

三相分体式 GIS 一次系统 VFTO 的建模与计算

张重远¹, 高树国¹, 李春燕²

(1. 华北电力大学电气与电子工程学院, 河北 保定 071003; 2. 华北电力大学机械工程学院, 河北 保定 071003)

The Modeling and Simulation of the Very Fast Transients in the GIS Primary Circuits

ZHANG Zhong-yuan¹, GAO Shu-guo¹, LI Chun-yan²

(1. School of Electrical and Electronic Engineering, North China Electric Power University, Baoding 071003, China;

2. School of Mechanical Engineering, North China Electric Power University, Baoding 071003, China)

摘要: 对 GIS 一次系统元件的建模方法进行了总结与讨论, 根据实际情况对部分元件的模型进行了修正。用 EMTP 建立了一实际 110 kV GIS 一次系统的计算模型, 并对特快速暂态过电压和接地导体上的暂态电流进行了仿真计算。计算结果与实测结果进行了比较, 验证了模型的有效性和仿真计算的可行性。

关键词: 气体绝缘变电站; 特快速暂态过电压; 仿真计算; 模型

中图分类号: TM86

文献标识码: A

Abstract: The Modeling methods for elements in the primary circuit of gas insulated substation are discussed and summarized. Some elements' models are modified according to the practical conditions. The EMTP is used to set up the computation model of the primary circuit of an 110 kV GIS, the very fast transient overvoltage and transient currents(on the grounding conductor) are calculated. Comparing with the practical test results, the simulation model is proved effective and feasible.

Key words: gas insulated substation(GIS); very fast transient overvoltage(VFTO); simulation; model

0 前言

GIS 内隔离开关操作会产生特快速暂态过电压 (VFTO) 并引起暂态地电位升高, 这些一次系统的特快速暂态现象不仅影响一次系统设备的安全稳定运行, 而且通过传导与辐射两种方式干扰二次设备正常运行, 引起严重的电站事故。对一次系统暂态过程的测量需要耗费大量的人力、物力和财力, 而经济的模拟计算可以在一定程度上代替测量。因此, 准确地建模与仿真计算是必要的。

实际 GIS 一次系统的建模是一项复杂的工作。一方面, 必须对 GIS 中一些元件的模型给出准确的参数才能得到正确的仿真结果; 另一方面, 为了减小建模和仿真计算的工作量, 还需要对一些影响仿真结果的次要因素予以减化或忽略。文[1-5]对实际 GIS 一次系统模型的建立和暂态过程计算进行了大量研究, 并得到了很多有价值的结论, 但由于仿真结果没有与测量值进行比较, 很难说明所建立模型的有效性和实用性。笔者在总结讨论了 GIS 内各种元件建模方法的基础上, 根据实际情况对 GIS 内部分元件的建模方法提出了改进, 并对一个实际的 GIS 进行了仿真计算。计算结果与测量结果的比较表明, 采用适当的模型对 GIS 一次系统的暂态过程进行仿真计算并据此指导电站一次系统设计和安全运行是可行的。

1 GIS 各元件的模型

由于 GIS 内部与外部暂态波过程的传播特性, GIS 的建模主要采用由波阻抗和传播时间描述的分布参数的传输线来建立(如 GIS 的内部母线导体、电缆内导体、金属外壳以及电缆外皮等), 其它一些元件由集中参数的等值电路来表示。三相分体式 GIS 的三相母线处于各自的金属外壳中, 它们之间没有耦合, 仿真计算时只需要考虑一相的情况, 与三相共箱式 GIS 相比, 建模与计算相对比较简单^[5]。

1.1 母线等元件的传输线模型

三相分体式 GIS 的母线与同轴高压电缆都属于同轴结构, 同轴母线与电缆内导体和屏蔽导体的波阻抗由式(1)、式(2)计算:

母线导体(电缆内导体)的波阻抗:

$$Z_1 = 60 \ln \frac{R_1}{R_2} \quad (1)$$

外壳(电缆外皮)的波阻抗:

收稿日期: 2006-01-09; 修回日期: 2006-03-06

基金项目: 河北省自然科学基金资助项目(503424)。

作者简介: 张重远(1969-), 男, 副教授, 博士, 从事电力系统电磁兼容和高电压与绝缘技术方面的研究。

$$Z_2 = 60 \ln \frac{2h}{R_3} \quad (2)$$

其中: R_1 为屏蔽导体的内半径; R_2 为内导体的半径; R_3 为屏蔽导体的外半径; h 为屏蔽导体的高度。

在建立它们的传输线模型时, 必须考虑损耗, 即它们的模型是有损传输线模型, 但该损耗不包括导体的频变损耗(集肤效应), 原因是考虑频变损耗所建系统模型的仿真结果会使误差增大。

1.2 隔离开关的电弧模型

根据 GIS 中暂态过程的实际产生过程, 可用修整的 Kopplin 模型来建立隔离开关操作模型, Kopplin 模型用来描述隔离开关的电弧电阻^[6]。由于高频集肤效应, 这个电阻是频变的。而当电弧放电时, 它又是时变的(取决于电弧的温度、直径、损耗)。电弧电导率的时变特性主要受电弧温度函数的影响。这两个函数由下式描述:

$$\frac{1}{g} \frac{dg}{dt} = \frac{1}{t(g)} \left(-\frac{ui}{P(g)} - 1 \right) \quad (3)$$

$$t(g) = t_0(1 - e^{-g/g_0}) \quad (4)$$

式(3), 式(4)中: u, i, P 分别为电弧的电压、电流、能量; t_0 为电弧的起始温度; g_0 为电弧的起始电导率。

在使用 Kopplin 模型建立隔离开关操作模型时, 需要利用 EMTP 中的 TACS 工具来帮助建立, 建立的开关模型非常复杂。由于只考虑一次开关电弧时的波过程, 所以为了简化计算模型, 采用 EMTP 中的理想开关模型代替了 Kopplin 模型。

1.3 电缆端部

该电站通过电缆与外部相连, 电缆端部是 GIS 的不连续点, 母线上的暂态波耦合到金属外壳和电缆外皮上, 形成了一个连接于一点的 4 传输线系统, 见图 1。图中 Z_1, Z_2, Z_3, Z_4 分别代表 GIS 内外导体和高压电缆内导体与外皮的波阻抗; U_1 是通过导体传到该点的入侵电压波; U_1 是 Z_1 导体上的反射电压波。 U_2, U_3, U_4 是 Z_2, Z_3, Z_4 上传播到 GIS 外部的折射电压波。

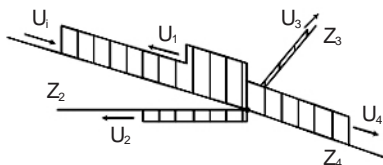


图 1 GIS 与高压电缆连接处的等值电路图

接有 4 条传输线的接点在 EMTP-ATP 中可用理想变压器模型和多导体传输线模型建立^[7]。4 条线通过理想变压器耦合。通过该模型即可计算耦合到 GIS 外壳和接地导体上的波过程。

1.4 接地导体

接地导体是垂直的金属导体, 从理论上讲, 它是非均匀传输线, 传输线上每一点的波阻抗随着高度的变化而改变。它的建模可以考虑 3 种方法: ①均匀

传输线, 传输线的波阻抗取中间点的波阻抗; ②分成多段均匀传输线的串联, 每一段的波阻抗取中间点的值; ③用集中参数的电感来表示, 电感值为 1 mH/m。通过计算比较发现, 第 3 种建模方法对计算结果影响甚微, 所以选用了第 3 种建模方法。

1.5 各元件模型一览表

根据 IEEE 相关工作组以及文[2, 4, 8]的研究成果和笔者的仿真经验, 表 1 总结了文中采用的 GIS 中各种元件(设备)的模型。

表 1 GIS 元件模型一览表

元件	等值电路	注释
母线、外壳		有损传输线
支持绝缘子		$C > 20$ pF
避雷器		
闭合的断路器		无损传输线
闭合的隔离开关		无损传输线
断开的隔离开关		
放电时的隔离开关		理想开关闭合
充气套管		$C > 10$ pF; $Z = 250$
电力变压器(终端)		参数根据变压器的频率响应来确定, 电感和电阻可忽略。
电流互感器		有时可忽略
容性电压互感器		
接地电极		$L = 1$ mH/m
架空线或长电缆(终端)		$R =$ 线路或电缆的波阻抗

