

750 kV GIS 中快速暂态过电压的研究

金青¹, 余芳¹, 郭洁², 赵珊³

(1. 西安电力高等专科学校, 陕西 西安 710023; 2. 西安交通大学电气工程学院高压教研室, 陕西 西安 710049;
3. 延安供电局, 陕西 延安 716000)

摘要: 随着超高压气体绝缘变电站(GIS)的广泛使用,由隔离开关(DS)和断路器(CB)操作引起的快速暂态过电压(VFTO)引发的绝缘事故也越来越多。以西北地区 750 kV 官亭 GIS 变电站为计算原型,利用电磁暂态程序(EMTP)对不同运行方式下 GIS 设备上的 VFTO 进行了数值仿真计算和分析,从而获得不同运行方式和操作方式下各节点的 VFTO 电压幅值、频率、陡度和波形等数据。根据计算数据对 GIS 和连接设备的绝缘配合和安全裕度进行了分析,为下一步开展 VFTO 现场实测提供了理论参考数据。

关键词: 气体绝缘变电站; 快速暂态过电压; 隔离开关; 断路器; 电磁暂态程序

中图分类号: TM864

文献标志码: A

文章编号: 1001-1609(2009)05-0057-04

Calculation of VFTO in 750 kV GIS

JIN Qing¹, YU Fang¹, GUO Jie², ZHAO Shan³

(1. Xi'an Electric Power College, Xi'an 710023, China; 2. High Voltage Division of Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China; 3. Yanan Power Supply Bureau, Yanan 716000, China)

Abstract: With the widespread application of gas insulated substation (GIS), due to its numerous merits, such as large miniaturizing effects, good anti-contamination characteristics, easy maintenance and good environmental adaptability. Harm of the very fast transient voltages (VFTO) caused during disconnecter switches (DS) or circuit breaker (CB) operation becomes more obvious with the increasing level of GIS voltages. This paper refers to 750 kV GIS of Guan Ting in northwest China power system. Using the Electro-magnetic Transient Program (EMTP), numerical simulation and analysis of VFTO in different operation modes GIS are carried out, and the data of VFTO under different operation modes, including the frequency, amplitude, steepness and waveform of VFTO are obtained. According to the calculation data, insulation coordination and safety margin of GIS and other devices are analyzed, and theoretical data and the key measuring region for the coming field practical measurement are provided.

Key words: gas insulated substation(GIS); very fast transient voltages(VFTO); disconnecter switches(DS); circuit breaker(CB); electro-magnetic transient program(EMTP)

0 引言

GIS 具有占地面积少、受环境干扰小、可靠性高、检修周期长、维护工作量少、安装迅速、运行费用低等优点,在超、特高压电力系统中得到了迅速发展和广泛应用。随着 GIS 设备在国内变电站中的普及应用,在 GIS 内部断路器、隔离开关操作时产生的快速暂态过电压(VFTO),由于其频率、幅值、陡度高等特点引发的 GIS 内部设备和相连设备的过电压事故也呈上升趋势。严重影响着电力系统的运行安全。在

超高压 GIS 中,VFTO 的幅值随运行电压升高而升高,而本身的绝缘裕度在降低。因此 VFTO 问题更加突出。VFTO 还会引起暂态地电位的升高,威胁二次设备的绝缘和产生严重的电磁干扰^[1,2]。

国内外已取得的研究结果表明:VFTO 过电压的幅值、频率、作用时间及衰减情况与 GIS 变电站的电压等级、接线方式、结构尺寸、内部设备参数和外接设备特性有关,因此不同 GIS 变电站的 VFTO 研究结果具有各自的鲜明特点^[3]。

1 VFTO 产生原理和特性

GIS 中 DS 操作时会产生 VFTO,这是由于 GIS

收稿日期:2009-03-07; 修回日期:2009-08-04

基金项目:国家自然科学基金(No.50577051)。

作者简介:金青(1961),女,讲师,高级工程师,从事输电、电器方面的教学和研究工作。

中所有元件基本工作于稍不均匀电场中,通常 DS 两极均为插入式的同轴圆柱体,操作中触头运动速度慢(约 1 cm/s),断口分合时会出现预击穿和多次重燃,形成波前很陡(一般为 3~20 ns)的阶跃电压波,并向断口两侧传播;而 GIS 中相邻电气设备的间距和母线长度都比同型空气绝缘变电站(AIS)小得多,阶跃电压波会在 GIS 内节点上发生复杂的折射、反射和叠加,导致暂态振荡波的频率剧增(可高达数百 MHz)。

