

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.240709

GIS 外壳绝缘隔断处的过电压分析与控制措施研究

张书琴, 张克选, 骆常璐, 高延峰, 买小飞, 陈怀亮, 张垒, 刘锋

(河南平芝高压开关有限公司, 河南 平顶山 467013)

摘要: 运行中的气体绝缘开关设备(gas-insulated switchgear, GIS)现场操作中时有弧光放电现象的发生。现有研究对其产生的机理只是笼统地归咎于开关操作时产生的特快速暂态过电压(very fast transient over-voltage, VFTO)所引起的壳体地电位升高, 并没有从理论层面进行更深层次的研究与分析。从理论上推导出了 GIS 开关设备分合空载母线时的瞬变电流及其时变率的数学表达式, 以及由瞬变电流在 GIS 外壳绝缘隔断部位感生的瞬变电压计算式。对于 126~1100 kV GIS, 其开关设备分合操作时的充电及放电电流时变率分别高达 10^6 及 10^9 以上, 如此高时变率的瞬变电流将会在 GIS 外壳的绝缘隔断部位感生出数值较高的瞬变电压。而分合过程中开关触头间的多次重击穿又会在绝缘隔断部位感应出数值很高的次生 VFTO, 致使该部位气隙击穿而产生弧光放电现象。最后, 对现场出现的各种弧光放电现象也进行了简要的说明, 并给出了消除弧光放电的有效措施, 即缩小包含外壳绝缘隔断部位在内的回路面积可以有效降低绝缘隔断部位两侧的次生 VFTO, 从根本上消除弧光放电。

关键词: 绝缘隔断; 弧光放电; 电流时变率; 感生的瞬变电压; 次生的 VFTO

Analysis of overvoltage and control measures at the insulation partition of GIS enclosures

ZHANG Shuqin, ZHANG Kexuan, LUO Changlu, GAO Yanfeng, MAI Xiaofei, CHEN Huailiang, ZHANG Lei, LIU Feng
(Henan Pingzhi High-Voltage Switchgear Co., Ltd., Pingdingshan 467013, China)

Abstract: In-service gas-insulated switchgears (GIS) often experience arc discharge phenomena. Existing studies generally attribute this to the rise in enclosure ground potential caused by the very fast transient overvoltage (VFTO) generated during switching operations, without conducting in-depth theoretical analysis. This paper theoretically derives the mathematical expressions for the transient current and its rate of change during the switching of unloaded busbars in GIS, as well as formulas for calculating the transient voltage induced at the insulation partition of the GIS enclosure by the transient current. For GIS rated from 126 kV to 1100 kV, the rate of change of charging and discharging currents during switchgear switching can reach as high as 10^6 and 10^9 A/s, respectively. Such high rate of change in transient current can induce significant transient voltage at the insulation partition of the GIS enclosure. Multiple re-breakdowns between switch contacts during operation can induce secondary VFTO at the insulation partition, leading to air-gap breakdown and arc discharge. Finally, this paper briefly describes observed various arc discharge phenomena in the field and proposes an effective mitigation measure: reducing the loop area that includes the insulation partition of the enclosure can effectively lower secondary VFTO on both sides of the insulation partition, fundamentally eliminating arc discharge.

This work is supported by the Science and Technology Project of State Grid Corporation of China (No. 5500-201947427A-0-0-00).

Key words: insulation partition; arc discharge; change rate of current; induced transient voltage; secondary VFTO

0 引言

气体绝缘开关设备(gas-insulated switchgear, GIS)由于结构紧凑、对环境的适应性强被越来越广泛地

使用, 在使用中人们对 GIS 的认知越来越全面、越来越深入。对于 GIS 用的外置式电流互感器^[1](current transformer, CT), 为了避免正常运行时 GIS 外壳上的工频感应电流对 CT 测量值的影响, 常常需要在 CT 附近的壳体上设置绝缘隔断, 如图 1 左半部分所示: 在上、下金属壳体的法兰连接部位配置了绝缘环、绝缘衬套以及绝缘垫圈等, 使上、下

基金项目: 国家电网公司科技项目资助(5500-201947427A-0-0-00); 平高集团公司科技项目资助(PGKJ2022-054)

壳体在此处电气隔离,但如此配置也使 GIS 金属接地外壳上存在电气不连续的隔断部位。

另外,对于 GIS 用接地开关(earthing switch, ES)的接地,气体绝缘金属封闭开关设备选用导则 DL/T728-2013 的第 6.3 条款要求其接地端子与外壳绝缘后直接接地,这也使得 GIS 的外壳与接地回路间存在电气不连续的隔断部位。

