TRV 特性的研究。文中基于同塔双回特高压交流架空线-双回 GIL 混合输电线路为例,研究 GIL 接入位置、GIL 长度以及 GIL 引接站测量设备对断路器 TRV 的影响,为含 GIL 输电线路的断路器 TRV 研究提供参考。

1 TRV 产生原理

以断路器端部发生单相接地故障为例分析 TRV 的产生原理,如图 1 所示。其中, L_s , R_s 分别为线路等效电感、电阻; C_{AB} , C_{BC} , C_{CA} 为相间电容;

收稿日期:2022-03-25;修回日期:2022-07-03

基金项目:国家重点研发计划资助项目(2017YFB0902701)

C_{C0} 为对地电容; P 为故障点。C 相发生单相接地故障与大地构成放电回路, 等效电路如图 2 所示。其中, u 为电源电压; R_{eq} , L_{eq} , C_{eq} 分别为放电回路等效电阻、电感以及电容; i_c , u_c 分别为流经 C_{eq} 的电流和 C_{eq} 两端电压。当线路发生单相接地故障时, 断路器动作开断故障电流, 电弧熄灭后, 在触头两端出现 TRV, 即图 2 中断路器 B 两端的电压, 其大小与 C_{eq} 有关, 可用 C_{eq} 两端的电压表示。

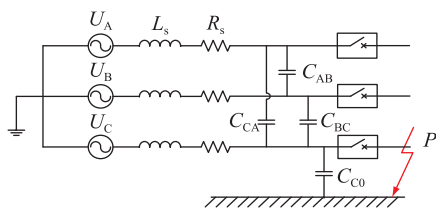


图 1 单相接地故障电路

Fig.1 Single-phase ground fault circuit

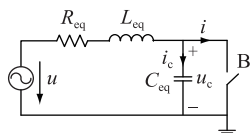


图 2 等效电路

Fig.2 Equivalent circuit

假设 $u = U_m \sin(\omega t + \varphi)$, U_m 为电压幅值, ω 为角频率, φ 为相角。C 相发生单相接地故障并在 t_1 时刻电弧熄灭, 令 $t_1 = 0$, 则此时回路方程为:

$$R_{eq} i_c + L_{eq} \frac{di_c}{dt} + u_c = U_m \sin(\omega t + \varphi) \quad (1)$$

由于 TRV 持续时间极短, 一般不超过几百微秒, 假设期间 u 保持 U_0 不变, 即 $U_0 = U_m \sin \varphi$ 。同时有:

$$i_c = C_{eq} \frac{du_c}{dt} \quad (2)$$

将式(2)代入式(1)得到:

$$L_{eq} C_{eq} \frac{d^2 u_c}{dt^2} + R_{eq} C_{eq} \frac{du_c}{dt} + u_c = U_0 \quad (3)$$

由初始条件 $t = 0, u_c = 0, i_c = 0$, 得到式(3)的解为:

$$u_c = U_0 \left[1 - e^{-\delta t} \left(\cos \omega'_0 t + \frac{\delta}{\omega'_0} \sin \omega'_0 t \right) \right] \quad (4)$$

式中:

$$\begin{cases} \delta = \frac{R_{eq}}{2L_{eq}} \\ \omega_0 = \frac{1}{\sqrt{L_{eq} C_{eq}}} \\ \omega'_0 = \sqrt{\omega_0^2 - \delta^2} \end{cases} \quad (5)$$

由式(3)可知, 断路器 TRV 幅值和 RRRV 与故障类型、回路参数以及发生故障时电源电压相位等因素有关。

2 仿真模型

基于 EMT-ATP 进行仿真建模计算, 系统电压等级为交流 1 000 kV。输电线路由架空线和 GIL 组成, 其中架空线长 300 km, GIL 长度为 3 km 或 6 km。考虑 GIL 直接与变电站出线连接、安装在架空线中断以及纯架空线路 3 种情况。同时 GIL 引接站考虑安装电容式电压互感器 (capacitor voltage transformer, CVT) 或电磁式电压互感器 (potential transformer, PT) 2 种测量设备。上述运行工况, 架空线完成一次完整的换位。

