

GIS 中 VFTO 辐射干扰的场-路-波协同法仿真研究

刘 莹¹, 赵学永², 谢拥军^{3*}, 武东伟³

(1.西安电子科技大学天线与微波技术国家重点实验室,西安,710071;

2.ANSYS Inc,Canonsburg Pennsylvania, USA;3.北京航空航天大学电子信息工程学院,北京,100191)

摘要 超高压气体绝缘开关设备(GIS)中的隔离开关操作产生的特快速瞬态过电压(VFTO)会对开关及其周围设备产生严重的干扰。针对这一工程问题,给出了 VFTO 辐射干扰的场-路-波协同仿真方法。结合工程实例,首先用准静态电磁场分析方法提取了 GIS 的等效电路,结合开关电弧的时变电阻模型,应用宽带电路方法得到 VFTO 的等效时变电压源,最后利用时域瞬态全波方法仿真了 VFTO 在空间内的电磁场干扰。该方法对于高压开关的设计具有参考意义。

关键词 超高压气体绝缘开关设备;特快速瞬态过电压;辐射干扰;协同仿真

DOI 10.3969/j.issn.1009-3516.2016.04.011

中图分类号 TM86 **文献标志码** A **文章编号** 1009-3516(2016)04-0059-05

Research on Collaborative Simulation of VFTO Radiation Interference in GIS by Field-Circuit-Wave

LIU Ying¹, ZHAO Xueyong², XIE Yongjun³, WU Dongwei³

(1. National Key Laboratory of Antennas and Microwave Technology, Xidian University, Xi'an 710071, China;

2. ANSYS Inc, Canonsburg Pennsylvania, USA;3. School of Electronic and Information Engineering, Beihang University, Beijing 100191, China)

Abstract: Aimed at the problem that the VFTO originating from operations of isolating switch in GIS may produce a fearful interference with the switch and its peripherals, a collaborative simulation method by Field-circuit-wave of VFTO radiation interference is proposed in this paper. Combined with project living example, the GIS equivalent circuit is extracted by means of quasi-static electromagnetic field analysis firstly. Furthermore, the equivalent time-varying voltage source of VFTO can be obtained via associating the time-varying resistance model of switching arc and the broadband circuit method. Finally, using transient full wave technique in time domain, the spatial electromagnetic interference by VFTO is simulated. This method has significance for reference to the high voltage switch design.

Key words: gas insulated switchgear (GIS); Very Fast Transient Overvoltage (VFTO); radiation interference; collaborative simulation

超高压气体绝缘开关设备(Gas Insulated Switchgear, GIS)中的隔离开关操作产生的特快速

收稿日期:2016-01-11

基金项目:国家自然科学基金(61571022)

作者简介:刘莹(1980-),女,湖北武汉人,博士生,主要从事电磁环境与工程电磁场分析等研究.E-mail: lymavis@vip.sina.com

通信作者:谢拥军(1968-),男,安徽滁州人,教授,博士生导师,主要从事电磁兼容与工程电磁场、计算微波与计算电磁学、微波通信、天线工程研究.E-mail: yjxie@buaa.edu.cn

引用格式:刘莹,赵学永,谢拥军,等. GIS 中 VFTO 辐射干扰的场-路-波协同法仿真研究[J]. 空军工程大学学报:自然科学版,2016,17(4):59-63. LIU Ying, ZHAO Xueyong, XIE Yongjun, et al. Research on Collaborative Simulation of VFTO Radiation Interference in GIS by Field-Circuit-Wave[J]. Journal of Air Force Engineering University: Natural Science Edition, 2016, 17(4): 59-63.

瞬态过电压(Very Fast Transient Overvoltage, VF-TO)^[1-2]具有幅值高、频率高和脉冲上升沿陡的特点,不仅对开关及其连接设备的绝缘有影响,而且其引发的瞬态电压会对周围设备产生严重的电磁干扰,甚至会影响人身安全^[3-4]。随着电力系统电压等级的提高,GIS设备中的VFTO影响愈加突出。因此,从二十世纪八十年代开始,国内外学者开始在机理研究、试验测试和数值仿真等方面展开对GIS设备的VFTO影响的研究^[5-9]。

由于VFTO的特性与GIS系统中的接线方式密切相关,难以通过实验得到各种状态下的VFTO特性,所以数值仿真是研究GIS中的VFTO特性的重要手段^[10-12],尤其是在GIS的设计阶段。因此,很多的国内外研究者进行了GIS中VFTO数值仿真的研究^[13-19]。其中,VFTO的电磁辐射波形及其空间分布是GIS设计阶段需要仿真获得重要参数。

