

GIS中的电磁暂态现象

张桂红, 郭洁, 徐燕飞

(西安交通大学电气工程学院, 陕西 西安 710049)

Transient Electromagnetic Phenomena in GIS

ZHANG Gui-hong, GUO Jie, XU Yan-fei

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

摘要: GIS以其较高的运行可靠性,易维护,占地面积小等优点在电力系统中得到了广泛的应用。但是,在隔离开关、接地开关和断路器的动作过程中,会出现快速暂态过程。主要表现为:GIS母线套管上的快速暂态过电压和GIS壳体上的暂态地电位升高以及GIS周围空间产生暂态电磁场。主要分析和探讨由快速暂态过程引发的暂态电磁场的产生和传播机理以及它对GIS的电缆出线和与GIS相连的变压器的影响。

关键词: 气体绝缘变电站; 快速暂态过电压;

快速暂态电流; 暂态电磁场; 变压器; 电缆出线

中图分类号: TM726

文献标识码: A

Abstract: Gas insulated substation is widely applied in power system because of many advantages, including high reliability, easy maintenance, relatively less space etc. However, very fast transient (VFT) process can be produced, during the operating of disconnecter switch, earth switch and circuit breaker. VFT is mainly characterized as very fast transient overvoltage on GIS bus-bar bushing, and as the raise of transient earth voltage on GIS enclosure, and as transient electromagnetic field (TEM) around the GIS. In this paper, the mechanisms about TEM generation and TEM production, caused by VFT, are analyzed. Meanwhile, the influences of VFT on the cable and the transformer connected with GIS are studied.

Key words: gas insulated substation(GIS);

very fast transient overvoltage(VFTO);

fast transient current; transient electromagnetic

field; transformer; cable output

0 引言

气体绝缘变电站(GIS)与传统的敞开式变电站(AIS)所不同的是,除变压器、架空线以外,所有电气设备都密封在金属外壳中,壳内充以3~4个大气压的绝缘和灭弧性能良好的SF₆气体作为相间和对地

绝缘^[1],典型的GIS接线图见图1^[2]。随着GIS运行电压和SF₆气压的提高,以及超大规模的集成化电路VLSI在现代GIS装置中的使用,当GIS内的故障或例行操作(例如隔离开关(DS)切合空变)而引起DS、接地开关(ES)和断路器(CB)的动作时,会产生快速暂态过程(VFT)。其主要表现为:GIS母线套管上的快速暂态过电压(VFTO)和GIS壳体上的暂态地电位(TEV)升高以及在GIS周围空间产生暂态电磁场(TEM)和电磁干扰(EMI)^[3],对与GIS直接相连的设备(如电缆出线、变压器等)造成不良影响,导致GIS不能正常运作。

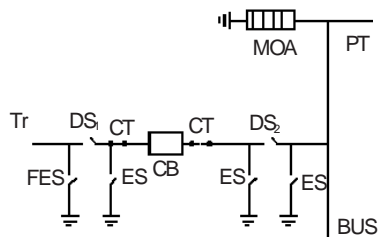


图1 GIS典型的接线图

GIS出现故障后,其修复要比AIS困难的多,工艺更为复杂,维修时间长,严重影响到了电力系统的供电可靠性。近年来,国内GIS(尤其500kV GIS)运行事故频繁发生,这些事故均与VFT或DS的例行切合操作密切相关^[3],引起了运行部门和研究人员的重视。通过理论分析、现场试验、计算机数值模拟(例如EMTP)等方法已经找出了一些缓解这些问题的措施,并取得了较好的成效。