架空线为同塔双回布置方式, 采用 $8 \times 630 \text{ mm}^2$ 截面导线, 两回线路关于杆塔中心线对称分布, 其中一回线路空间参数如表 1 所示。GIL 直接与变电站出线连接示意如图 3 所示。GIL 空间布置与架空线一一对应, 共有 6 条线路。由于 GIL 在结构上与单芯电缆类似, 因此可以使用类似单芯电缆的分布参数计算方法计算 GIL 母线参数, GIL 电气参数如表 2 所示。变电站内主要设备为气体绝缘变电站 (gas insulated substation, GIS)、高压并联电抗器、变压器以及断路器等, 其主要等效参数如表 3 所示。

表 1 一回线路空间参数

Table 1 Spatial parameters of one circuit m

线路	水平距离	垂直距离	弧垂
A 相	20.2	87.2	10.4
B 相	20.8	66.9	10.4
C 相	22.0	47.0	10.4
地线	17.3	103.3	6.2

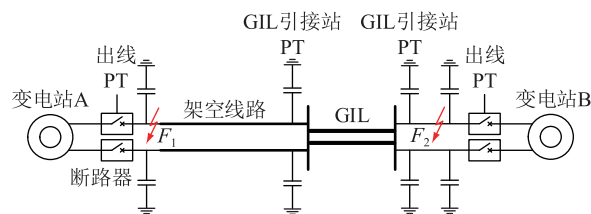


图 3 GIL 直接与变电站出线连接示意

Fig.3 Schematic diagram of direct connection between GIL and substation outlet

文中首先针对不同故障类型计算断路器开断过程 TRV 参数, 结果如表 4 所示。故障发生的位置如图 3 所示, F_1, F_2 分别表示变电站 A 和 B 断路器端部发生故障。双回架空线与双回 GIL 均处于运行状态, 单回最大输送能力约 10 500 MW, 接地故障过渡电阻为 0.01Ω 。发生故障时, 变电站 A 与变电站

表 2 GIL 电气参数

Table 2 Electrical parameters of GIL

参数	数值
正序、零序电阻/($\Omega \cdot m^{-1}$)	$1.08 \times 10^{-5}, 1.09 \times 10^{-5}$
正序、零序电抗/($\Omega \cdot m^{-1}$)	$8.45 \times 10^{-5}, 8.43 \times 10^{-5}$
正序、零序电纳/($S \cdot m^{-1}$)	$1.41 \times 10^{-8}, 1.41 \times 10^{-8}$
导体单位长度电阻/($\Omega \cdot m^{-1}$)	6.41×10^{-6}
导体单位长度电感/($H \cdot m^{-1}$)	2.49×10^{-7}
导体单位长度电容/($F \cdot m^{-1}$)	4.48×10^{-11}
波阻抗/ Ω	74.55

表 3 GIS 变电站设备参数

Table 3 Parameters of GIS substation equipment

设备	参数	数值
变压器	额定电压/kV	1 050, 525, 110
	额定容量/(MV·A)	1 000, 1 000, 334
	入口电容/pF	10 000
并联电抗器	三相等效电感/mH	5 349
	中性点电感/mH	1 591.5
套管	等效电容/pF	300
断路器	等效电容/pF	1 200
隔离开关	等效电容/pF	24
发电机出口断路器	等效电容/pF	1 000
母线	波阻抗/ Ω	95.22

B 的断路器同时发出跳闸指令,在故障电流过零点时动作,从而得出两变电站断路器的 TRV 波形。

表 4 不同故障类型下断路器 TRV 参数

Table 4 TRV parameters of circuit breakers under different fault types

故障类型	故障位置	TRV 幅值 (变电站 A)	TRV 幅值 (变电站 B)
单相接地	F_1	904.2	891.8
	F_2	883.2	784.1
两相接地短路	F_1	2 424	953.5
	F_2	961.2	1 915
三相短路	F_1	2 643	1 167
	F_2	978.6	2 604