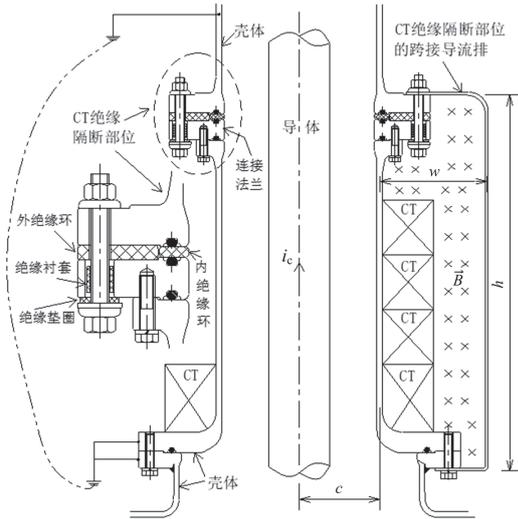


图 1 CT 及其绝缘隔断结构示意图

Fig. 1 CT and its insulation partition structure diagram

正是由于 GIS 壳体上这些绝缘隔断部位的存在,使开关设备在现场的操作过程中,时有在绝缘隔断部位出现如图 2 所示的弧光放电现象。图 2 为某 550 kV 变电站接地开关合闸于空载母线上时闪现的弧光。



图 2 ES 绝缘引出部位的弧光放电

Fig. 2 Arc discharge at ES insulation leading out part

以往对于 GIS 开关设备操作产生的特快速暂态过电压(very fast transient over-voltage, VFTO),大多关注的是内过电压对 GIS 主绝缘及与其直连的变压器等设备的影响^[2-6],鲜少关注 VFTO 在 GIS 气室外部空气中的影响情况。

对于上述外壳绝缘隔断部位的弧光放电,虽经网省公司牵头,组织电科院、GIS 制造厂家、运行部门等多家单位共同对 GIS 开关操作时的外壳暂态地电位上升进行了现场实测及研究分析^[7-12],并对 GIS 厂家预采取的消除弧光异响的措施进行了实测再验证,最终解决了 GIS 外壳绝缘隔断处的过电压问题。但是对其产生的机理只是笼统地归咎于开关操作时产生的 VFTO 所引起的壳体地电位升高,并没有从理论层面进行更深层次的研究与分析。

本文从理论上推导出了 GIS 开关设备操作时,由于主回路的电气参数突变所引起的瞬变电流^[13-16]及其时变率的数学表达式,以及瞬变电流在 GIS 气室外部的回路中所感生的瞬变电压的计算式,并简要解读了 GIS 现场操作中由此引发的各种弧光放电现象及其控制措施。

1 空载母线的充电过程

操作 GIS 的气体断路器(gas circuit breaker, GCB)、母线侧隔离开关(bus-disconnecting switch, B-DS)等设备开、合空载母线时,开合过程中动、静触头间的每次击穿或预击穿[以下记为(预)击穿]过程,都是对空载母线的充电过程。在动、静触头一次(预)击穿的瞬间,简化电路如图 3 所示。图中: C 为空载母线的集中电容; R 为母线和电源的总电阻; L 为电源电感 L_s 与线路电感之和; 电源电压 $u_s = U_m \sin(\omega t + \varphi)$, 其中 U_m 为电源电压峰值。550 kV 的电源电感 L_s 依据电源容量的不同,取值范围为 20~200 mH^[17-18]。

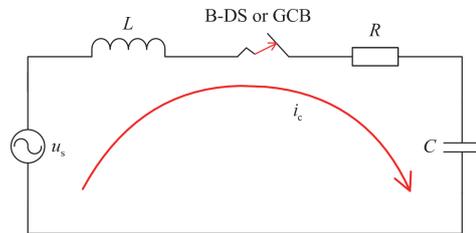


图 3 关合空载母线的简化电路

Fig. 3 Simplified circuit for closing unloaded bus

B-DS 或 GCB(预)击穿瞬间的电路方程为

$$LC \frac{d^2 u_c}{dt^2} + RC \frac{du_c}{dt} + u_c = U_m \sin(\omega t + \varphi) \quad (1)$$

式中: u_c 为(预)击穿过程中空载母线集中电容的充电电压; ω 为电源电压角频率; φ 为(预)击穿瞬间电源电压的相位角。

其齐次方程的特征根为

$$p_{1,2} = -\frac{R}{2L} \pm \sqrt{\left(\frac{R}{2L}\right)^2 - \frac{1}{LC}} \quad (2)$$

$\frac{R}{2L} < \frac{1}{\sqrt{LC}}$ 时:

$$p_{1,2} = -\frac{R}{2L} \pm j\sqrt{\frac{1}{LC} - \left(\frac{R}{2L}\right)^2} = -\alpha \pm j\omega_d \quad (3)$$

式中: α 为阻尼衰减系数, $\alpha = \frac{R}{2L}$; ω_d 为阻尼振荡角频率, $\omega_d = \sqrt{\frac{1}{LC} - \left(\frac{R}{2L}\right)^2} = \sqrt{\omega_0^2 - \alpha^2}$, ω_0 为