VFTO的特性是由开关结构参数、阻抗及电弧电阻的模型决定的^[18-19]。而现有时域电磁场分析方法中,无法将电弧电阻的时变模型直接加入数值仿真中,因此多采用PSCAD等电路仿真工具,对GIS母线端的VFTO进行仿真。这种方法无法得到VFTO在线外空间的场分布,也不能考虑金属材料中的趋肤效应等损耗特性^[19]。另外,电路元件值一般是利用传输线模型进行简化求解,没有考虑几何结构、材料参数等对于等效集总参数的影响^[10,18]。

为了提高GIS中VFTO的计算精度,准确估算其产生的干扰辐射。本文利用电场计算方法提取GIS结构的等效电路元件值,这种方法考虑了GIS几何结构和材料特性。进一步地,将电弧的时变电阻模型代入等效电路模型中,求取相应的时变电压。再以时变电压为等效源,利用电磁场时域全波方法求取VFTO在空间中的辐射干扰。从而实现了GIS中VFTO辐射干扰的静电场方法、电路方法和电磁场全波方法相协同的准确仿真流程。

本文首先介绍了GIS中的VFTO产生的基本原理,和静电场、电路方法以及电磁场全波方法的仿真工具原理。然后给出了GIS中VFTO辐射干扰的场-路-波仿真流程。以实际工程为例,针对某型实际GIS结构,给出了其等效电路,结合开关电弧时变电阻模型,求出等效时变电压辐射源,从而给出了VFTO辐射干扰的空间分布。

1 基本原理

1.1 GIS中的VFTO辐射干扰的原理

超高压气体绝缘开关设备(GIS)是将高压开关

设备及母线封闭在一个接地的金属壳内,壳内充以3~4个大气压的气体作为相间及对地绝缘,图1。



图1 气体绝缘开关设备

Fig.1 Gas insulated switchgear

其中开关的结构如图2所示,由于隔离开关的速度仅为3~10 cm/s,且没有灭弧装置,每一次操作都会引起很多次的复燃。触头间的电压在纳秒时间内变化,其电压陡波在GIS中反复传播,形成幅值很高的瞬态过电压(VFTO)。

因此,VFTO的特性由开关电弧特性、GIS母线结构和参数、所连接的负载和集总元件的结构和参数决定。VFTO不仅影响系统的绝缘水平,而且通过外壳连接的非屏蔽部分辐射到环境中,对周围的二次设备产生严重的干扰,见图2。

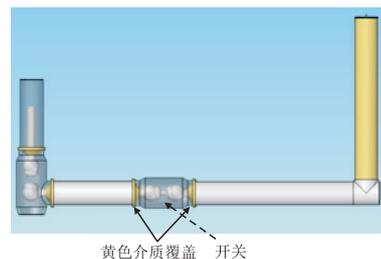


图2 GIS中VFTO透过介质覆盖产生外部辐射干扰示意图

Fig.2 The diagram of external radiation interference due to VFTO in GIS through the coverage of media

1.2 场-路-波协同仿真方法

VFTO波形的最大幅值部分大约在数十纳秒内,其能量主要在数百kHz到数十MHz范围^[20]。对应这一波长范围的电磁波,GIS结构可以近似视为准静态场结构。

在准静态近似下,可以忽略麦克斯韦方程组中的时变耦合项,即电场和磁场分别满足以下方程:

$$\nabla \times E = 0 \quad (1)$$

$$\nabla \times H = J \quad (2)$$

根据电感 L 、电容 C 的定义,建立待求解物理结构的几何模型和材料特性,求解式(1)和式(2),就可以得到物理结构的等效电感 L 和电容 C 。

当考虑金属材料的损耗时,则其趋肤深度 δ 为:

$$\delta = 1 / \sqrt{\pi f \mu \sigma} \quad (3)$$

式中: f 为电磁波频率; μ 为磁导率; σ 为电导率。

则可以近似得到趋肤深度内体电流为:

$$J = \hat{n} \times H / \delta \quad (4)$$

式中: \hat{n} 为结构表面的法向单位矢。从体电流引起的损耗可以算出由材料特性导致的损耗电阻。

本文采用 Ansys Q3D 软件建立 GIS 结构的几何模型,并对模型中结构定义材料属性、激励源特性等,提取 GIS 结构中等效的电阻、电感和电容,从而获得 GIS 模型的 RLC 等效电路。

考虑到放电造成的空气电弧可以等效为时变电阻,就可以得到 VFTO 形成的完整的等效电路模型。但是,由于现有时域电磁计算方法大多不支持时变电阻条件,这个模型是无法进行 VFTO 辐射电场的直接求解。