3 GIL 接入对 TRV 的影响

文中考虑 GIL 长度、接入位置与引接站测量设备对断路器 TRV 的影响。线路基本配置设定为 GIL 长度 3 km, 变电站线路侧及 GIL 引接站均安装独立敞开式 CVT, GIL 直接与变电站出线连接。

文中使用 EMTP-ATP 计算断路器开断故障产生的 TRV 典型波形,如图 4 所示。文中研究的不同系统条件及工况下断路器 TRV 波形差别不大,近似为工频正弦波叠加高频振荡。根据 GB/T 24838—

2018 中 1 100 kV 高压交流断路器,考核断路器 TRV 的指标为 TRV 幅值及 RRRV,文中后续仅给出计算出的 TRV 幅值及 RRRV 具体数值,不再给出相应的 TRV 波形。

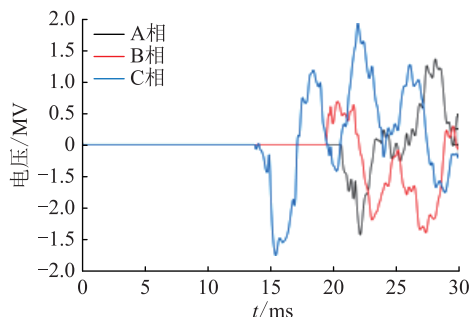


图 4 TRV 典型波形

Fig.4 The typical waveform of TRV

3.1 GIL 长度对 TRV 的影响

文中结果及现有研究均表明,断路器端部发生三相短路故障时产生的 TRV 最严重^[20],因此文中仅针对最严苛的三相短路故障进行仿真研究。当考虑 GIL 长度为 3 km, 6 km 以及无 GIL 接入时,变电站 A 或 B 发生三相短路故障,断路器 TRV 参数如表 5 所示。

表 5 不同长度 GIL 下断路器 TRV 参数

Table 5 TRV parameters of circuit breakers under different lengths of GIL

GIL 长度/km	故障位置	变电站 A		变电站 B	
		TRV 幅值/kV	RRRV/ ($kV \cdot \mu s^{-1}$)	TRV 幅值/kV	RRRV/ ($kV \cdot \mu s^{-1}$)
0	F_1	1 089	3.15	1 462	0.73
	F_2	1 685	1.28	1 028	3.01
3	F_1	1 161	2.53	1 232	2.58
	F_2	1 750	1.06	1 115	4.26
6	F_1	1 046	1.62	1 204	1.65
	F_2	1 779	1.04	1 203	3.84

由表 5 可知,GIL 长度由 3 km 增至 6 km 后,RRRV 均有不同程度的下降。当故障发生在 F_1 处时,GIL 长度 6 km 时的 TRV 幅值与 RRRV 均比 GIL 长度 3 km 时小,其中 TRV 幅值最大降低 115 kV,降幅为 10%;RRRV 最大降低 $0.93 kV/\mu s$,降幅为 36%。而当故障发生在 F_2 处时,GIL 长度 6 km 时的 TRV 幅值相比 GIL 长度 3 km 时略有上升,TRV 幅值最大增加 88 kV,增幅为 8%;而 RRRV 略有下降,最大降低 $0.42 kV/\mu s$,降幅为 10%。

相较于纯架空线路,GIL 的接入对断路器 TRV 幅值与 RRRV 产生一定程度的影响。GIL 长度不同,断路器 TRV 幅值与 RRRV 也不相同。相较于无 GIL 线路,接入 GIL 的线路 TRV 幅值最大增加 175

kV,增幅为 17%;RRRV 最大升高 $1.85 \text{ kV}/\mu\text{s}$,增幅为 253%,这种情况出现在 GIL 为 3 km,故障发生在 F_1 处时变电站 B 断路器的 TRV 波形中,实际运行中应特别注意。

接入 GIL 以及 GIL 长度的变化导致线路参数发生改变,进而引起放电回路发生变化。由于 GIL 的电容大于架空线,阻抗小于架空线,根据图 2 等效电路以及式(3)可知,RLC 振荡电路阻尼减小, ω_0' 增加,最严重情况下,TRV 幅值与 RRRV 均增加。

