

DOI:10.13296/j.1001-1609.hva.2016.07.030

GIS 工程中接地系统仿真计算的应用及技术探讨

火恒章, 夏廷君, 郑玉林, 王全海

(西安西电开关电气有限公司, 西安 710077)

摘要: 气体绝缘金属封闭开关设备(gas insulated metal-closed switchgear, GIS)是一种结构紧凑的多元件组合的开关装置,为保证其正常、可靠的运行, GIS的接地网应具有承载正常额定电流能力,也需承载短路故障电流的能力。在GIS工程设计时,应合理的进行GIS接地系统的设计和布置,使其利于降低GIS接触电压、短路故障电流和感应电流,保证工作人员和开关设备的安全。笔者结合工程,利用EMTDC仿真计算软件,对上述GIS接触电压、短路故障电流和感应电流进行了计算及探讨,并得出结论,对结论进行了分析并采取了应对措施以满足工程需求。

关键词: GIS; EMTDC; 接触电压; 短路故障电流; 感应电流; 接地系统

Application and Technology of the Simulation and Calculation of Grounding System in GIS Project

HUO Hengzhang, XIA Tingjun, ZHENG Yulin, WANG Quanhai

(Xi'an XD Switchgear Electric Co., Ltd., Xi'an 710077, China)

Abstract: Gas insulated metal enclosed switchgear (GIS) is a compact multi-element combination switch device, in order to ensure the normal and reliable operation, the GIS grounding grid should be carrying with normal rated current capability, also need the load-carrying capacity of a short-circuit fault currents. In the design of GIS engineering, the design and layout of the GIS grounding system should be reasonable, which can reduce the contact voltage of GIS, short-circuit fault current and induced current, ensure the safety of the staff and switchgear. Combining with engineering, using EMTDC simulation software, this paper calculates and discusses the GIS contact voltage, short-circuit fault current and induced current, and draws the conclusion. The conclusion is analyzed and the corresponding measures are taken to meet the engineering requirements.

Key words: GIS; EMTDC; contact voltage; short circuit fault current; induced current; grounding system

0 引言

在近几十年中,气体绝缘金属封闭开关设备以其运行可靠性高、占地面积小、维护量少及检修周期长的优点得到了广泛应用。在GIS中,载流导体被封闭于接地的金属壳体内,金属壳体内充满了具有一定压力的SF₆气体,导体与外壳之间的距离很近。正是由于GIS的这种紧凑结构,使GIS的接地显得尤为重要。在GIS工程设计中,正确的设置接地线,应用仿真计算软件,模拟GIS在现场实际的运行情况,为保证设备正常运行及人员安全^[1-3]奠定

基础。

文中通过例举 550 kV GIS 工程的计算实例,阐述 GIS 电站工程接地系统情况。该工程额定电流 4 000 A, 额定短时耐受电流 63 kA, 短路电流持续时间 3 s, 主接线见图 1, 通过建立等效模型, 计算分析 GIS 接触电压、短路故障电流及感应电流^[4]。

1 EMTDC 仿真软件简介

文中使用的仿真计算软件是 EMTDC^[5](electronic magnetic transient in DC system),它是世界上被广泛使用的一种电力系统分析软件,用户可建立不同系统的精确模型,进行电力系统时域和频域计算仿

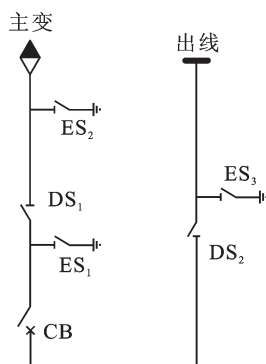


图1 主接线

Fig. 1 Main connection

真,文中利用该软件对 550 kV GIS 工程接地系统^[6-7]进行了计算。

2 理论允许值

2.1 允许的最大接触电压

评估接地系统性能的第一安全标准是接触电压,接触电压通常定义为地表上一点,即人员站立的地方和该人员接触的暴露的金属表面的电位差。一般来说,合理设计的 GIS 在外壳接地后,其故障期间设备外壳与其他接地的建筑物之间的电位差不会超过 60~130 V^[8]。