为了解决这一问题,本文采用 Ansys Designer 软件的宽带电路分析方法,分析得到电弧时变电阻造成的开关处的等效时变电压,并将其视为辐射源。在 VFTO 辐射的 MHz 频率以下,可以近似为时变电偶极子的辐射。以经典球坐标系 Z 轴方向上的时变电偶极子 $p(t)$ 为例,辐射电场为:

$$E(r, \theta, t) = \frac{1}{4\pi\epsilon} \left(\frac{1}{r^3} p(t) + \frac{n}{cr^2} p'(t) + \frac{n^2}{c^2 r} p''(t) \right) \quad (5)$$

式中:折射率 $n = \sqrt{\epsilon/\epsilon_0}$, 可以看到辐射场是由准静态场、近场和远场 3 项组成,对应距离 r 的倒数的幂次分别为 3、2、1。

为了准确计算 GIS 结构及其附近的辐射场,本文采用 Ansys HFSS-Transient 软件。该软件网格单元表面均与不连续面吻合,且可为不同阶数,能保证在复杂的 GIS 几何模型中计算的准确性。

综上所述,本文采用了准静态场(简称:场)分析方法、宽带电路(简称:路)分析方法和全波时域(简称:波)分析方法相结合来完成 GIS 中 VFTO 辐射特性的分析,其分析流程见图 3。

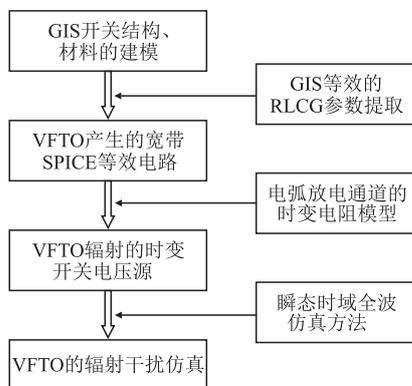


图 3 VFTO 辐射干扰的场-路-波协同仿真流程

Fig.3 Workflow for the collaborative simulation by Field-circuit-wave of VFTO radiation interference

2 数值仿真实例

本节通过实例,给出了 GIS 中 VFTO 的辐射干扰的场-路-波协同仿真方法。

2.1 GIS 结构的等效参数提取

某型 GIS 的模型见图 4,其外壳和其导体均为铝,其中充以氮气(其电参数等同于空气)。模型长约 27 m,距离地面 5 m。电网条件:220 kV,50 Hz。加在开关上的电弧瞬态电压波形激励,典型激励时间:0~10 μ s,上升沿 10 μ s 左右。因此后面的瞬态电场仿真时长为 10 μ s。

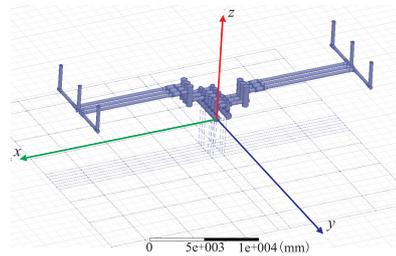


图 4 GIS 的仿真建模

Fig.4 Modeling and simulation of GIS

将模型导入 Q3D 软件,设定材料和激励后可以提取其等效 RLC 电路。

2.2 GIS 中 VFTO 的等效时变电压源模型

按照提取的 GIS 结构的等效 RLCG 值,可以建立 GIS 中 VFTO 的等效宽带 SPICE 电路,如图 5 所示。位于电路图中心的 5 端口网络是通过 Q3D 抽取的 GIS 模型的宽带等效电路,目的是导入电路仿真器后加时变电阻和瞬态激励从而得到加载在开关上的时变电压。因此在抽取等效电路参数时,尽管考虑了 3 排传输线的相互耦合效应,但是仅在其中的一条通路(也就是一条传输线沿线)上加端口。R58 和 R59 分别表示最外侧传输线的对地电阻 50 Ω ;C81 和 C82 为通过 Q3D 抽取的传输线截断端口的对地电容;V89 为电网电压 220 kV,50 Hz,由于瞬态仿真的时长为 10 μ s,因此该 50Hz 的交变电压在此时段内可视为直流;C87 为通过 Q3D 抽取的开关端面的对地电容;R12 为开关上的时变电阻,由下文式(6)给出。在开关上加电压探针 Varistor,通过瞬态电路仿真得到 Varistor 的波形。