3.2 GIL 接入位置对 TRV 的影响

GIL 存在 2 种不同的接入位置:GIL 直接与变电站出线连接,如图 3 所示;GIL 安装在架空线路中段,如图 5 所示。针对 2 种不同的接入位置, F_1 或 F_2 处发生三相短路故障时断路器 TRV 参数如表 6 所示。

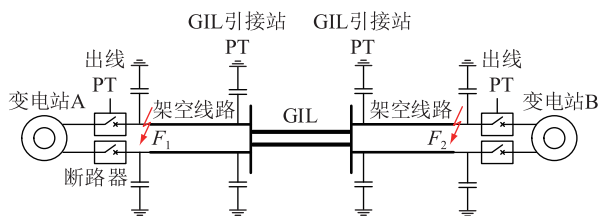


图 5 GIL 安装在架空线中段示意

Fig.5 Schematic diagram of GIL installed in the middle section of the overhead line

表 6 GIL 不同接入位置下断路器 TRV 参数

Table 6 TRV parameters of circuit breakers under different access positions of GIL

GIL 接入位置	故障位置	变电站 A		变电站 B	
		TRV 幅值/kV	RRRV/ $(\text{kV}\cdot\mu\text{s}^{-1})$	TRV 幅值/kV	RRRV/ $(\text{kV}\cdot\mu\text{s}^{-1})$
直接与变电站出线连接	F_1	1 161	2.53	1 232	2.58
	F_2	1 750	1.06	1 115	4.26
安装在架空线中段	F_1	1 231	0.56	1 973	1.56
	F_2	1 680	0.79	1 367	1.65

由表 6 可知,GIL 直接与变电站出线连接时,断路器 TRV 幅值相较于 GIL 安装在架空线中段时最大降低 741 kV,降幅为 37%;而 RRRV 有所升高,最大增幅为 351%。当故障发生在 F_1 处时,变电站 A 断路器的 RRRV 差异较大,直接与变电站出线连接方式为安装在架空线中段方式的 4.5 倍。故障发生在 F_2 处时,变电站 B 断路器的 RRRV 差异较大。2 种接入方式下变电站 B 断路器的 TRV 幅值差异较大。

综上所述,GIL 安装在线路中段的等效电容较大,而放电回路阻尼相差不大,因此 GIL 安装在架空线中段可明显降低断路器开断故障时的 RRRV,但

可能会增加 TRV 幅值。根据国标中 1 000 kV 交流断路器 T100 考核指标,即 TRV 幅值不超过 1 635 kV,RRRV 不超过 $2 \text{ kV}/\mu\text{s}$,GIL 应采用安装在架空线中段方式,且需要安装金属氧化物避雷器(metal oxide varistor,MOV)以限制 TRV 幅值。

3.3 GIL 引接站测量设备对 TRV 的影响

输电线路中最常用的测量设备是 CVT 与电磁式 PT。在含有 GIL 的输电线路中,为了监测 GIL 运行的安全性,往往在 GIL 引接站安装 CVT 或电磁式 PT 监测其运行电压。测量设备的接入会改变输电线路的整体参数,进而改变断路器切断故障时的 TRV 波形。文中通过仿真计算比较 2 种测量设备对断路器 TRV 波形的影响,其中取独立敞开式 CVT 对地等效电容为 5 000 pF,电磁式 PT 对地等效电容为 200 pF。不同测量设备下断路器 TRV 参数的计算结果如表 7 所示。

表 7 不同测量设备下断路器 TRV 参数
Table 7 TRV parameters of circuit breakers under different kinds of measuring equipment

测量设备	故障位置	变电站 A		变电站 B	
		TRV 幅值/kV	RRRV/ $(\text{kV}\cdot\mu\text{s}^{-1})$	TRV 幅值/kV	RRRV/ $(\text{kV}\cdot\mu\text{s}^{-1})$
CVT	F_1	1 161	2.53	1 232	2.58
	F_2	1 750	1.06	1 115	4.26
电磁式 PT	F_1	1 161	2.53	1 221	2.54
	F_2	1 745	1.04	1 107	3.83