无阻尼($R=0$)时的振荡角频率, $\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}}$ 。

考虑到电阻值 R 很小, 有: $\alpha \approx 0$, $\omega_d \approx \omega_0$ 。

(预)击穿瞬间 $t=0$ 时的初始条件: $u_{c(0)} = U_0$, U_0 为 B-DS 或 GCB(预)击穿前空载母线上残存的直流电压。此外, 因有电感 L 的存在, 电流不能突变, 即

$i_{c(0)} = C \frac{du_c}{dt} \Big|_{t=0} = 0$, 可求得:

1) 母线电容的充电电压

$$u_c = U_m \sin(\omega t + \varphi) + (U_0 - U_m \sin \varphi) \times e^{-\alpha t} \cos \omega_0 t - \frac{\omega U_m \cos \varphi}{\omega_0} e^{-\alpha t} \sin \omega_0 t \quad (4)$$

2) 母线电容充电的瞬变电流

$$i_c = \omega C U_m \cos(\omega t + \varphi) - \omega_0 C (U_0 - U_m \sin \varphi) \times e^{-\alpha t} \sin \omega_0 t - \omega C U_m \cos \varphi e^{-\alpha t} \cos \omega_0 t \quad (5)$$

3) 母线充电电流的时变率

$$\frac{di_c}{dt} = -\omega^2 C U_m \sin(\omega t + \varphi) - \omega_0^2 C (U_0 - U_m \sin \varphi) \times e^{-\alpha t} \cos \omega_0 t + \omega_0 \omega C U_m \cos \varphi e^{-\alpha t} \sin \omega_0 t \quad (6)$$

式(4)一式(6)中的第一项为充电电压、瞬变电流及电流时变率的稳态值, 第二项、第三项是三者的瞬态值。由此可知: 充电电流的时变率相较于其瞬变电流值大得多, 工频稳态时为瞬变电流值的 ω ($=314$) 倍, 而瞬态时为瞬变电流值的 ω_0 倍。

考虑到 $\omega_0 = 1/\sqrt{LC}$, 且 $\omega_0 \gg \omega$, 式(4)一式(6)可进一步简化为

$$u_c \approx U_m \sin(\omega t + \varphi) + (U_0 - U_m \sin \varphi) e^{-\alpha t} \cos \omega_0 t \quad (7)$$

$$i_c \approx -\omega_0 C (U_0 - U_m \sin \varphi) e^{-\alpha t} \sin \omega_0 t \quad (8)$$

$$\frac{di_c}{dt} \approx -\frac{1}{L} (U_0 - U_m \sin \varphi) e^{-\alpha t} \cos \omega_0 t \quad (9)$$

可见瞬变充电电流的时变率与电容无关, 即与母线或线路的长短无关, 仅取决于电感及(预)击穿瞬间断口间的电压。由毫亨级的电源电感及千伏级的断口间电压, 可预知高频充电电流的时变率在 10^6 以上。

2 空载母线的放电过程

GIS 接地开关 ES 的合闸过程, 本质上是对母线电容 C 上残存的直流电压 U_0 进行放电的过程。如图 4 所示: ES 合闸过程中动、静触头被预击穿的瞬间, 空载母线上残存的电压 U_0 通过 ES 的直接接地体泄放至大地, 图中 R_c 为接地电阻。

图 4 电容放电的电路方程为: $R_c C \frac{du'_c}{dt} + u'_c = 0$,

其中 u'_c 为 ES 动、静触头预击穿过程中母线电容的放电电压。

以 ES 合闸预击穿时刻作为 $t=0$ 的时刻, 由初始条件 $t=0$ 时 $u'_c = U_0$, 可求得

母线电容的放电电压:

$$u'_c = U_0 e^{-\frac{t}{R_c C}} \quad (10)$$

母线电容的放电电流:

$$i'_c = C \frac{du'_c}{dt} = -\frac{U_0}{R_c} e^{-\frac{t}{R_c C}} \quad (11)$$

母线放电电流的时变率:

$$\frac{di'_c}{dt} = \frac{U_0}{R_c^2 C} e^{-\frac{t}{R_c C}} \quad (12)$$

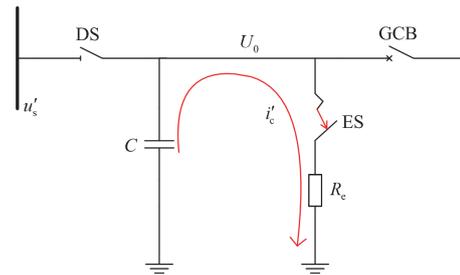


图 4 空载母线电容的放电示意图

Fig. 4 Discharge diagram of no-load bus capacitance

放电能量:

$$W' = \int_0^t (u'_c \times i'_c) dt = \frac{1}{2} C U_0^2 \left(e^{-\frac{2t}{R_c C}} - 1 \right) \quad (13)$$