对于人体体重 50 kg 和 70 kg 对应的金属—金属允许接触电压分别为:

$$U_{T50}=116/\sqrt{t}=67 \text{ V}^{[9]}; \quad (1)$$

$$U_{T70}=157/\sqrt{t}=90.6 \text{ V}。 \quad (2)$$

2.2 接地铜排允许的短路故障电流

GIS 短路故障时,接地铜排故障电流的允许值可根据 DL/T 621—1997^[10]计算得到

$$I=\frac{S \cdot M}{\sqrt{t}} \cdot \sqrt{\ln(1+\frac{\theta_t-\theta_i}{B+\theta_i})}。 \quad (3)$$

式(3)中: I 为通过铜排的故障电流,A; S 为铜排截面积,300 mm²; t 为最长短路时间,3 s; M 为铜材料常数,226; θ_i 为导体起始温度,取 40 ℃; θ_t 为导体最终温度,取 1 083 ℃; B 为导体在 0 ℃时的电阻温度系数倒数,取 234.5 ℃(电阻温度系数:表示电阻当温度改变 1 ℃时,电阻值的相对变化,紫铜电阻温度系数取 $\frac{1}{234.5 \text{ ℃}}$)。

由于该 550 kV GIS 站设计中,短路持续时间为 3 s,铜排截面积为 50 mm×6 mm,根据上式计算可得允许通过铜排的故障电流为 49 kA。如果使用 2 根,允许耐受 98 kA 故障电流。

2.3 外壳允许感应电流最大值

对于三相分相式感应电流一般允许不大于设

备额定电流的 80%,具体数值与母线长短、母线尺寸、母线相间距离及母线高度有关,该 550 kV GIS 工程计算实例允许感应电流最大值为 4 000 A×80%=3 200 A。

3 接触电压、短路故障电流及感应电流计算模型的建立

3.1 计算模型的建立

为了评估 GIS 接地设计是否安全和合适,GIS 站内的接触电压是必不可少的,计算接触电压必须首先确定 GIS 接地系统地网结构。

550 kV GIS 的接地形式通常采用 GIS 多点接地,为多层结构,上层地网为敷设于 GIS 混凝土基础之上的(50 mm×6 mm)铜排网格,见图 2,铜排通过 GIS 混凝土基础上的接地下引点(交点)与下层地网相连。



图2 明敷于 GIS 混凝土基础之上的(50 mm×6 mm)铜排网格示意图

Fig. 2 The application on GIS concrete foundation (50 mm×6 mm) schematic diagram of copper grid

下层为敷设在 GIS 室混凝土底板内的网格状地网,埋深为 0.6 m。地网再通过扁钢与地下电缆廊道的混凝土网格状地网及主变压器室的混凝土网格状地网相连,最后通过扁钢与主厂房的主接地网连接。

依据工程的主接线图建立相应的 EMTDC 仿真电路模型进行后续计算。

3.2 土壤结构模型

根据上述情况,由于混凝土基础的存在需要特殊的建模方法,对所有的钢筋进行有效的计算或分析是不可能的。所以,对混凝土楼板进行分区建模。将 GIS 的接地结构等效为一个 3 层土壤结构模型的接地网,见图 3。土壤特性见表 1^[11]。

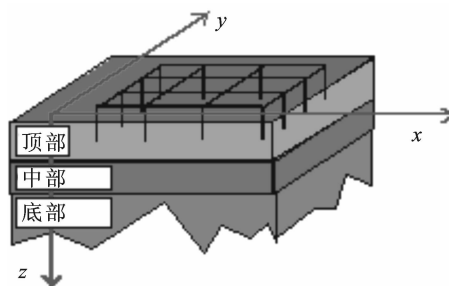


图3 GIS 接地系统的等效 3 层土壤结构模型

Fig. 3 Equivalent three layer soil structure model of GIS grounding system

表1 土壤特性

Table 1 Soil properties

分层	电阻率/($\Omega \cdot m$)	厚度/ m	相对磁导 率/p.u.	相对介电 系数/p.u.
空气	1.0×10^{18}	无穷大	1	1
顶层	0.2	0.6	1	1
中心	1 000.0	1.5	1	1
底层	500.0	无穷大	—	1