由表 7 可知,独立敞开式 CVT 与电磁式 PT 对断路器 TRV 幅值及 RRRV 的影响很小。当测量设备换为电磁式 PT 后,TRV 幅值最大降低 11 kV,降幅为 0.9%;RRRV 最大降低 $0.43 \text{ kV}/\mu\text{s}$,降幅为 10%。可见测量设备对 TRV 幅值基本没有影响。根据国标规定的断路器 TRV 考核指标,使用不同的测量设备,TRV 幅值均满足要求,但仅故障发生在 F_2 处时,变电站 A 断路器的 RRRV 满足国标。

GIL 引接站测量设备的接入会增大输电线路电容,但测量设备等效电容很小,基本不会对线路整体电容产生很大影响,因此测量设备对断路器 TRV 影响很小。

4 结论

含 GIL 的特高压输电线路与纯架空线在工频电气参数上存在较大差异,导致断路器开断故障时的 TRV 幅值和 RRRV 发生改变。文中基于同塔双回特高压交流架空线-双回 GIL 混合输电线路的仿真建模计算,研究了 GIL 长度、接入位置与 GIL 引接站测量设备对断路器 TRV 波形的影响,结论为:

(1) GIL 长度的增加对 TRV 幅值的影响很小, GIL 长度增加 3 km 时, TRV 幅值最大增幅为 8%, 而 RRRV 有所减小, 最大降幅为 36%。

(2) GIL 与变电站出线直接相连时, TRV 幅值相较于 GIL 安装在架空线中段时最大降幅为 37%, RRRV 最大增幅为 351%。为了限制 RRRV, 应将 GIL 安装在架空线中段, 且应安装 MOV 限制 TRV 幅值。

(3) GIL 引接站安装敞开式 CVT 或电磁式 PT 对 TRV 幅值及 RRRV 的影响均很小。相较于 CVT, 使用电磁式 PT 后 TRV 幅值最大降幅为 0.9%, RRRV 最大降幅为 10%。

(4) GIL 长度、接入位置以及 GIL 引接站测量设备对断路器 TRV 幅值影响较小, 最大增幅为 17%, 但对 RRRV 影响较大, 最大增幅为 253%。因此在考虑 GIL 的接入对断路器 TRV 的影响时, 应重点关注 RRRV 的变化。

参考文献:

[1] 李鹏, 颜湘莲, 王浩, 等. 特高压交流 GIL 输电技术研究及应用[J]. 电网技术, 2017, 41(10): 3161-3167.
LI Peng, YAN Xianglian, WANG Hao, et al. Research and application of UHVAC gas-insulated transmission line[J]. Power System Technology, 2017, 41(10): 3161-3167.

[2] 何健, 韩宇, 张广玉, 等. 特高压交流 GIL 输电技术的应用[J]. 电子技术与软件工程, 2019(23): 207-208.
HE Jian, HAN Yu, ZHANG Guangyu, et al. Application of UHV GIL transmission technology[J]. Electronic Technology & Software Engineering, 2019(23): 207-208.

[3] 刘军. 气体绝缘输电线路(GIL)的应用及发展[J]. 电子技术与软件工程, 2019(23): 219-220.
LIU Jun. Application and development of gas insulated transmission line (GIL)[J]. Electronic Technology & Software Engineering, 2019(23): 219-220.

[4] 刘泽洪, 王承玉, 路书军, 等. 苏通综合管廊工程特高压 GIL 关键技术要求[J]. 电网技术, 2020, 44(6): 2377-2385.
LIU Zehong, WANG Chengyu, LU Shujun, et al. Key technical-parameters of UHV GIL in sutong utility tunnel project[J]. Power System Technology, 2020, 44(6): 2377-2385.

[5] 班连庚, 孙岗, 项祖涛, 等. 特高压苏通综合管廊工程 GIL 系统工作条件[J]. 电网技术, 2020, 44(6): 2386-2393.
BAN Liangeng, SUN Gang, XIANG Zutao, et al. System conditions of UHV GIL in sutong utility tunnel project[J]. Power System Technology, 2020, 44(6): 2386-2393.