放电能量的最大值 W'_m :

$$W'_m = -\frac{1}{2} C U_0^2 \quad (14)$$

式中：负号表示放电。由于电容 C 值很小，约几百~几千 PF，接地回路的电阻约几欧姆，在千伏级的残留电压作用下，使放电电流时变率的初值高达 10^9 以上，但放电的能量很小。

3 由充/放电引起的绝缘隔断处的瞬变电压

包含外壳绝缘隔断部位在内的回路(以下称非闭合回路)与主回路间存在互感，互感 M 可由式(15)推算。

$$M = \frac{d\Phi}{di} = \frac{d(B \cdot S)}{di} = \frac{d\left(\int \frac{\mu_0 i}{2\pi r} \cdot ds\right)}{di} = \frac{\mu_0}{2\pi} \int \frac{1}{r} ds \quad (15)$$

式中： r 为回路内某点与载流导体轴线间的距离； μ_0 为空气的磁导率， $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \text{ H/m}$ ； Φ 和 B 分别为电流 i 在非闭合回路内所产生的磁通量和磁感应强度； S 为非闭合回路的面积。

若非闭合回路为高 $h \times$ 宽 w 的矩形，参见图 1 的右半部分， h 边与流通电流 i_c 的导体轴线平行， c 为导体中心到矩形回路近边中心的距离，则非闭合矩形回路与主回路间的互感 M 为

$$M = \frac{\mu_0}{2\pi} \int \frac{1}{r} ds = \frac{\mu_0}{2\pi} \int_c^{c+w} \frac{1}{r} (h \cdot dr) = \frac{\mu_0 h}{2\pi} \ln\left(\frac{c+w}{c}\right) \quad (16)$$

若矩形非闭合回路为包含接地开关直接接地体在内的回路(参见图 5)，用 r_c 表示 ES 直接接地体的等效半径，则由 ES 的直接接地体与邻近接地体间组成的非闭合接地回路的电感 L_c 为

$$L_c = \frac{\mu_0}{2\pi} \int \frac{1}{r} ds = \frac{\mu_0}{2\pi} \int_{r_c}^w \frac{1}{r} (h \cdot dr) = \frac{\mu_0 h}{2\pi} \ln\left(\frac{w}{r_c}\right) \quad (17)$$

当母线充放电时，在非闭合回路中感生的充电高频电动势 E 和放电无振荡电动势 E' 都是非常快速的暂态电压，且都将作用在 GIS 外壳绝缘隔断部位的两侧，称之为瞬变电压。由式(9)和式(12)可得其表达式分别为

$$E \approx -M \times \frac{di_c}{dt} = \frac{M}{L} (U_0 - U_m \sin \varphi) e^{-\alpha t} \cos(\omega_0 t) \quad (18)$$

$$E' = -L_c \times \frac{di_c'}{dt} = -L_c \times \frac{U_0}{R_c^2 C} e^{-\frac{t}{R_c C}} \quad (19)$$

由式(18)可知，分、合断路器 GCB 或母线侧隔离开关 B-DS 给空载母线充电时，开关触头的一次(预)击穿在非闭合回路中感应的瞬变高频电动势 E 与电容 C (即管母线的长短)无关，与下列因素有关：

1) (预)击穿前母线上的残留电压 U_0 和(预)击穿时电源电压的相位角 φ 。

2) 电源的容量，即电源的电感 L_s (母线电感较

电源电感小得多， $L \approx L_s$)。

3) 非闭合回路的面积和位置。面积越大、距通流电路越近，互感 M 越大，瞬变电压 E 越高。

由式(19)可知，关合 GIS 接地开关泄放母线上的残余电荷时，非闭合回路感生的放电无振荡瞬变电压 E' 与母线上残留的直流电压 U_0 、非闭合回路的大小(决定了电感 L_c 的大小)、接地电阻 R_c 以及母线电容 C 均有关系。

示例 1：如果电源的电感 $L_s = 100 \text{ mH}$ ，母线上残存的电压 U_0 为相电压的峰值 450 kV ，图 1 右半部分所示矩形非闭合回路的宽 $w = 410 \text{ mm}$ 、高 $h = 1.2 \text{ m}$ ，导体中心到矩形回路近边中心的距离 $c = 230 \text{ mm}$ ，忽略电流互感器 CT 所占面积和母线的电感，则由式(16)可推算出非闭合回路与主回路间的互感 M 。

$$M = \frac{\mu_0 h}{2\pi} \ln \frac{c+w}{c} = \frac{\mu_0 \times 1.2}{2\pi} \ln \frac{640}{230} = 0.246 \mu\text{H} \quad (20)$$

由式(18)可推算出回路内感生的瞬变电压峰值 E_m 为

$$E_m = \frac{M}{L} (U_0 - U_m) = \frac{0.246}{100} \times 900 = 2.2 \text{ V} \quad (21)$$