第1层(顶层)为电阻率较低的传导性混凝土层,电阻率为 $0.2 \Omega \cdot m$,深度 0.6 m;第2层(中心)为电阻率为 $1\,000 \Omega \cdot m$ 的混凝土层;第3层(底层)为电阻率为 $500 \Omega \cdot m$ 的土壤层。

3.3 接地网结构模型

接地网模型^[12-13]结构为两层,第1层为明敷于 GIS 混凝土基础之上的(50 mm×6 mm)铜排网格,第2层为埋深为 0.5 m 的扁钢。实际设计中第2层地网是通过扁钢与地下电缆廊道的混凝土网格状地网及主变压器室的混凝土网格状地网相连后与主厂房的主接地网连接,由于缺乏厂房主接地网的相关参数,地网模型中没有考虑第3层地网的情况,且只考虑两层地网模型结构的计算值是偏于保守的。

3.4 电路模型

以 550 kV GIS 工程一段变压器至出线线路进行研究,其电路仿真简图见图4。

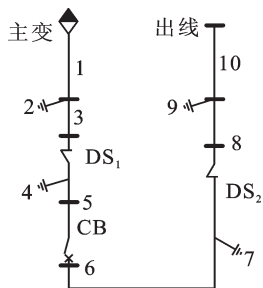


图4 主变→出线计算电路仿真简图

Fig. 4 The main transformer and outlet circuit simulation calculation diagram

4 仿真计算结果及分析

4.1 接触电压及短路故障电流仿真计算结果及分析

4.1.1 接触电压及短路故障电流仿真结果

由于 GIS 外壳是多点分段接地^[14],对于故障段采用图5的形式表征;而对故障段之外的非故障段,这时外壳及接地系统感应本段流过的部分的短路电流,这部分仍可采用变压器等效的形式计算。

对 GIS 的内部短路故障引起的接触电压及短路故障电流^[15-16]计算,这里采用工况最差的情况进行,结果见表2。

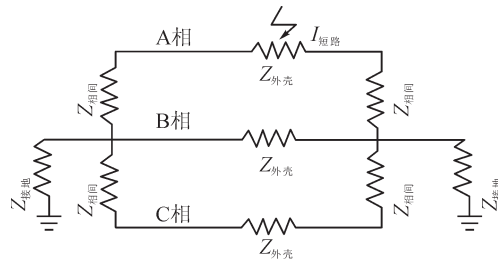


图5 GIS故障段的电路等效图

Fig. 5 Circuit equivalent diagram of GIS fault section

表2 A相内部短路故障引起的接触电压及短路故障电流

Table 2 Contact voltage and short circuit fault current caused by internal short circuit faults of A

接地点 编号	实际对应点	接触电 压/V	接地铜排最大 电流/kA
1	进线套管三相短接接地线	62.4	34.5
2	进线套管接地铜排	59.7	24.8
3	分支母线接地铜排	42.5	11.2
4	DS接地铜排	30.1	8.5
5	CB上接地铜排	7.8	0.8
6	CB下接地铜排	9.6	2.4
7	DS接地铜排	24.5	9.7
8	分支母线接地铜排	34.1	14.7
9	出线套管接地铜排	49.8	20.4
10	出线套管三相短接接地线	57.6	28.6

注:表2中的编号和图4中的编号一致。

4.1.2 接触电压及短路故障电流仿真计算分析

最大接触电压及短路故障电流值主要分布在进出线套管接地线和套管三相短接接地线处。

从表2接触电压及短路故障电流仿真计算结果可知:

1)短路故障时接触电压最大为 62.4 V,小于人体体重 50 kg 为 67 V(见式(1))和 70 kg 为 90.6 V(见式(2)),在人体可承受范围内;

2)接地铜排最大短路故障电流 34.5 kA,小于 49.0 kA(见式(3))的允许值。

4.2 感应电流的仿真计算结果及分析

1)感应电流的仿真计算同上述 4.1 条的计算,同样以 550 kV GIS 相同段变压器至出线线路进行研究,短路故障电流仿真计算结果见表3。

2)感应电流的仿真计算分析。由表3感应电流计算结果可知,感应电流最大集中在进、出线套管的三相短接接地线处,感应电流最大为 2 543.2 A,小于外壳允许感应电流 3 200 A。

5 结论

利用 EMTDC 仿真软件,对 550 kV GIS 常见的间隔进行了接地系统接触电压、短路故障电流及感

表 3 变压器→出线的感应电流

Table 3 Induced current of transformer and outlet

外壳回路编号	实际对应位置	感应电流/A		
		A相	B相	C相
1	进线套管三相短接接地线	2 543.2	2 451.9	
2	进线套管接地铜排	892.4	736.8	783.4
3	分支母线接地铜排	324.4	259.5	305.8
4	DS接地铜排	211.5	198.4	203.6
5	CB上接地铜排	156.7	152.0	164.5
6	CB下接地铜排	145.7	140.2	144.8
7	DS接地铜排	198.9	185.2	201.4
8	分支母线接地铜排	321.0	299.5	315.7
9	出线套管接地铜排	856.4	672.8	798.5
10	出线套管三相短接接地线	2 501.2	2 398.6	

注:表 3 中的编号和图 4 中的编号一致。

应电流计算,根据计算结果,得出以下几点结果及采取的措施:

1)GIS 内部发生短路故障时,故障时外壳上接触电压最大值为 62.4 V,在人体可接受的范围内;

2)流过三相短路铜排和接地铜排的最大短路故障电流可达到 34.5 kA,均在允许范围内;

3)感应电流最大出现在进出线套管处,套管处三相短接铜排上最大感应电流为 2 543.2 A,接地引线铜排上流过的最大的感应电流为 892.4 A。

套管处建议采用截面积大于 750 mm² 的铜排进行三相短接,套管处支架选取两处接地点。

接地系统作为 GIS 产品重要组成部分,其形式随 GIS 的主接线及布置不同而变化多样,本文仅仅是其中的一种多点接地布置形式,今后此项工作我们还将继续进行下去,以积累更多 GIS 的基础研究数据,为 GIS 安全运行提供保证。

参考文献:

- [1] 李 谦,肖磊石,饶章权. 数值仿真在变电站接地网安全性状态评价中的应用[J]. 高压电器,2013,49(10):133-140.
LI Qian, XIAO Leishi, RAO Zhangquan. Application of numerical simulation in security valuation of substation grounding grids[J]. High Voltage Apparatus, 2013, 49(10): 133-140.
- [2] DL/T 596—1996 电力设备预防性试验规程[S].1996.
DL/T 596—1996 Rules of preventive tests for electric power equipment[S].1996.
- [3] 李 谦,张 讯. 500 kV 鸭溪变电站接地网安全性状态评估[J]. 贵州电力技术,2012,15(1):8-11.
LI Qian, ZHANG Xun. The security condition evaluation of grounding grid for 500 kV Yaxi Substation[J]. Guizhou

Electric Power Technology, 2012, 15(1):8-11.

