

界竹口水电站气体绝缘变电站 (GIS) 接地故障计算分析

Calculation and analysis of grounding fault in gas insulated substation (GIS) of

Jiezhukou Hydropower Station

鲁梦秋

Mengqiu Lu

国电福建省大樟溪界竹口水电有限公司 中国·福建 永泰 350700

Guodian Fujian Dazhangxi Jiezhukou hydropower Co., Ltd, Yongtai, Fujian, 350700, China

摘要: GIS 设备是水电站应用非常广泛的一种高压配电装置, 在长期运行过程中会有运行故障出现。本文对水电站 GIS 接地故障进行认真归纳总结, 以界竹口水电站 GIS 电流计算为例, 详细介绍了 GIS 设备故障时计算分析。

Abstract: GIS equipment is a kind of high-voltage power distribution device widely used in hydropower station, and there will be operation failure in the long-term operation process. In this paper, the GIS grounding fault of hydropower station is summarized. Taking the GIS current calculation of Jiezhukou hydropower station as an example, the calculation and analysis of GIS equipment fault are introduced in detail.

关键词: 水电站; GIS; 故障分析; 接地

Key words: hydropower station; GIS; fault analysis; grounding

DOI: 10.36012/etr.v2i9.2661

引言: 水电站气体绝缘变电站 (Gas Insulated Substation), 简称 GIS, 采用全封闭组合电器的变电站。GIS 是一种结构紧凑的单元成套装置密封于接地的金属壳内, 内部的绝缘介质一般为 SF₆。接地系统是构成 GIS 的重要组成部分, 对于水电站安全运行起着十分重要的作用。气体绝缘变电站需要承受相当大的接地故障电流, 也要求具有与常规变电站同样低的接地电阻^[1]。由于 GIS 的紧凑结构特征和短尺寸, 开关装置操作或故障时的 SF₆ 气体的击穿将产生高频暂态, 它将耦合进入接地系统。在水电厂运行的时候, 这些暂态将引起高幅值短时延的地电位升, 同时也会作为 GIS 的电磁干扰源。GIS 的接地一方面要考虑要占地面的结构特征, 另外一方面也要考虑到外壳环流, 还要考虑到开关操作或故障时的高频暂态的抑制。

1 GIS 的典型故障

水电站在日常维护和检修过程中, 经常出现多重返回路径和相当大的相互耦合。实际情况中, GIS 的典型接地故障可分为基本的三类: 一是 GIS 的内部故障, 二是靠近 GIS 的外部故障, 三是远离 GIS 的外部故障。在实际分析计算时, 已知参数有限, 远离 GIS 的故障可采用下面所述简化的方

法进行粗略估计^[2]。

1.1 GIS 的内部故障

第一种情况为在靠近 GIS 电源的一端外壳接地, 而在远离电源的另一端发生母线对外壳的闪络。这种情况下, 母线只在外壳外部产生一个很小的磁场, 而母线产生的磁通量仍保持在起同轴电缆作用的外壳内部。此时, 外壳电阻和电感两者都应该加以考虑。外壳电阻和电感产生的电阻电压降 U_{eR}、电感电压降 U_{eL}、总电压降 U_e 分别为:

$$U_{eL} = 1RI \quad (1)$$

$$U_{eL} = jI(4.61I\omega \times 10^{-7}) \lg \frac{(r-r_0)^2}{r_0} \quad (2)$$

$$U_e = \sqrt{U_{eR}^2 + U_{eL}^2} \quad (3)$$

式中 I 为外壳长度; R 为单位长度的外壳电阻; I 为内部母线的电流; ω 为角频率; r₀ 为内部母线的有效半径, 一般取 r₀ 为 0.45d; d 为母线的直径; r 为外壳的几何平均半径, 取内径和外半径和的一半。

第二种情况为远离电源的一端外壳接地, 在靠近电源一端发生母线对外壳的闪络。与上述情况相反, 这时外壳的

【作者简介】 鲁梦秋, (1993~), 男, 湖北随州人, 助理工程师, 大学本科, 从事水电站机电专业管理研究。

电感效应是主要的，电阻可以忽略不计，此时电压降 U_e 为：

$$U_e = jI(4.61\omega l \times 10^{-7}) \lg \frac{2h}{r} \quad (4)$$

其中 h 为母线相对地的高度。

第三种情况为 GIS 外壳在两端接地，母线在中部发生对外壳的闪络。在母线两端之间任何地方发生接地故障时，接地故障电流将按照故障点两边的对地阻抗 Z_A 和 Z_B 来划分。因此只要左右两侧相应的电流满足下面条件，则纵向电压降最大。

$$U = Z_A I_A \quad (5)$$

$$U = Z_B I_B \quad (6)$$

故障点距离两端接地点的外壳长度分别为：

$$I_A = \left(\frac{1 - \sqrt{Z_A / Z_B}}{1 - Z_A / Z_B} \right) L_{AB} \quad (7)$$

$$I_B = \left(\frac{1 - \sqrt{Z_B / Z_A}}{1 - Z_B / Z_A} \right) L_{AB} \quad (8)$$