[6] 陈水明, 许伟, 杨鹏程, 等. 500 kV 变电站 66 kV 侧断路器瞬态恢复电压特征[J]. 高电压技术, 2009, 35(6): 1301-1308.
CHEN Shuiming, XU Wei, YANG Pengcheng, et al. Characteristics of transient recovery voltage of 66 kV circuit breaker in 500 kV substation[J]. High Voltage Engineering, 2009, 35(6): 1301-1308.

[7] 淡淑恒, 余潇寒. 弧隙电阻对发电机断路器瞬态恢复电压的影响研究[J]. 高压电器, 2018, 54(12): 36-42.
DAN Shuheng, YU Xiaohan. Effect of arc-gap resistance on transient recovery voltage of generator circuit breaker[J]. High Voltage Apparatus, 2018, 54(12): 36-42.

[8] 刘航, 陈嵩, 孙晓勇, 等. 真空断路器合闸 10 kV 并联电抗器过电压抑制的仿真研究[J]. 高压电器, 2019, 55(12): 32-37.
LIU Hang, CHEN Song, SUN Xiaoyong, et al. Simulation research on overvoltage suppression of vacuum circuit breaker switching on 10 kV shunt reactor[J]. High Voltage Apparatus, 2019, 55(12): 32-37.

[9] 杨婧婧, 刘洪顺, 何东欣, 等. 特高压混合无功补偿对单相接地故障开断特性的影响研究[J]. 中国电机工程学报, 2019, 39(23): 7083-7092, 7121.
YANG Jingjing, LIU Hongshun, HE Dongxin, et al. The influence of UHV hybrid reactive power compensation on interrupting characteristics in the single phase-ground fault[J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39(23): 7083-7092, 7121.

[10] 王珍珍. 特高压双回输电线路瞬态恢复电压暂态特性研究[D]. 淄博: 山东理工大学, 2018.
WANG Zhenzhen. Research on transient characteristics of transient recovery voltage of UHV double transmission lines[D]. Zibo: Shandong University of Technology, 2018.

[11] 王平, 韩彬, 张媛媛, 等. 特高压半波长交流输电系统断路器瞬态恢复电压特性研究[J]. 高电压技术, 2018, 44(1): 22-28.
WANG Ping, HAN Bin, ZHANG Yuanyuan, et al. Characteristics of transient recovery voltage of circuit breakers in UHV AC half-wavelength transmission system[J]. High Voltage Engineering, 2018, 44(1): 22-28.

[12] 丁培, 刘志远, 罗金辉, 等. 基于 KEMA 电弧模型的 SF₆ 断路器直流分量开断能力研究[J]. 高压电器, 2020, 56(12): 75-82.
DING Pei, LIU Zhiyuan, LUO Jinhui, et al. Research on DC-component breaking capability of SF₆ circuit breaker based on KEMA arc model[J]. High Voltage Apparatus, 2020, 56(12): 75-82.

[13] 高俊珍, 淡淑恒, 顾威, 等. 机械式高压直流断路器开断性能试验研究[J]. 高压电器, 2020, 56(11): 111-115, 123.
GAO Junzhen, DAN Shuheng, GU Wei, et al. Experiment research on breaking capability of mechanical type HVDC circuit breaker[J]. High Voltage Apparatus, 2020, 56(11): 111-115, 123.

[14] 郑艳彬, 敬涛, 慕德凯, 等. 基于 MATLAB 的特高压断路器瞬态恢复电压研究[J]. 山东电力技术, 2018, 45(3): 48-52.
ZHENG Yanbin, JING Tao, MU Dekai, et al. Study on transient recovery voltage of UHV circuit breaker based on MATLAB[J]. Shandong Electric Power, 2018, 45(3): 48-52.