某 GIS 设备，初设时在外置式 CT 的绝缘隔断部位没有配置跨接导流排，如图 1 左半部分所示，现场耐电压等验收试验都顺利完成，在正式的运行操作中在 CT 绝缘隔断部位时有出现弧光闪络和异常声响的情况，究其原因 CT 绝缘隔断两侧的接地壳体借助于大地(地网)形成了回路。

由于经地网形成的回路面积很大、且各具体变电站中的形状各异，使分合开关设备时在 CT 绝缘隔断两侧感应出的瞬变电压数值很高且多变、难以掌控。当该瞬变电压值大于 CT 绝缘隔断部位的空气隙能够耐受的电压值时，空气隙就会被击穿，目击可见的击穿部位弧光闪络、目击不到的击穿部位可以听见有异常响声。

改进的措施是在 CT 的绝缘隔断部位加装了跨接导流排，如图 1 的右半部分所示。加装跨接导流排的目的是缩小并规范非闭合回路的面积，以减小隔断部位承受的瞬变电压值并使之可控，如示例 1 中将该部位的瞬变电压值限定在 2.2 V 以内，从根本上消除了运行中 GIS 正常操作时可能在 CT 外壳绝缘隔断部位出现的弧光闪络和异常声响问题。

示例 2：图 5 所示为接地开关的接地回路。若直接接地体面积为 200 mm^2 ，即等效半径 $r_c = 8 \text{ mm}$ ，ES 接地端子的高度 $h = 3 \text{ m}$ ，ES 接地点与邻近接地点的距离 $w = 1 \text{ m}$ ，ES 关合的母线长度 4 m 、每米电

容 50 pF , 母线上的残留电压 $U_0 = 450 \text{ kV}$, 取接地电阻 $R_c = 10 \Omega$ 。则由式(15)可推算出借助于大地形成的包含 ES 绝缘引出部位在内的接地回路的电感 L_c 为

$$L_c = \frac{\mu_0 h}{2\pi} \ln\left(\frac{w}{r_c}\right) = \frac{\mu_0 \times 3}{2\pi} \ln\frac{1000}{8} = 2.9 \mu\text{H} \quad (22)$$

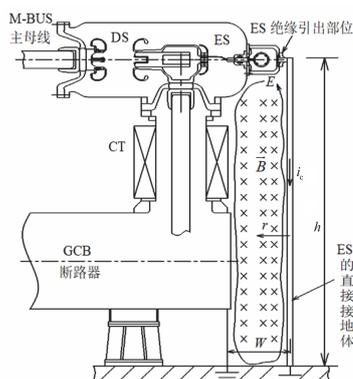
由式(17)可推算出 ES 动、静触头预击穿瞬间在绝缘引出部位两侧感生的瞬变电压初(峰)值 E'_m 为

$$E'_m = L_c \times \frac{U_0}{R^2 C} = 2.9 \cdot \frac{450}{10^2 \times 200} = 6.5 \times 10^7 \text{ V} \quad (23)$$

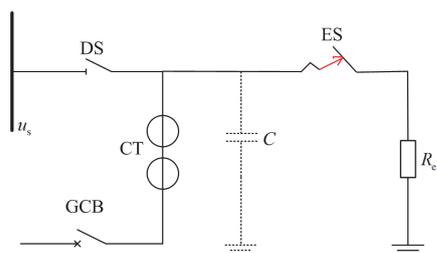
如此高的瞬变电压初值, 将会击穿 ES 绝缘引出部位的空气间隙, 出现如图 2 所示的弧光放电。

虽然 ES 预击穿放电时感生的瞬变电压初值 E'_m 很高, 但持续的时间极短, 数十纳秒内就将趋于 0。如图 5 中, ES 预击穿 50 ns 后的电压值 E' 可由式(8)推算出。

$$E' = E'_m \times e^{-\frac{t}{R_c C}} = E'_m \times e^{-\frac{50}{10 \times 200}} = 0.9 \text{ mV} \quad (24)$$



(a) 示意图



(b) 等效电路图

图 5 非闭合回路内感生电压示意图

Fig. 5 Diagrams of induced voltage in non-closed loop

最大的放电能量也就是母线电容 C 中存储的残压 U_0 为相电压峰值时的能量, 可由式(14)推算出:

$$W'_m = \frac{1}{2} C U_m^2 = \frac{1}{2} \times 200 \times 450^2 = 20.25 \text{ J} \quad (25)$$

可见放电的时间极短、能量极小, 不会对 GIS 外壳绝缘隔断部位的绝缘性能带来伤害。

4 现场各种弧光现象的说明及其消除措施

以上分析了开关设备操作过程中开关动、静触头间一次(预)击穿的情况, 然而由于 GIS 母线侧隔离开关 B-DS 的分合速度慢, 在一次分合操作中将会出现多次的重燃、重击穿^[19-21]。另外, GIS 用 B-DS 所开合的母线很短, 3~5 m, 断口出现(预)击穿时, 行波将很快行进到母线的末端, 并在末端发生折、反射^[22-23]。两者相佐将会在 GIS 的导体和壳体间形成幅值及频率都很高的 VFTO。