式中 L_{AB} 为外壳直接的长度，根据上述式子计算边可推算出故障点的位置，从而便于运行检修维护。

1.2 GIS 的外部故障

对于一般连续型母线外壳设计来说，三相外壳在两端互相连接，可以认为所有外壳电流都可以通过临近其他的外壳返回，而没有感应电流流入大地，即无感应电流通过大地形成闭合回路。一般来说，三条母线的平面间距相等，各外壳所形成的回路是彼此重叠的，二者共有中间相的 GIS 的外壳，并分别与带电的导体耦合。当外部故障点流入内母线的电流已知，通常根据经验，中相导体出现故障时的外壳电流比外侧故障时计算得到的外壳电流大 0.1~0.15。

如果确定了单相对地故障的感应电流，即可用叠加原理来确定双相或者三相故障时在外壳中流过的电流，即可用叠加原理来确任意双相或者三相故障时在外壳中流过的电流。在以往的运行经验中分析，应该注意相间故障时，故障电流的相角差为 180° ，三相故障时的相角差为 120° [3]。

2 界竹口故障时外壳电流计算示例

如图 1 所示为界竹口水电站 GIS 的结构示意图。该结构图（只画出了一半结构图）由电缆馈电、断路器、GIS 组成，在另一端与架空线路相连。查阅相关资料，电源频率为 50Hz，外壳半径 $r=0.157\text{m}$ ，接地连接带的等值半径 r_e 为 0.0227m ，母线直径 d 为 0.0889m ，母线间距 S 为 2.13m ，母线对地高度 h 为 3.96m ， r_0 为 $0.45d=0.04\text{m}$ 。外壳电阻为 $R_e=3.16\mu\Omega/\text{m}$ ，

母线电流为 $I=50\text{kA}$ 。GIS 发生内部故障时，母线在中部发生对外壳的闪络情况进行分析，单位外壳长度的阻抗为：

$$Z_A = j4.61 \times 2\pi f \times 10^{-7} \lg(2h/r)$$

$$= j4.61 \times 314 \times 10^{-7} \lg(2 \times 3.96/0.157) = j0.247 \times 10^{-3} (\Omega/\text{m})$$

$$Z_B = R_e + j4.61 \times 2\pi f \times 10^{-7} \lg[(r-r_0/r)^2/r_0]$$

$$= 3.16 \times 10^{-6} + j4.61 \times 314 \times 10^{-7} \lg[(0.157-0.04)^2/(0.157 \times 0.04)]$$

$$= 3.16 \times 10^{-6} + j4.9 \times 10^{-5} = j4.9 \times 10^{-5} (\Omega/\text{m})$$

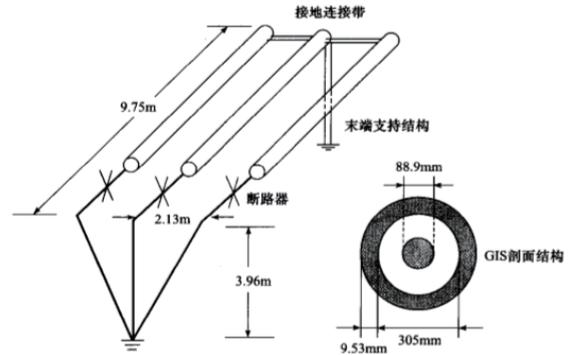


图 1 GIS 的结构示意图

根据运行检修情况，故障发生在中间相，这是最严重的故障情况。我们可以将接地连接带换算为等效的外壳长度，得到的外壳长度 L_{AB} 为：

$$L_{AB} = 9.75 + 3.96 + 2.13 \lg(2h/r_e) / \lg(2h/r) = 16.88\text{m}$$

根据式 (7) 和式 (8) 可以计算得到 $L_A=5.20\text{m}$ ， $L_B=11.68\text{m}$ 。外壳长度 L_A 和 L_B 分别对应阻抗为：

$$Z_A = z_A L_A = 1.28 \times 10^{-3} \Omega, \quad Z_B = z_B L_B = 1.28 \times 10^{-3} \Omega$$

Z_A 和 Z_B 在故障电流作用下为并联，因此流过外壳的电流 I_A 和 I_B 分别为：

$$I_A = Z_B / (Z_A + Z_B) I = 15.4\text{kA}, \quad I_B = I - I_A = 50\text{kA} - 15.4\text{kA} = 34.6\text{kA}$$

外壳的最大电压降为：

$$U = I_A Z_A = 19.7\text{V}$$

3 结论

本文结合界竹口水电站运行检修的实际情况，对 GIS 设备存在的接地故障问题进行归纳分析，总结经验教训，为今后出现类似问题的处理提供参考。

参考文献

- [1] 何金良, 陈先禄, 张金玉. 220kV 的 GIS 变电站的雷电过电压保护特性, 1991, 27(1):37-40.
- [2] T.H.Dodds,H,E,Spindle.Grounding of Gas Insulated Substation. IEEE Trans.on PAS,1975,94(4):1183-1191.
- [3] 樊渊. 变电站 GIS 组合开关常见故障及处理措施研究 [J]. 北京电力高等专科学校学报 (自然科学版), 2011,(12).181-181.