1 TEM的产生和传播机理

GIS中当DS、ES和CB动作时,会因触头间击穿和多次重燃产生VFTO和暂态过电流(FTC),其波前上升时间短至3~20ns,VFTO幅值一般不超

收稿日期:2006-03-18

基金项目:国家自然科学基金(50577051)。

作者简介:张桂红(1982-),女,硕士研究生,研究方向为电力系统过电压与暂态仿真。

过 2.0 p.u., 也有可能超过 2.5 p.u.; FTC 的幅值与开关在 GIS 中动作的相对位置有关, 一般在几千安至十几千安之间。这些暂态电压和电流相互作用产生的 TEM 的频率可高达 300 MHz, 主要集中在 0.5 ~ 150 MHz 之间^[4]。在动作的 DS 或 CB 附近的 GIS 设备上的 VFTO 陡度较大, 频率较高。GIS 中剧烈变化的 TEM, 场强甚高的高频电磁波会通过 GIS 中的一些连接点(例如非金属法兰、SF₆/空气套管、SF₆/电缆终端、非金属观测点等)耦合到控制线路、气体绝缘电缆出线、与 GIS 直接相连的变压器以及数据采集系统等外部环境中, 并产生 EMI。

高频的电磁波具有一定的穿透力, 其 TEM 的传播有两种机理: 传导和辐射。GIS 中由于开关作用产生的 FTC 通过电流互感器(CT)、恒压变压器(CVT)分布在一次侧、二次侧及法兰周围的杂散电容耦合到 GIS 的高压母线, 耦合到母线上的部分 FTC 再直接耦合到屏蔽或非屏蔽电缆的中心导体上, 这种类型称为传导型 EMI 耦合。这种耦合方式不会因为对电缆施加屏蔽而减少, 所以只能通过相应的抑制装置加以保护。还有一类耦合是在非屏蔽的电缆上, 通过 VFTO 和 FTC 产生的高频 TEM, 以辐射场的形式泄漏到外部环境中, 然后再耦合到控制线路中, 在电缆的外皮上感应出电压和电流, 通过电缆外皮和导体间的波阻抗, 又在电缆中心导体上产生感应电流和电压, 称为辐射型 EMI 耦合。电缆终端屏蔽层和终端导体间的耦合(通常称为电缆引出端耦合)也属于辐射型耦合。这两种类型的电磁暂态波都含有多种频率分量, 且每一种分量都是独立传播的^[5]。

2 TEM 对 GIS 外部环境的影响

GIS 中的 TEM 耦合到外部环境中, 会对变压器、电缆出线、SF₆/空气套管、法兰等设备的绝缘造成威胁, 尤其对变压器绕组的匝间绝缘危害最为严重。另外, 由于 GIS 中产生的 FTC 具有高频、特高频分量, GIS 的布置不可能与接地电流注入点的距离一致, 还会引起 GIS 的暂态地电位升高, 即产生 TGPR 效应。同时也会对二次侧的测量、监控设备产生 EMI。通过 GIS 事故分析, 认为在一定的保护措施下(如法兰加装金属氧化物避雷器(MOA)), SF₆/空气套管、法兰是可以耐受 VFTO 和 FTC 的。所以重点讨论 TEM 对与 GIS 相连的变压器和电缆出线的影

2.1 对变压器匝间绝缘的影响

当 GIS 中出现故障或 DS、CB 动作时, 由于 GIS 结构紧凑, GIS 内各元件间距很近且结点数较多, 开关动作产生的操作波和外部雷电侵入波在 GIS 内部传播时, 会在不同元件节点发生复杂的折、反射, 最终导致频率剧增, 产生含有高频、特高频分量的 VFTO。VFTO 一般是叠加在工频电压基础上的。

VFTO 幅值较低(一般不超过 2.5 p.u.), 陡度很大, 频率高达 300 MHz。

当变压器通过气体绝缘母线和 GIS 相连时, 一般到达变压器端的 VFTO 幅值不会超过 1.8 p.u.^[6], 所以不会危及变压器的主绝缘。但是在高频的 TEM 的作用下, 某些频率分量(或高或低)会在变压器绕组中产生共振, 由此引起的绕组的电压振荡是不容忽视的, 对绝缘水平较弱的匝间绝缘造成极大的威胁。VFTO 下变压器绕组的等值电路见图 2^[6]。TEM 中, 高频分量感应静电场, 低频分量沿绕组传播。目前, 有很多学者提出了“无共振”或“防电涌变压器”的思想, 其目的就是通过改善变压器绕组的起始电位分布和电容电压分布来抑制高频振荡, 但此方法只适合于雷电波, 对 GIS 中的 VFTO 不一定有效^[7]。