VFTO 具有以下特性^[4]。

(1)幅值:一般小于 2.0 p.u.,少数大于 2.5 p.u.;

(2)陡度:DS 断口击穿时会在几纳秒内建立火花导电通道,在稍不均匀电场中通道形成 VFTO 冲击波的上升时间 t_r

$$t_r = 13.3k_l / (\Delta u/l) \quad (1)$$

式(1)中, Δu 为击穿前的电压, kV; k_l 为 Tippler 火花常数=50 kV·ns/cm; l 为火花长度, cm。 t_r 一般为 3~20 ns, 随电场的非均匀度而异;

(3)频率:VFTO 包含的振荡频率范围很宽,主要包含几十至数百千赫的基本频率、由行波在 GIS 内发展形成的数十兆赫的高频和幅值较低的数百兆赫兹的特高频。

2 750 kV GIS 系统模型和参数

结合西北地区 750 kV 电网的发展规划,计算模型以官亭 750 kV GIS 为计算原型,对 DS 和 CB 操作时产生的 VFTO 进行了数值仿真计算和分析。官亭变电站接线见图 1。

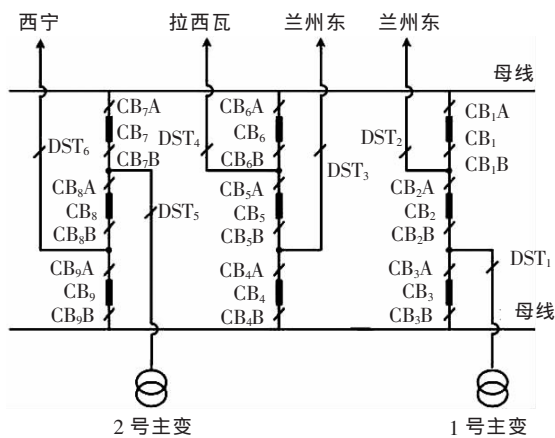


图 1 官亭变电站电气接线图

由于 750 kV GIS 采用三相分体式,三相分别处于各自的金属外壳中,彼此间没有耦合^[5-8],计算仿真时只需考虑一相的情况。

在高频的 VFTO 作用下, CB、DS、电压互感器等设备参数可简化为集中的等值电容参数。用 EMTP 计算暂态过程时,采用波阻抗和波速描述 GIS 的管

线特性^[5-13]。GIS 系统模型中主要元件参数为:①GIS 母线的波阻抗 92 Ω,波速 277 m/μs;②架空线的波阻抗 247 Ω,波速 300 m/μs;③相关设备的等值电容:双断口 CB,断口间 720 pF,每段对地电容为 92 pF,分合闸电阻为 575Ω;DS 对地电容 240 pF,分合闸电阻为 500 Ω(仅 CB₁,CB₂ 和 CB₃ 这一段的 DS 有分合闸电阻,其他段 DS 没有该电阻);套管 B 450 pF;变压器 5 000 pF;高压并联电抗器 5 000 pF;金属氧化物避雷器(MOA)45 pF 与非线性电阻并联;电压互感器(VT)5 000 pF。

3 EMTP 仿真计算分析

根据各设备参数,确定 VFTO 计算的边界条件和输入参数,由于在 VFTO 计算中体现的特点是操作的线路越短,过电压值越高,在所有的运行方式中,挑选在单变和单回线下的无母线、单母线和双母线三种状态下的最严重的六种接线方式,每种接线方式再分为主变供电和出线供电的两种运行方式。合闸不考虑残压,分闸考虑残压,残压 ΔU 计算中取 -1.0 p.u.,且无重燃。应用 EMTP 对这些较苛刻的 6 种接线 12 种运行方式下 CB、DS 操作进行了 VFTO 仿真计算。计算分析如下。