借助于互感, 主回路上行进的 VFTO 将会被耦合到 GIS 气室外的非闭合回路内, 形成次生 VFTO。当 GIS 外壳绝缘隔断部位两侧感应的次生 VFTO 值大于其空气间隙能够耐受的电压值时, 空气间隙就会被击穿, 出现弧光放电的现象。

对于现场某相绝缘隔断部位在现场 GIS 的开关操作中弧光放电的时时有时无问题, 缘于开关操作时空载母线上的残留电压 U_0 及合闸时工频相位角 φ 等的随机性存在, 使每次操作在绝缘隔断部位感应的次生 VFTO 值也具有随机性, 并非每次开关操作都会有弧光闪现。

对于现场同一位置三相开关设备的绝缘隔断部位, 在开关操作中弧光放电某相有、某相无的问题, 这主要是因为三相电源电压的相位角相差 120° 所致, 相位角相差 120° 不但使分闸后三相母线上残存的直流电压值 U_0 不同, 还使预击穿时的三相合闸相位角 φ 存在差异。

对于现场没有进行开关操作的间隔, 却在绝缘隔断部位出现弧光放电的问题, 这主要是因为 GIS 气室外回路中的瞬变电压和次生的 VFTO 都是电磁感应的结果, 在 GIS 的间隔距离较小时, 紧邻间隔的开关操作在本间隔的外壳隔断部位感应出了数值较高的次生 VFTO 所致。

对于结构相似的外壳绝缘隔断部位, 应用于低电压等级 GIS 时开关操作中无异常, 而应用于高电压等级 GIS 时却有弧光放电的问题。这主要是因为电压等级高时充放电的电流时变率大, 且电压等级高时非闭合回路的面积及互感也大, 从而在其绝缘隔断部位感生出数值较高的 VFTO 所致。

一旦绝缘隔断部位被弧闪短接, 非闭合回路瞬间就变成了闭合回路, 该瞬变闭合回路中流通有感生电流 i_i (下标 i 表示 induced), 感生电流又会产生感生磁密 B_i , B_i 的方向与充/放电电流产生的磁密 B 方向相反, 即 B_i 削弱了充/放电电流产生的磁密 B , 从而使回路中感生的电动势 E 瞬间减小, GIS 外壳绝缘隔断部位承受的电压降低, 弧闪消失; 继

而,绝缘隔断部位没有了弧闪的短接,也就没有了 i_i 及 B_i , 从而使回路中感生的电动势增大,又再次引发了绝缘隔断部位的弧闪。如此循环,虽使绝缘隔断部位“哗哗”弧闪频起,但每次弧闪都会消耗能量,最终使弧光消亡。

外壳绝缘隔断部位的弧光放电虽然可通过加大绝缘隔断部位的空气间隙提高气隙的电压耐受值来消除,但在产品定型后该措施很难付诸实施。对于运行中出现的弧光放电,最有效的措施是缩减包含 GIS 外壳绝缘隔断部位在内的回路面积,以减小回路的互感或电感,进而降低在隔断部位两侧感生的瞬变电压值和次生的 VFTO 值。

对于高电压等级的 GIS 设备,由于其形体尺寸较大,DS/ES 的配置位置较高,非闭合回路的面积难以缩减时,可考虑采用并接回路的措施。如图 6 所示,ES 的接地端子通过一旁路连接板就近并接到 GIS 壳体上后,消除了图 2 所示的 ES 合闸过程中的弧光放电。



图 6 ES 绝缘引出部位放电的消除措施
Fig. 6 Elimination measures of discharge at ES insulation leading out part

5 结论

通过以上分析,得出以下结论:

1) 当 GIS 开关设备开合空载母线时,由于有时变率极大的容性电流流过,致使在 GIS 外壳绝缘隔断部位的两侧感生出数值很高的瞬变电压和次生的 VFTO。

2) GIS 外壳绝缘隔断部位两侧的瞬变电压值和次生 VFTO 值,与母线充、放电时的电流时变率和回路间的互感或电感正相关,而回路的互感或电感取决于回路的面积及其相对位置。

3) 消除开关设备操作时绝缘隔断部位弧光放电的有效措施是缩减包含外壳绝缘隔断部位在内的回路面积,进而降低绝缘隔断部位两侧所承受的瞬

变电压值和次生的 VFTO 值。

4) 在 GIS 外置式电流互感器的绝缘隔断处加装跨接导流排,在接地开关的绝缘引出部位加装旁路连接板,可有效缩减回路面积、消除弧光放电。

5) 虽然 GIS 空载母线充放电时感应的瞬变电压和次生的 VFTO 值很高,但持续时间极短、能量极小,不会对 GIS 设备带来不良影响。

参考文献

[1] 张书琴. 套管型电磁式电流互感器及其应用[J]. 高压电器, 2012, 48(9): 117-122.
ZHANG Shuqin. Sleeve-type electromagnetic current transformer and its application[J]. High Voltage Apparatus, 2012, 48(9): 117-122.