- [4] 姚金霞,郭志红,朱振华,等. 500 kV 同塔双回线路感应电压、电流的研究[J]. 华北电力技术,2006,1(1):23-25.
YAO Jinxia, GUO Zhihong, ZHU Zhenhua, et al. Research on inductive voltage and inductive current of 500 kV double-circuit transmission line[J]. North China Electric Power, 2006, 1(1):23-25.
- [5] 施 围. EMTDC 介绍[J]. 高压电器,1993,29(1):34-38.
SHI Wei. EMTDC introduction[J]. High Voltage Apparatus, 1993, 29(1):34-38.
- [6] 陈 立,廖家俊,曹晓斌,等. 变电站对地短路时接地网转移电位差对铠装电缆影响的研究[J]. 高压电器,2014(10):43-48.
CHEN Li, LIAO Jiajun, CAO Xiaobin, et al. Influence analysis on shielded cables caused by diverting potential difference of grounding grid during short circuit to earth[J]. High Voltage Apparatus, 2014(10):43-48.
- [7] 李景禄,胡 毅,刘春生. 实用电力接地系统技术[M]. 北京:中国电力出版社,2002.
LI Jinglu, HU Yi, LIU Chunsheng. Practical grounding technology in power system[M]. Beijing:Chinese Electric Power Press, 2002.
- [8] GB/T 3805—2008 特低电压(ELV)限值[S].2008.
GB/T 3805—2008 Extra-low voltage(ELV)-limit values[S]. 2008.
- [9] IEEE Std 80—2000 交流变电站接地安全指南[S].2000.
IEEE Std 80—2000 Guide for safety in AC substation grounding[S].2000.
- [10] DL/T 621—1997 交流电气装置的接地[S].1997.
DL/T 621—1997 Grounding for AC electrical installations [S].1997.
- [11] GB/T 17949.1—2000 接地系统的土壤电阻率、接地阻抗和地面电位测量导则 第一部分:常规测量[S].2000.
GB/T 17949.1—2000 Guide for measuring earth resistivity, ground impedance and earth surface potentials of a ground system-part 1:Normal measurements[S].2000.
- [12] 李中新,袁建生,张丽萍. 变电站接地网模拟计算[J]. 中国电机工程学报,1999,19(5):76-79.
LI Zhongxin, YUAN Jiansheng, ZHANG Liping. Numerical calculation of substation grounding systems[J]. Proceedings of the Cehinese Society for Electrical Engineering, 1999, 19(5):76-79.
- [13] 谭 泼,杨建军,文习山,等. 高土壤电阻率地区大型水电站接地系统设计[J]. 高电压技术,2011,37(10):2485-2490.
TAN Bo, YANG Jianjun, Wen Xishan, et al. Safety design principle of grounding system in large hydropower station in the area of high soil resistivity[J]. High Voltage Engineering, 2011, 37(10):2485-2490.
- [14] GB 50065—2011 交流电气装置的接地设计规范[S].

(下转第 201 页)