在 GIS 变电站中,隔离开关合分闸操作产生的 VFTO 过电压明显高于断路器合分闸操作产生的 VFTO 过电压;分闸操作过电压高于合闸操作过电压;正常操作中,无分合闸电阻隔离开关合闸操作产生的最高 VFTO 过电压为 1.730 p.u.,分闸操作产生的最高 VFTO 过电压为 2.299 p.u.;断路器合闸操作产生的最高 VFTO 过电压为 1.199 p.u.;操作产生的 VFTO 频率范围在 0.33~50 MHz 之间。

无分合闸电阻的隔离开关分合闸操作产生的过电压明显高于有分合闸电阻隔离开关操作产生的过电压。无分合闸电阻的隔离开关合分操作时产生的最大 VFTO 过电压为 2.299 p.u.;而有分合闸电阻的隔离开关分合闸操作时产生的最高 VFTO 过电压为 1.474 p.u.,过电压升高 55.97%。

各种运行方式下,GIS 内部设备上最大 VFTO 过电压可能出现在断路器 CB8 上,其值为 2.28 p.u.;外部最大过电压出现在西宁出线侧 DST 上,最大 VFTO 过电压为 2.299 p.u.;在 GIS 与变压器架空线连接套管处最大 VFTO 过电压为 2.256 p.u.。若操作出线 DST 隔离开关各设备上出现的 VFTO 更高,最大过电压值为 2.827 p.u.,因此在运行中应尽可能避免操作出线上的 DST 隔离开关。

由于波传播过程中的衰减变压器上的过电压并

不高,最大值为 1.240 p.u.;由于母线中部装有 MOA,在波的折反射中母线两端的 VFTO 过电压明显高于中部,母端部过电压最大值为 1.928 p.u.,

母端部过电压最大值为 1.941 p.u.。

各种运行方式下操作, VFTO 电压最大值出现在隔离开关分闸操作上。GIS 内部各点及 GIS 母线过电压最大值主要出现在距送电端最近的隔离开关分断操作时;出线侧电压最大值出现在出线侧带电时分出线侧最后一个隔离开关。

GIS 中,变压器、CB 和 DS 上最严重过电压下的 VFTO 波形、频率和陡度分析如下。

(1) 变压器的最大 VFTO 过电压:2 号主变压器经 CB_8 直接向西宁出线供电时,正常分 CB_7B 操作时出现 VFTO 过电压最大值 1.24 p.u.,最大陡度为 $0.535 \text{ MV}/\mu\text{s}$ 。频率范围 $0.45 \sim 6.9 \text{ MHz}$,电压见图 2。

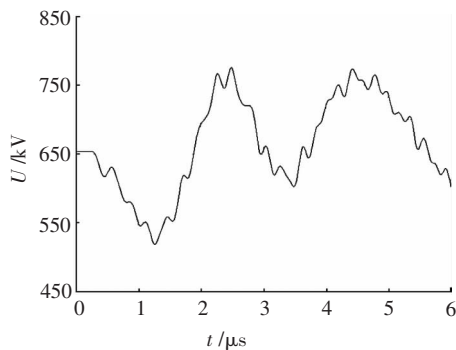


图2 2号主变压器 VFTO 过电压波形图

(2) 隔离开关的最大 VFTO 过电压:此时隔离开关最大电压出现在 2 号主变压器上,I 母线、II 母线和西宁出线带电时,正常分 CB_9A 时, DS_6 上其值为 2.29 p.u.,最大电压陡度为 $15 \text{ MV}/\mu\text{s}$,频率范围 $2.9 \sim 16 \text{ MHz}$,电压波形见图 3。

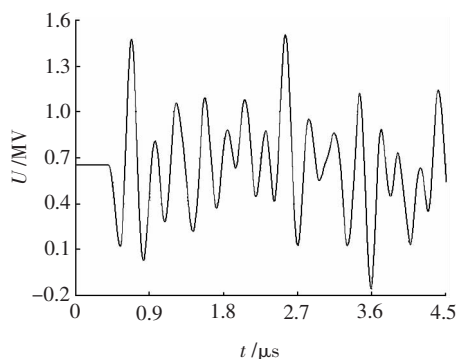


图3 DS 的 VFTO 过电压波形图

(3) 断路器的最大 VFTO 过电压:断路器在 1 号主变压器经 CB_2 直接向兰州东 1 出线供电时,正常分 CB_8 最大过电压为 2.280 p.u.,最大陡度为 $54.9 \text{ MV}/\mu\text{s}$,频率范围 $5 \sim 50 \text{ MHz}$, CB_8 电压波形见图 4。