[2] 王森, 牛博, 薛军, 等. 官亭 750 kV GIS 隔离开关操作时的特快速暂态过电压实测研究[J]. 高压电器, 2012, 48(1): 35-40.
WANG Sen, NIU Bo, XUE Jun, et al. Study on 750 kV GIS VFTO measurement technology[J]. High Voltage Apparatus, 2012, 48(1): 35-40.

[3] 杨喜龙, 穆双录, 王浩, 等. 特高压 GIS 用磁环型阻尼母线 VFTO 抑制性能试验研究[J]. 高压电器, 2024, 60(8): 77-84.
YANG Xilong, MU Shuanglu, WANG Hao, et al. Experimental study on VFTO suppression performance of magnetic ring damping bus for UHV GIS[J]. High Voltage Apparatus, 2024, 60(8): 77-84.

[4] 王磊, 刘衍, 冯宇, 等. 特高压 GIS 变电站 VFTO 波形衰减仿真研究[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(22): 45-51.
WANG Lei, LIU Yan, FENG Yu, et al. Simulation research on VFTO waveform attenuation in UHV GIS Substation[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(22): 45-51.

[5] 吴士普, 李璿, 臧英, 等. 550 kV GIS 站 VFTO 计算及抑制方法研究[J]. 高压电器, 2018, 54(1): 90-96.
WU Shipu, LI Xuan, ZANG Ying, et al. Study on VFTO calculation and inhibition method of 550 kV GIS station[J]. High Voltage Apparatus, 2018, 54(1): 90-96.

[6] 杨瑞, 贺恒鑫, 何俊佳. 陡波下 500 kV GIS 隔离开关室的暂态电场特性[J]. 南方电网技术, 2017, 11(8): 49-54.
YANG Rui, HE Hengxin, HE Junjia. Transient electric field characteristics for disconnector room of 500 kV GIS under steep wave[J]. Southern Power System Technology, 2017, 11(8): 49-54.

[7] 王奎钢, 何铮, 康超, 等. GIS 抽水蓄能电站 VFTO 下壳体电位抬升特性及影响因素研究[J]. 高压电器, 2023, 59(4): 125-131.
WANG Kuigang, HE Zheng, KANG Chao, et al. Study on characteristics and influencing factors of potential rise of enclosure under VFTO in GIS at pumped storage power station[J]. High Voltage Apparatus, 2023, 59(4): 125-131.

[8] 冯汝明, 车传强, 赵磊, 等. 500 kV 超高压 GIS 开关气室特快速暂态过电压与暂态壳体地电位升高试验研究[J]. 内蒙古电力技术, 2022, 40(5): 46-53.
FENG Ruming, CHE Chuanqiang, ZHAO Lei, et al. Experimental study on very fast transient overvoltage and