2 电站简介

为了比较计算和测量的结果, 研究了一个实际的 GIS。该电站是一个 110 kV 三相分体式 GIS, 出线为电缆。该电站的主要技术参数为: 设计电压 132 kV; 雷击耐压 650 kV; 工频(50 Hz)耐压 230 kV; 持续供电电流 1 250 ~ 3 150 A; 气体最低压力 0.31 MPa。

该 GIS 有 5 个间隔, 其中 L_1, L_2 为电缆出线间隔, T_1, T_2, T_3 为变压器间隔, 电气主接线单线图见图 2。其中: Q_1, Q_2 为母线隔离开关; Q_0 为断路器; Q_6 为线路隔离开关; Q_{15}, Q_{25}, Q_{35} 为接地隔离开关; PT 和 CT 分别为电压互感器和电流互感器。

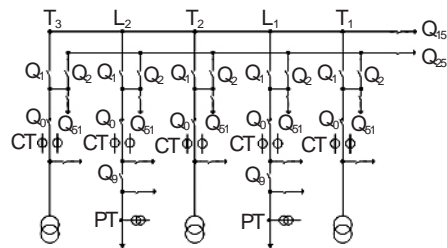


图 2 110 kV GIS 电气主接线单线图

3 计算与测量结果

采用 EMTP 软件建立了该电站一次系统的整体

模型(假设大地为理想导体),并对VFTO和接地导体上的暂态电流进行了仿真计算,对计算结果与测量结果进行了比较。

图3示出了操作前该电站的拓扑结构,粗黑线表示带电部分,通过闭合线路 L_2 间隔的隔离开关 Q_1 使母线1充电。计算采用标么值:1 p.u.= $125\sqrt{2}/\sqrt{3}=89.9$ kV。计算步长为0.2 ns,总仿真计算时间为500 ns。

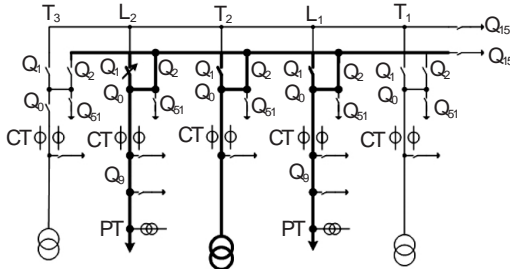


图3 110 kV GIS操作前该电站的电气主接线图

3.1 VFTO 的计算

计算VFTO点是在母线1的端部,并假定残存电荷为0.1 p.u.。图4示出了计算与测量结果在时域和频域的比较图。从图中可以看出,时域结果无论从幅值还是波形上均很接近。计算的VFTO频谱的谐振峰值点是5 MHz和10 MHz,而相应的测量结果约为5 MHz和12 MHz。考虑到实际电站结构的复杂性,这两个结果的差别很小。

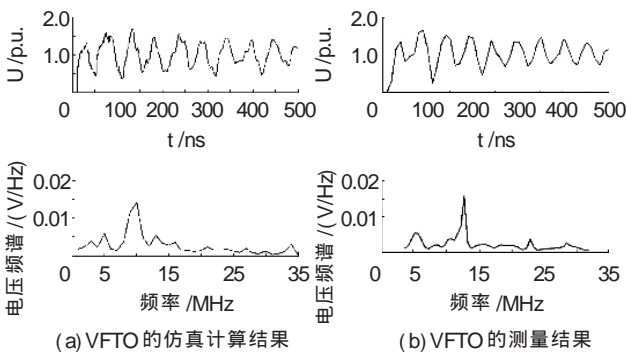


图4 VFTO的计算与测量结果

3.2 接地导体上暂态电流的计算

计算了接地导体上的暂态电流。该接地导体是共地的导体,位于线路间档 L_1 ,它与三相GIS外壳的支架相连。计算结果与测量结果见图5。

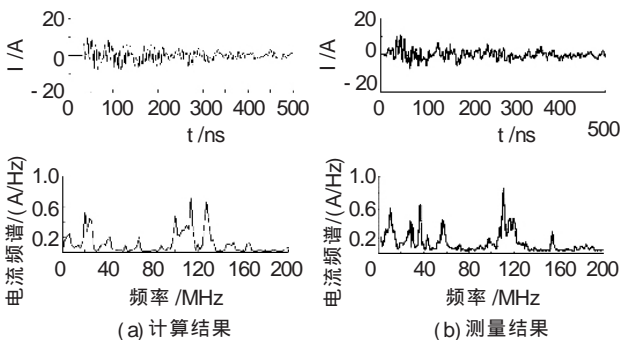


图5 接地导体上的暂态电流的计算与测量结果

比较计算与测量的结果发现,计算电流的幅值要比测量的小,且衰减较慢,其原因可能与大地简化为理想导体有关。从表2对这两个电流的幅值和频率的比较可以看出,仿真计算结果是比较准确的。