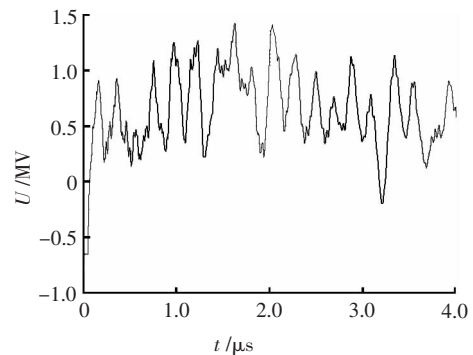


图4 CB 的 VFTO 过电压波形图

依据正常操作时最严重工况下的 VFTO 过电压计算结果和设备的雷电冲击绝缘水平,最大过电压出现在隔离开关对地,其值为 1501.247 kV ,按照目前的 750 kV 绝缘配合规范有 39.88%的安全裕度。若出线上的 DST 隔离开关操作,隔离开关的最大过电压值为 1846.03 kV ,有 13.75%的安全裕度。因此,从 VFTO 过电压分析,过电压对目前的设备配置威胁不是很大。但为了获取更大的安全裕度,应尽可能避免操作出线上的 DST 隔离开关。

4 结论

在官亭 750 kV GIS 变电站,通过对多种较苛刻运行方式下 DS、CB 分合操作 VFTO 过电压的仿真计算,得到以下结论:

- (1) 在 GIS 变电站中,隔离开关合分闸操作产生的 VFTO 过电压明显高于断路器合分闸操作产生的 VFTO 过电压;分闸操作过电压高于合闸操作过电压;
- (2) 无分合闸电阻的隔离开关分合闸操作产生的过电压明显高于有分合闸电阻隔离开关操作产生的过电压。

(3) 各种运行方式下,GIS 内部设备上可能出现的最大 VFTO 过电压,在断路器 CB_8 上其值为 2.28 p.u.,外部最大过电压出现在西宁出线侧 DST 上,最大 VFTO 过电压为 2.299 p.u.;线路 DST 隔离开关操作产生的 VFTO 明显使设备上的过电压普遍升高,最大过电压值为 2.827 p.u.,因此在运行中应尽可能避免操作出线上的 DST 隔离开关。

(4) 从 VFTO 过电压分析,目前变电站的接线配置,断路器和隔离开关在分合操作时所产生的 VFTO 过电压对设备绝缘的威胁不很突出,但要留有更多的安全裕度。

参考文献:

- [1] 中国电能成套设备总公司.超高压电力变压器类事故分析及预防措施汇编[M].北京:2003.

- [2] 钟连宏, 欧式尧, 周红霞. GIS 中快速暂态过电压的分析和计算[J]. 高电压技术, 2000, 26(1): 60.
- [3] 阮全荣, 施 围, 桑志强. 750 kV GIS 在拉西瓦水电站应用需考虑的问题[J]. 高压电器, 2003, 39(4): 66-71.
- [4] 钱家骊, 张节容, 吉嘉琴, 等. 高压开关开合电容电流和小电感电流[M]. 北京: 中国电力出版社, 1999: 108-112.
- [5] POVH D, SCHIMITT H. Modeling and Analysis Guidelines for Very Fast Transient[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 1996, 11(4): 2 028-2 035.
- [6] 阮全荣, 施 围. GIS 隔离开关带分合闸电阻抑制 VFTO 的研究[J]. 高电压技术, 2005, 31(12): 7.
- [7] 施 围. 电力系统过电压计算[M]. 西安: 西安交通大学出版社, 1988.
- [8] NARIMATSU S, YAMAGUCHI K, NAKANO S, et al. Interrupting Performance of Capacitive Current by Disconnecting Switch for GIS[J]. IEEE Trans on Power Apparatus and System, 1981, 100(6): 134-136.
- [9] 何善庆. GIS 中的快速暂态过程[J]. 高压电器, 1995, 31(2): 41-46.
- [10] BOGGS S. The Modelling of Statistical Operating Parameters and the Computation of Operation-induced Surge Waveforms for GIS Disconnectors[C]//CIGRE, 1988: 13-15.
- [11] DOMMEL H W. 电力系统电磁暂态计算理论[M]. 北京: 水利电力出版社, 1991.
- [12] BOGGS S A, CHU F Y. Disconnect Switch Induced Transients and Trapped Charge in Gas-insulated Substation. IEEE Trans. on Power Apparatus and Systems[J]. 1982(10): 3 593-3 602.
- [13] Working Group 33/13 -09. Very Fast Transient Phenomena Associated with GIS[C]//in CIGRE, 1988: 33-43.
- [14] 鲁铁成. GIS 中快速暂态过电压的仿真计算[J]. 高电压技术, 2002, 28(11): 3-5.
- [15] 赵 峰. 750 kV GIS 中快速暂态过电压的研究[D]. 西安: 西安交通大学, 2005.