在每次隔离开关动作中,随着开关间气隙击穿的过程,其间的开关电弧电阻逐渐变小,其值可以利用实验数据拟合为:

$$R(t) = R_s + R_0 e^{-t/T} + R_0 e^{-(t-80)/T} \quad (6)$$

式中: $R_s = 0.5 \Omega$; $R_0 = 10^{12} \Omega$; $T = 10^{-9} s$ 。

将式(6)代入图 5 所示的等效电路中,则可以获

得对应的 VFTO 时变电压,见图 6,其过程可以分为预击穿阶段、燃弧阶段和熄弧阶段,开关两端的电压也历经减小、击穿为零、再迅速增加的过程。电压在 ns 量级的时间内可以迅速在几百千 V 到零之间陡变,其数值和陡变斜率取决于图 5 等效电路中的各个元件值和电弧电阻的时变特性,换言之,是由 GIS 的设计参数决定的。

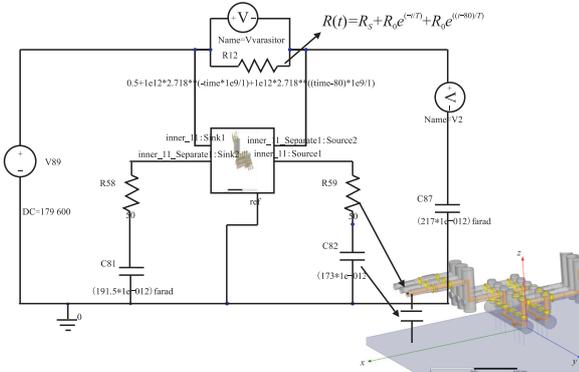


图 5 GIS 中 VFTO 的等效宽带 SPICE 电路

Fig.5 The equivalent bandwidth SPICE circuit of VFTO in GIS

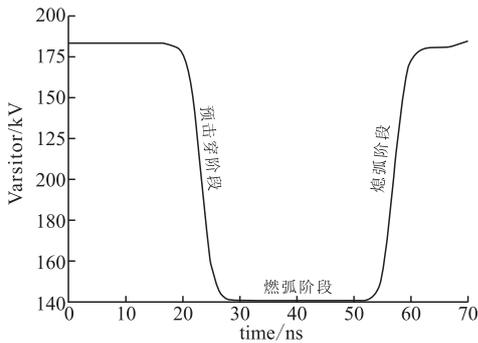


图 6 GIS 中 VFTO 在电弧击穿过程中的变化曲线
Fig.6 Changes for VFTO in GIS during the process of arc breakdown

2.3 VFTO 的辐射干扰

从图 2 中可以看出,由于开关附近的黄色介质盆子的相对介电常数为 4,没有介质损耗,因此 VF-TO 的辐射可以透过此区域辐射到外部空间中。在 HFSS 瞬态场分析工具,应用图 6 中的时变电压作为激励源,将其加入开关间隙位置,如图 7 所示,则可以仿真其在图 4 模型环境中的辐射场分布。

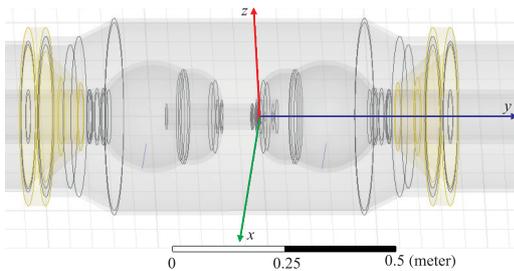


图 7 GIS 中 VFTO 等效的时变激励源

Fig.7 An equivalent time-varying excitation source for VFTO in GIS

图 8 给出了单个 VFTO 辐射干扰场的仿真模型,其中的红点是观测点的位置,VFTO 辐射源位于坐标原点。图 9 显示在距离辐射源空间坐标(-4,-3,0)处(设辐射源位置为坐标原点,单位为 m),辐射场电场强度随时间的变化曲线。可以看到,辐射干扰场电场强度随着 VFTO 的变化急速地在万 V/m 的量级上变化,这一场强,足以对二次设备产生严重的辐射干扰,甚至影响到人员的安全。

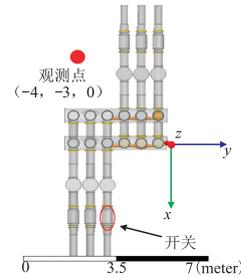


图 8 GIS 中 VFTO 辐射干扰的仿真模型

Fig.8 Simulation model of VFTO radiation interference in GIS

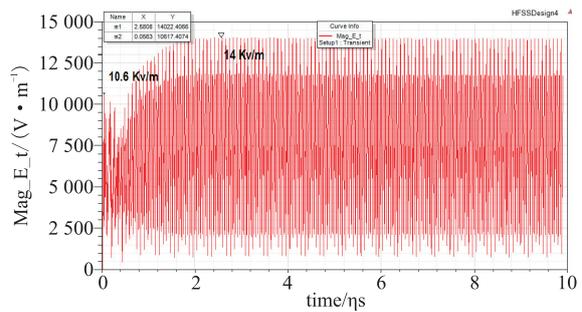


图 9 观测点处的辐射干扰场强的时变曲线

Fig.9 Time-varying changes for radiation interference field intensity at observation points