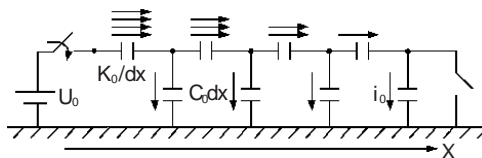


图2 变压器绕组的等值电路

通过光纤传输系统可以准确测量变压器绕组的匝间电压, 从测量结果就能观察到有明显的共振现象, 它很可能源于行波的叠加。绕组的匝间电压一般可以达到作用电压的 0.25 倍, 而 VFTO 下的匝间电压因为其高频振荡能高于脉冲测试电压下的 3 倍多^[8], 所以, 对变压器而言, VFTO 下变压器绕组的共振频率应该比 VFTO 本身的频率更受重视。

文[9]对国外某一 500 kV GIS 中通过电磁暂态程序(EMTP)进行了 VFTO 计算, 结果表明: 变压器绕组上的最大谐振频率在 30 MHz 左右, 变压器侧 VFTO 幅值低于 GIS 母线开路侧的数值, GIS 母线末端开路处的 VFTO 幅值最高, 离变压器越近, VFTO 幅值越低。经分析得出: 变压器绕组上 VFTO 幅值的降低是由于它的电容效应。这个例子也进一步说明, 变压器的主绝缘一般是可以耐受 VFTO 的, 主要是 VFTO 的高频陡波特性对绕组的匝间绝缘造成了很大的威胁。

2.2 对 GIS 电缆出线的影

电缆出线是 GIS 变电站常用的出线方式。GIS 通过电缆段与架空线、变压器相连。选用该方式是因为: 从分布参数的角度看, 电缆是具有较低波阻抗的传输线; 从集中参数的角度看, 电缆相当于一个大电容。而电缆出线对变压器所起的作用, 在于利用电缆外皮高频电流的集肤效应或电缆外皮的分流及耦合作用, 可以限制变压器绕组上的过电压。很多研究人员通过 EMTP 对 500 kV/750 kV GIS 在电缆出线、架空出线和 GIL 出线下变压器端部的 VFTO 进行了运算比较, 也得出: 通过电缆连接时变压器端口处的过

电压最低^[10]。

GIS中的开关动作引起的VFTO及FTC, 会引发频率高达几百MHz的TEM, TEM通过传导和耦合的方式与控制电缆回路相互作用。高频的TEM会通过GIS的不连续点在电缆的外皮上感应出电流, 此电流会在电缆的中心导体上耦合产生感应电压。此类耦合属于感性耦合。计算分析表明: TEM的径向和轴向分量、电缆段的长度以及电缆的对地高度都会对上述感应电流和电压起决定作用。每个GIS变电站的开关动作都会产生复杂的电磁环境, 其波形、幅值和频率随电压等级、动作开关类型、开关的开合速度、母线电气特性等不同而相异。还发现: DS动作引起的电缆出线上的VFTO幅值高低变化远比CB动作引起的幅值变化明显^[11]。

文[12]中国外某学者就GIS中TEM在单端和双端接地的电缆段上引起的感应电流和电压进行了模拟计算, 计算中将控制电缆模拟为具有一定波阻抗的传输线。并且假定: 不计电缆外皮和中心导体上的感应电流和电压的衰减; 特定频率段内的电磁场的径向、轴向分量为常数; TEM主要频率范围为0.5~200MHz。从计算所得的结果中不难发现: 在非衰减的GIS暂态电磁环境中, 频率是决定电缆金属外皮上感应电流和导线上感应电压大小的主要因素; 一定长度的电缆线, 电场径向分量引起的感应电流小于轴向分量引起的感应电流。更为有趣的是, 通过分析控制电缆的径向场的波形可看出, 有一数值大约为50MHz的临界频率 f_c (f_c 与电缆对地高度无关)存在, 当TEM的频率 $f < f_c$ 时, 电缆单端接地时的感应电流较双端接地时小; 而当 $f > f_c$ 时, 电缆双端接地时的感应电流较小。在轴向场的分析中也能观察到相似的情况。电缆导体上的感应电压也存在类似的临界频率和特点, 变化情况相同。研究还发现随着电缆长度的增加, 电缆双端接地的保护作用不再突出。