(上接第 56 页)

一种数值等效模型获得目标波形的方法; 通过对模型的数学推导, 总结波前时间 T_f 、半波峰时间 T_1 和波形振荡频率 f 与调电感 H 、充电电容 C_s 和负荷电容 C_0 的关系, 并且用仿真验证了解析表达式的准确性; 最后研究了波形参数随着负荷变化的趋势, 为实际工程设备选择提供了参考价值。

参考文献:

- [1] IEC 60060 -3 High Voltage Test Techniques Part 3: Definitions and Requirements for On-site Tests[S]. 2005.
- [2] 朱旭东. GIS 现场耐压试验用振荡操作波发生器研究[J]. 高电压技术, 1992, 66(4): 57-60.
- [3] 陈 伟, 贺景亮. 操作波下变压器局部放电测量方法的探讨[J]. 高电压技术, 1990, 12(3): 41-45.
- [4] 朱旭东, 陈文铖. 多种波形冲击电压发生器成套装置及其应用[J]. 高电压技术, 1996, 22(1): 89-91.
- [5] 邱关源. 电路[M]. 北京: 高等教育出版社, 2006.
- [6] 王玉峰, 邹积岩, 廖敏夫, 等. 组合波发生器的设计[J]. 高电压技术, 2006, 32(3): 10-12.
- [7] 刘 亮, 张贵新, 罗承沐. 冲击波形发生电路设计方法的改进[J]. 电工技术学报, 2007, 22(5): 6-12.
- [8] 刘 亮, 张贵新, 罗承沐, 等. 一种冲击波形发生器电路的设计方法[J]. 高电压技术, 2006, 32(6): 25-27.
- [9] 张仁豫, 陈昌渔, 王昌长. 高电压技术[M]. 北京: 清华大学, 2003.
- [10] 赵智大. 高电压技术[M]. 北京: 中国电力出版社, 2006.
- [11] 张志涌. 精通 MATLAB6.5 版[M]. 北京: 航天航空大学出版社, 2003.
- [12] OKABE S, YUASA S. Evaluation of Breakdown Characteristics of Gas Insulated Switchgears for Non-standard Lighting Impulse Waveforms-Breakdown Characteristics for Non-standard Lighting Impulse Waveforms Associated with Disconnecter Switching Surges [J]. IEEE Transaction on Dielectrics and Electrical Insulation, 2008, 15(3): 721-729.
- [13] OKABE S, YUASA S, KANEKO S. Evaluation of Breakdown Characteristics of Gas Insulated Switchgears for Non-standard Lighting Impulse Waveforms-Analysis and Generation Circuit of Non-standard Lighting Impulse Waveforms in Actual Field [J]. IEEE Transaction on Dielectrics and Electrical Insulation, 2007, 14: 312-320.
- [14] FRANK PETZOLD. Experiences of PD Diagnosis on MV Cables using Oscillating Voltages [C]. 2005 IEEE/PES Transmission and Distribution Conference & Exhibition: Asia and Pacific Dalian, China.
- [15] GULSKI E, FRANK J, JOHAN J, et al. Advanced Partial Discharge Diagnostic of MV Power cable System Using oscillating wave test system [J]. IEEE Electrical Insulation Magazine, 2000, 2(16): 17-25.
- [16] S. MEIJER. Breakdown of Fixed Defects in SF₆ under Different Voltage Wave Shapes [C]. Proceedings of 2005 International Symposium on Electrical Insulating Materials, Kitakyushu, Japan, 2005.