[15] 李博伟, 郝全睿, 尹晓东, 等. 考虑快速重合闸的快速泄流型混合式直流断路器[J]. 高电压技术, 2020, 46(10): 3688-3698.
LI Bowei, HAO Quanrui, YIN Xiaodong, et al. Rapidly energy

- dissipating hybrid DC circuit breaker considering fast reclosing [J]. High Voltage Engineering, 2020, 46(10): 3688-3698.
- [16] 胡泰山, 蔡汉生, 刘刚, 等. 500 kV 限流电抗器接入 90 kA 短路电流系统时瞬态恢复电压抑制分析[J]. 南方电网技术, 2019, 13(12): 53-59.
- HU Taishan, CAI Hansheng, LIU Gang, et al. Analysis of transient recovery voltage restrictive measures when 500 kV current limiting reactor connected to 90 kA short-circuit current system[J]. Southern Power System Technology, 2019, 13(12): 53-59.
- [17] 向常圆, 项祖涛, 徐文佳. 基于高耦合分裂电抗器限流装置后灭弧断路器的 TRV 特性[J]. 高压电器, 2020, 56(1): 18-23.
- XIANG Changyuan, XIANG Zutao, XU Wenjia. TRV characteristics of post-breaker circuit breaker based on high coupling split reactor current limiter [J]. High Voltage Apparatus, 2020, 56(1): 18-23.
- [18] 袁帅, 唐宗华, 丁建明, 等. 复合型故障限流器对断路器瞬态恢复电压特性的影响与分析[J]. 电气工程学报, 2016, 11(9): 15-24.
- YUAN Shuai, TANG Zonghua, DING Jianming, et al. Impact of comprehensive fault current limiter on the transient recovery voltage property of circuit breakers and its analysis[J]. Journal of Electrical Engineering, 2016, 11(9): 15-24.
- [19] 王珍珍, 何柏娜, 宁家兴, 等. 断路器电弧模型对瞬态恢复电压影响的研究[J]. 电气应用, 2018, 37(3): 42-47.
- WANG Zhenzhen, HE Bona, NING Jiaying, et al. Study on the influence of arc model of circuit breaker on transient recovery voltage[J]. Electrotechnical Application, 2018, 37(3): 42-47.
- [20] 刘波, 曹亚钊, 李万民, 等. 高压断路器合闸电阻的设计与计算[J]. 青海电力, 2019, 38(4): 20-23.
- LIU Bo, CAO Yazhao, LI Wanmin, et al. Design and calculation of closing resistance of high voltage switch circuit breaker [J]. Qinghai Electric Power, 2019, 38(4): 20-23.

作者简介:



孙义

孙义(1994),男,硕士,工程师,从事电力系统规划工作(E-mail:3130@ecepdi.com);

刘景晖(1987),男,硕士,高级工程师,从事电力系统规划工作;

郑昕雷(1998),男,硕士在读,研究方向为高电压绝缘技术。

Influence of UHV GIL access on transient recovery voltage of circuit breaker

SUN Yi¹, LIU Jinghui¹, ZHENG Xinlei², LI Jiangtao², XU Yiqing¹, SHI Dajun¹

(1. East China Electric Power Design Institute, CPECC, Shanghai 200063, China;

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

Abstract: The access of ultra high voltage (UHV) gas-insulated transmission line (GIL) affects both the transient recovery voltage (TRV) amplitude and the rate of rise of TRV (RRRV) of circuit breakers, which may endanger the breaking capacity of circuit breakers. Based on the double-circuit UHV accurate current (AC) overhead line on the same tower and the double-circuit GIL hybrid transmission line, EMTP-ATP simulation is used to study the influence of GIL length, access position and GIL lead station measurement equipment on the TRV amplitude and RRRV of the circuit breaker when a three-phase short-circuit fault occurs at the end of the circuit breaker in the substation. The simulation results show that the access of the GIL has a greater impact on the TRV amplitude and RRRV of the circuit breaker. The increase in the length of the GIL has a greater impact on the TRV amplitude, but the impact on RRRV is small. In order to limit the RRRV, the GIL should be installed in the middle of the overhead line, and the metal oxide varistor (MOV) should be installed to limit the TRV amplitude. The measurement equipment of the GIL terminal station has little effect on the TRV amplitude and RRRV of the circuit breaker. The research results can provide a reference for the TRV calculation and parameter design of circuit breakers in UHV lines with GIL.

Keywords: ultra high voltage (UHV) gas-insulated transmission line (GIL); circuit breaker; transient recovery voltage (TRV); rate of rise of TRV (RRRV); hybrid transmission line; EMTP-ATP simulation

(编辑 吴楠)