- transient earth voltage rise of 500 kV EHV GIS switch chamber[J]. Inner Mongolia Electric Power, 2022, 40(5): 46-53.
- [9] 闫琪, 张延泽, 陈小月, 等. 一起现场 TEV 引起的法兰故障[J]. 南方能源建设, 2022, 9(增刊 1): 83-91.
YAN Qi, ZHANG Yanze, CHEN Xiaoyue, et al. A flange failure caused by field TEV[J]. Southern Energy Construction, 2022, 9(S1): 83-91.
- [10] 陈宇, 周腊吾, 杨彬佑, 等. GIS 隔离开关操作引起内外暂态现象之间关联性研究[J]. 智慧电力, 2018, 46(8): 60-66.
CHEN Yu, ZHOU Lawu, YANG Binyou, et al. Correlation between internal and external transient phenomena resulted from disconnecter operation in GIS[J]. Smart Power, 2018, 46(8): 60-66.
- [11] 关永刚, 蔡元纪, 刘卫东, 等. GIS 隔离开关操作产生的壳体电位升高和 VFTO 关系[J]. 高电压技术, 2015, 41(12): 4097-4104.
GUAN Yonggang, CAI Yuanji, LIU Weidong, et al. Relationship between transient enclosure voltage and very fast transient overvoltage generated during disconnecter operations in gas insulated switchgear[J]. High Voltage Engineering, 2015, 41(12): 4097-4104.
- [12] 李振华, 贾思琦, 童悦, 等. 隔离开关动作过程特快速暂态电磁干扰变化特征及变化规律分析[J]. 高压电器, 2024, 60(2): 38-50, 61.
LI Zhenhua, JIA Siqi, TONG Yue, et al. Variation characteristics and law analysis of very fast transient electromagnetic interference during operation of disconnecter[J]. High Voltage Apparatus, 2024, 60(2): 38-50, 61.
- [13] 李振华, 廖星锐, 童悦, 等. 基于动态重燃弧模型的 VFTO 与 VFTC 仿真及特性分析[J]. 电力系统保护与控制, 2023, 51(3): 79-88.
LI Zhenhua, LIAO Xingrui, TONG Yue, et al. Simulation and characteristic analysis of VFTO and VFTC based on a dynamic reignition arc model[J]. Power System Protection and Control, 2023, 51(3): 79-88.
- [14] 段韶峰, 赵琳, 李志兵, 等. GIS 中 VFTO、VFTC 统计特性试验和仿真方法研究[J]. 电网技术, 2015, 39(12): 3634-3640.
DUAN Shaofeng, ZHAO Lin, LI Zhibing, et al. Experimental and simulation study on statistical characteristics of VFTO and VFTC in GIS[J]. Power System Technology, 2015, 39(12): 3634-3640.
- [15] 魏梅芳, 吴细秀, 余光召, 等. 1100 kV GIS 中 VFTC 的暂态特性研究[J]. 中国电力, 2016, 49(7): 1-8.
WEI Meifang, WU Xixiu, YU Guangzhao, et al. Study on transient characteristics of VFTC in 1100 kV GIS substation[J]. Electric Power, 2016, 49(7): 1-8.
- [16] 段韶峰, 李志兵, 詹花茂, 等. 252 kV GIS 中特快速瞬态过电压和特快速瞬态电流特性试验研究[J]. 电网技术, 2015, 39(7): 2046-2051.
DUAN Shaofeng, LI Zhibing, ZHAN Huamao, et al. Experimental study on the characteristics of VFTO and VFTC in 252 kV GIS[J]. Power System Technology, 2015, 39(7): 2046-2051.
- [17] 林莘, 孟涛, 田驰, 等. 550 kV GIS 内部快速瞬态过电压计算与分析[J]. 电气应用, 2009, 28(9): 58-61.
LIN Shen, MENG Tao, TIAN Chi, et al. Calculation and analysis of fast transient overvoltage in 550 kV GIS[J]. Electrotechnical Application, 2009, 28(9): 58-61.
- [18] 国家市场监督管理总局和国家标准化管理委员会. GB 20052—2020 电力变压器能效限定值及能效等级[S]. State Administration for Market Regulation and National Standardization Administration. Minimum allowable values of energy efficiency and the energy efficiency grades for power transformers: GB 20052—2020[S].
- [19] 刘卫东, 汪林森, 陈维江, 等. 特高压 GIS 特快速暂态过电压试验重复击穿过程研究[J]. 高电压技术, 2011, 37(3): 644-650.
LIU Weidong, WANG Linsen, CHEN Weijiang, et al. Investigation of the VFTO related repeated breakdown processes in UHV GIS[J]. High Voltage Engineering, 2011, 37(3): 644-650.
- [20] 赵琳, 叶丽雅, 詹花茂, 等. GIS 隔离开关特快速瞬态过电压试验重复击穿全过程仿真模型研究[J]. 高压电器, 2020, 56(11): 130-138.
ZHAO Lin, YE Liya, ZHAN Huamao, et al. Investigation of repeated breakdown process during very-fast transient overvoltage test of overall switching process of disconnecter in GIS[J]. High Voltage Apparatus, 2020, 56(11): 130-138.
- [21] 张普, 莫付江, 刘欣桐, 等. GIS 中隔离开关多次重燃弧模型计算与分析[J]. 高压电器, 2023, 59(1): 30-37.
ZHANG Pu, MO Fujiang, LIU Xintong, et al. Calculation and analysis of multiple reignition arc model of disconnecter in GIS[J]. High Voltage Apparatus, 2023, 59(1): 30-37.
- [22] 刘国胜, 李泽文, 夏翊翔, 等. 基于电流行波高频能量比值的全并联 AT 牵引网单端故障定位方法[J]. 电力系统保护与控制, 2024, 52(6): 99-108.
LIU Guosheng, LI Zewen, XIA Yixiang, et al. Single-end fault localization method for an all-parallel AT traction network based on high-frequency energy ratio of current traveling waves[J]. Power System Protection and Control, 2024, 52(6): 99-108.
- [23] 王艳婷, 莫文斌, 白明远, 等. 基于电压行波波形特征的柔性直流输电线路雷击识别方法[J]. 电力系统保护与控制, 2024, 52(8): 31-44.
WANG Yanting, MO Wenbin, BAI Mingyuan, et al. Lightning interference identification method based on voltage traveling wave waveform characteristics for flexible DC transmission lines[J]. Power System Protection and Control, 2024, 52(8): 31-44.

收稿日期: 2024-06-06; 修回日期: 2024-08-20

作者简介:

张书琴(1966—), 女, 硕士研究生, 正高级工程师, 研究方向为 GIS 研发及设计制造; E-mail: 13781873969@163.com

买小飞(1990—), 男, 通信作者, 硕士研究生, 工程师, 研究方向为 GIS 研发及设计制造。E-mail: 17737087862@163.com

(编辑 魏小丽)