TEM的主要频率高达百MHz, 这在很大程度上依赖于GIS的系统结构, 其中, 电缆的接地类型对控制电缆输出端的感应电压起很大的作用, 而电缆接地类型的选择却受电缆高度和长度的制约。

3 结语

(1) GIS中开关的频繁操作会引起频率高达数

百MHz的VFTO和FTC。众多研究试验表明: 由于VFTO幅值不高, 变压器的主绝缘可以耐受VFTO, 但其几十兆至几百MHz的高频、特高频分量会对变压器的匝间绝缘造成严重威胁, 此类事故在国内已不罕见。

(2) 通过分析国外某学者就GIS电缆出线上由于TEM产生的感应电压、感应电流的模拟计算结果, 发现: 感应电压和感应电流的径向场和轴向场分量都有一临界频率 f_c 存在。当TEM的频率 $f < f_c$ 时, 电缆单端接地时的感应电流较双端接地时小; 而当 $f > f_c$ 时, 电缆双端接地时的感应电流较小。对此问题, 目前还没有合理的解释, 有待于进一步的研究论证。

参考文献:

- [1] 陈水明, 许菁. 特快速暂态过电压及其对主变的影响[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2005, 45(4): 573-576.
- [2] 史保壮, 李智敏. 超高压GIS中快速暂态过电压造成危害的原因分析[J]. 电网技术, 1998, 22(1): 1-3.
- [3] 何善庆. GIS中的快速暂态现象[J]. 高压电器, 1995, 31(2): 41-44.
- [4] Mohana Rao M, Joy M. Frequency Spectrum Analysis of Fast Transient Current (FTC) Due to Switching Operations in 245 kV GIS [C]// IEEE/PES Transmission and Distribution Conference, Asia-pacific. 2002.
- [5] Wiggins C M, Thomas D E. Transient Electromagnetic Interference in Substations[J]. IEEE Trans. on Power Delivery, 1994, 9(4): 1869-1884.
- [6] 刘青. 750 kV GIS变电站中变压器的快速暂态过电压防护的研究[D]. 西安: 西安交通大学, 2005.
- [7] Shibuya Y, Fujita S. Analysis of Very Fast Transient Overvoltage in Transformer Winding [J]. IEE Proc-gener. Transm. Distrib., 1997, 144(5): 461-468.
- [8] Shibuya Y, Fujita S, Shimomura T. Effects of Very Fast Transient Overvoltages on Transformer [J]. IEE Proc. 1999, 146(4): 459-464.
- [9] Fujita S, Hosokawa N. Experimental Investigation of High Frequency Voltage Oscillation in Transformer Windings [J]. IEEE Trans. on Power Delivery, 1998, 13(4): 1201-1207.
- [10] 陈良金. 750 kV 变电站雷电侵入波过电压的研究 [D]. 西安: 西安交通大学, 2005.
- [11] Vinod Kumar V, Joy Thomas M. Influence of Switching Conditions on the VFTO Magnitudes in a GIS[J]. IEEE Trans. on Power Delivery, 2001, 16(4): 539-544.
- [12] Mohana Rao M, Joy Thomas M, Singh B P. Induced Voltage on Control Cables in a GIS Due to Transient EM Fields Generated During Switching Events [C]// Proceedings of INCEMIC. 2001-2002.

(上接第345页)

- [2] Grimes Chris. EMC Testing: Options for Manufacturers [J]. Engineering Technology, 2005, 8(6): 44-46
- [3] IEC 61000-4-5. Electromagnetic Compatibility (EMC) Testing and Measurement Techniques. Surge immunity test [S]. 1995.
- [4] GB 18802-1. 接入低压配电系统的电涌保护器. 第1部分: 性

能要求与试验方法[S].

- [5] GB/T 17626.5-1999. 电磁兼容试验和测量技术.浪涌(冲击)抗扰度试验[S].
- [6] 梁曦东, 陈昌渔, 周远翔. 高电压工程 [M]. 北京: 清华大学出版社, 2003.