表2 测量与计算的对比表

	电流最大值/A	谐振峰值点/MHz
测量	13	0-60, 110-120, 150-160
计算	10	0-40, 60-80, 100-120, 120-140

3.3 分析与讨论

通过对不同操作时刻和空载母线不同残存电荷时的各种情况进行仿真计算发现,VFTO幅值的大小与操作时电源电压的相角(操作时刻)和空载母线上残存电荷的多少密切相关,考虑最严重的情况,即残存电荷为1.0 p.u.,电源幅值时合闸,VFTO最大值接近3.0 p.u.。

对该电站不同拓扑结构情况下的计算表明,暂态波的振荡频率的主要分量在几十MHz以内,它主要取决于受隔离开关操作影响的GIS的长度。电站越小,振荡频率的主要分量越高。另外,电站的拓扑结构对VFTO的幅值也有影响,但影响不大。

暂态波的振荡频率的高频分量高达上百MHz,它取决于GIS内器件的电器长度、各器件对金属外壳的杂散电容等因素,由于GIS内的元器件结构复杂,所以这一部分的高频分量很难准确计算,这也是接地导体上暂态电流的计算结果和测量结果相差较大的原因之一。

4 结语

总结了GIS中多种元件的模型建立方法,根据实际情况,对一些元件的建模方法提出了改进。建立了一实际110 kV三相分体式GIS一次系统的计算模型,并计算了隔离开关合空母线时的VFTO和接地导体上的暂态电流,计算结果与实测结果基本相符。这不仅验证了改进模型的有效性,同时也表明,采用适当的模型对GIS一次系统的暂态过程进行仿真计算并据此指导电站一次系统设计和安全运行是可行的。

参考文献:

- [1] 何善庆. GIS中的快速暂态现象[J]. 高压电器, 1995, 32(2): 41-43.
- [2] 钟连宏. GIS中快速暂态过电压的分析与计算[J]. 高电压技术, 2000, 26(1): 60-62.
- [3] 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.
- [4] 康宁. GIS中VFT过电压数值分析简化模型的构建方法[J]. 高电压技术, 2004, 30(10): 1-3, 33.
- [5] 张重远. GIS隔离开关操作对二次设备的影响[J]. 高电压技术, 2002, 28(2): 5-7.
- [6] Amir Mansour Miri, Zlatan Stokjovic. (下转第409页)

由表3可以看到,地面标称电场强度随分裂间距的减小而减小,而合成电场强度和离子流密度随分裂间距的减小先减小后增加,有一个最小值,但变化不大。

由表4和表5可以看到,导线对地高度越高、极间距越小,地面标称电场强度、合成电场强度和离子流密度越小。

由此可见,地面标称电场强度受线路对地高度的影响很大,而合成电场强度和离子流密度除受导线对地高度的影响较大外,受导线直径和分裂数影响也很大。由于地面标称电场强度和合成电场强度的变化规律不同,而实际场强为合成电场强度,因此,直流输电线路设计时应当以合成电场强度的限值作为电场效应的设计指标,而将标称电场的限值作为参考。从表1~表5可以看到,对于±800 kV直流线路,上述导线结构方案的地面场效应均可满足相应的限值。由于导线对地高度为18 m时,所有参数刚好满足相应的限值,因此在这种情况下,导线最小对地高度应取18 m。

3 结论

(1) 半经验公式法可以有效地分析极导线水平排列时直流线路的合成场强和离子流密度。

(2) 分裂导线直径越大、分裂数越多,地面标称电场强度越大,而合成电场强度和离子流密度越小。

(3) 地面标称电场强度随分裂间距的减小而减

小,而合成电场强度和离子流密度随分裂间距的减小先减小后增加,有一个最小值,但变化不大。

(4) 导线对地高度越高、极间距越小,地面标称电场强度、合成电场强度和离子流密度越小。

(5) 地面标称电场强度受线路对地高度的影响很大,而合成电场强度和离子流密度除受导线对地高度的影响较大外,受导线直径和分裂数影响也很大。

(6) 由于实际场强为合成电场强度,直流输电线路设计时应当以合成电场强度的限值作为电场效应的设计指标,而将标称电场的限值作为参考。

参考文献:

- [1] 吴桂芳. 我国±500 kV 直流输电工程的电磁环境问题[J]. 电网技术, 2005, 29(11): 5-8.
- [2] 侯远航, 邬雄, 万保权, 等. ±500 kV 直流线路极导线垂直排列的合成场强[J]. 高电压技术, 2005, 31(5): 37-38.
- [3] DL 436-1991. 高压直流架空送电线路技术导则[S].
- [4] EPRI Report TR-102764. HVDC Transmission Line Reference Book[R]. EPRI, 1993.
- [5] Sarma P, Janischewskyj W. Analysis of Corona Losses on DC Transmission Lines, Part II-Bipolar Lines [J]. IEEE Trans. PAS, 1969, 88(10): 1476-1491.
- [6] EPRI Report EL-2257. Conductor Development [R], EPRI, 1982.
- [7] Janischewskyj W, Gela G. Finite Element Solution for Electric Fields of Coronating DC Transmission Lines[J]. IEEE Trans. PAS, 1979, 98(3): 1000-1012.
- [8] 傅宾兰. 高压直流输电线路地面合成场强和离子流密度的计算[J]. 中国电机工程学报, 1987, 29(5): 5-8.

(上接第403页)

Transient Electromagnetic Phenomena in the Secondary Circuits of Voltage and Current Transformers in GIS (Measurements and Calculations)[J]. IEEE Trans on PD., 1992, 7(1): 434-441.

- [7] Dommel H W. Simulating Traveling Waves Inside and

Outside GIS Enclosures with EMTP [R]. Canadian Electrical Association, 1994.

- [8] Povh D. Modeling and Analysis Guidelines for Very Fast Transients[J]. IEEE Trans on PD., 1996, 4(11): 2028-2035.

(上接第406页)

步断路器控制器在满足控制要求的基础上,运行稳定,调试方便;软件算法合理,精度高,运算速度快,满足断路器同步投切的实时性的要求。

参考文献:

- [1] 邹积岩, 丛吉远, 董恩源. 电子操动的概念与实践 [J]. 高压电器, 2000, 36(5): 29-31.
- [2] CIGRE Working Group Task Force. Controlled Switching of HVAC Circuit Breakers-guide for Application Lines, Reactors, Capacitors, Transformers(Part I)[J]. Electra, 1999, 183(4): 43-57.
- [3] 段雄英, 邹积岩, 方春恩, 等. 相控真空开关同步关合电容器组控制策略及其实现 [J]. 大连理工大学学报, 2003, 43(4): 58-60.
- [4] 丁富华, 邹积岩, 方春恩, 等. 相控断路器投切空载变压器的

应用研究[J]. 中国电机工程学报, 2003, 25(3): 89-93.

- [5] 钱家骊, 袁大陆, 徐国政. 对1000 kV 电网操作过电压及相位控制高压断路器的讨论[J]. 电网技术, 2005, 29(10): 1-4.
- [6] 钱家骊. 相位控制高压断路器的动向[J]. 高压电器, 2001, 37(1): 38-40.
- [7] 林 莘, 徐建源, 高会军. 永磁操动机构动态特性计算与分析[J]. 中国电机工程学报, 2002, 22(6): 85-88.
- [8] ZOU Ji-yan, DUAN Xiong-ying, DONG En-yuan. Permanent Magnetic Actuator and Electronic Drive for Vacuum Switches [C]// Proceeding of 5th International Conference on Electrical Machines and Systems, Shenyang, 2001: 1323-1326.
- [9] 马少华, 王季梅. 72.5 kV 高压真空断路器永磁操动机构的研究与设计[J]. 中国电机工程学报, 2001, 21(12): 109-114.
- [10] 王其平. 电器电弧理论[M]. 北京: 机械工业出版社, 1991.
- [11] 王季梅. 真空电弧理论研究及其测试 [M]. 西安: 西安交通大学出版社, 1993.