- failure checking of SF₆ electrical equipment[J]. Electric Power, 2001, 34(1): 78-81.
- [11] IEC 62271-203—2003 额定电压 52 kV 及以上气体绝缘金属封闭开关设备[S]. 2003.
- IEC 62271-203—2003 Gas-insulated metal-enclosed switchgear for rated voltage above 52 kV[S]. 2003.
- [12] 刘佳, 朱华, 仝松利, 等. 气体分析技术在 SF₆ 设备内部故障判断中的应用[J]. 河南电力, 2009(1): 32-34.
- LIU Jia, ZHU Hua, TONG Songli, et al. The application of gas analysis technique on line fault judgment of equipments[J]. Henan Electrical Power, 2009(1): 32-34.
- [13] 游荣文, 黄逸松. 基于 SO₂、H₂S 含量测试的 SF₆ 电气设备内部故障的诊断[J]. 福建电力与电工, 2004(2): 15-16.
- YOU Rongwen, HUANG Yisong. Diagnosis of internal faults in SF₆ electrical equipments based on measuring SO₂ and H₂S[J]. Fujian Electric Power and Electrical Engineering, 2004(2): 15-16.
- [14] 毕玉修, 卞超. 应用 SF₆ 气体分解产物进行电气设备故障诊断的探讨[J]. 江苏电机工程, 2007, 26(5): 14-17.
- BI Yuxiu, BIAN Chao. Research on electric equipment fault diagnosis applied on SF₆ decomposing gases[J]. Jiangsu Electrical Engineering, 2007, 26(5): 14-17.
- [15] 王向阳. SF₆ 断路器故障分析[J]. 高压电器, 2001, 37(5): 22-24.
- WANG Xiangyang. Fault analysis of hydraulic actuator for SF₆ circuit breaker[J]. High Voltage Apparatus, 2001, 37(5): 22-24.
- [16] 史方颖, 周仙娥, 于兵. “O”形密封结构在 SF₆ 高压电器设备中的设计及应用[J]. 电力电容器与无功补偿, 2014, 35(5): 60-64.
- SHI Fangying, ZHOU Xian'e, YU Bing. Design and application of “O”-shaped sealing structure in SF₆ high voltage electrical equipment[J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2014, 35(5): 60-64.
- [17] 尚耀辉, 赵建洲, 刘亚亚, 等. 油纸绝缘电流互感器的绝缘设计[J]. 电力电容器与无功补偿, 2009, 30(3): 25-27.
- SHANG Yaohui, ZHAO Jianzhou, LIU Yaya, et al. The insulation design of oil paper insulated current transformer[J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2009, 30(3): 25-27.
- [18] 陈新岗, 李凡. 避雷器故障的红外诊断研究[J]. 电瓷避雷器, 2003(6): 34-37.
- CHEN Xingang, LI Fan. Infrared diagnosis of lightning arrester fault[J]. Insulators and Surge Arresters, 2003(6): 34-37.
- [19] 李政文. 110 kV GIS 用金属外壳氧化物避雷器的研制[J]. 电瓷避雷器, 2001(5): 36-39.
- LI Zhengwen. Development of metal shell oxide surge arrester for 110 kV GIS[J]. Insulators and Surge Arresters, 2001(5): 36-39.
- [20] 全永利, 邬建雄, 张波. 电容器组合介质介电常数与压紧系数关系分析[J]. 电力电容器与无功补偿, 2012, 33(2): 35-37.
- QUAN Yongli, WU Jianxiong, ZHANG Bo. Analysis of capacitor combination of dielectric constant and compressing coefficient relationship[J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2012, 33(2): 35-37.
- [21] 顾宏. SF₆ 气体绝缘环网柜与固体绝缘环网柜对比分析[J]. 电器与能效管理技术, 2014(23): 65-66.
- GU Hong. Comparative analysis of SF₆ gas insulated ring network cabinet and solid insulated ring network cabinet[J]. Electrical & Energy Management Technology, 2014(23): 65-66.
- [22] 黄良, 吕黔苏, 杨涛, 等. 智能变电站状态监测通信体系设计[J]. 电器与能效管理技术, 2014(4): 42-44.
- HUANG Liang, LYU Qiansu, YANG Tao, et al. Design of intelligent substation state monitoring communication system[J]. Electrical & Energy Management Technology, 2014(4): 42-44.

潘臻(1987—), 男, 工程师, 主要研究方向为高电压技术。

(上接第 195 页)

- 2011.
- GB 50065—2011 Code for design of AC electrical installations earthing[S]. 2011.
- [15] 傅智为, 许军, 林一泓, 等. 一起 500 kV 输变电工程启动调试中 HGIS 短路事故的分析研究[J]. 高压电器, 2014, 10(9): 89-93.
- FU Zhiwei, XU Jun, LIN Yihong, et al. Analysis on a short accident of HGIS in start debugging process of the 500 kV power transmission project[J]. High Voltage Apparatus, 2014, 10(9): 89-93.
- [16] 方静, 陈海焱. 变电站接地的现状及相关设计技术的探讨[J]. 华东电力, 2009, 37(12): 2010-2015.
- FANG Jing, CHEN Haiyan. Status quo of substation grounding and related design technology[J]. East China Electric Power, 2009, 37(12): 2010-2015.
- 火恒章(1976—), 男, 工程师, 主要从事 363~800 kV GIS 研发及工程设计。