同样,模型内任意一点的时变场强都可以由仿真得到,见图 10,即为某一时刻 GIS 开关内外的 VFTO 辐射场强的分布。

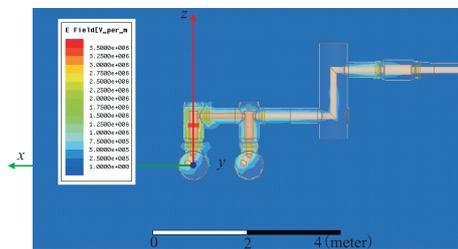


图 10 GIS 开关内外 VFTO 的辐射场强分布(某一时刻)

Fig.10 The distribution for radiation field intensity of VFTO inside and outside GIS switch(a moment)

3 结语

本文结合工程实例,给出了 GIS 中 VFTO 辐射干扰的协同分析方法。该分析方法考虑了 GIS 的

真实结构和材料特性,给出了VFTO引起的GIS开关内外的瞬态电磁场分布。本文方法可以在高压开关的设计阶段用于其设计参数的优化和设计水平的评估。

参考文献(References):

- [1] IEC 60071-1 :1993 International Standard :Insulation co-ordination—Part 1: Definitions, Principles and Rules[S].1993 .
- [2] IEC 60071-4 :2004 International Standard :Insulation co-ordination—Part 4: Computational Guide to Insulation Co-ordination and Modeling of Electrical Networks[S].2004
- [3] 肖登明,董越,黄东海.我国特高压输电工程的GIS技术[J].高电压技术,2006 ,32(12):115-117.
XIAO Dengming, DONG Yue, HUANG Donghai. GIS Technology of UHV Transmission Engineering in China [J]. High Voltage Engineering, 2006, 32(12):115-117(in Chinese)
- [4] Working group 33/13-09. Very Fast Transient Phenomena Associated with GIS[R]. Paris:CIGRE, 1988.
- [5] 林莘,孟涛,徐建源,等.快速暂态过电压对断路器中并联电容的影响[J].高电压技术,2009,35(10):35-40.
LIN Xin, MENG Tao, XU Jianyuan, et al.Influence of Fast Transients Overvoltage on Parallel Capacitance of Circuit Breaker[J].High Voltage Technology, 2009, 35(10): 35-40. (in Chinese)
- [6] 史保壮,张文元,邱毓昌.测量气体绝缘变电站中快速暂态过电压的微分积分方法[J].中国电机工程学报,1999,19(5):59-61.
SHI Baozhuang, ZHANG Wenyuan, QIU Yuchang. Differentiating/Integrating System for the Measure-ment of Very Fast Transient Overvoltages in GIS[J].Proceedings of the CSEE, 1999, 19(5): 59-61.(in Chinese)
- [7] 马国明,李成榕,全江涛,等.采用套管传感器测量变压器线端快速暂态过电压的方法[J].中国电机工程学报,2010,30(33):122-128.
MA Guoming, LI Chengrong, QUAN Jiangtao, et al. Measurement of VFTO on Transformer Entrance with Transformer Bushing Sensor[J]. Proceedings of the CSEE, 2010, 30(33): 122-128.(in Chinese)
- [8] 林莘,李爽,徐建源,等.考虑GIS外壳传输特性的VFTO计算模型[J].电网技术,2010,34(11):203-207.
LIN Xin, LI Shuang, XU Jianyuan, et al.Calculation Model of VFTO Considering Transmitting Characteristics of GIS Enclosure [J].Power System Technology, 2010, 34(11): 203-207.(in Chinese)
- [9] 岳功昌,刘卫东,陈维江,等.气体绝缘开关设备中特快速瞬态过电压的全过程测量方法[J].中国电机工程学报,2011,31(31):18-27.
YUE Gongchang, LIU Weidong, CHEN Weijiang, et al. Measurement Methods of Very Fast Transient Overvoltage in gas Insulated Switchgear with Complete Process [J].Proceedings of the CSEE, 2011, 31(31): 18-27.(in Chinese)
- [10] 陈维江,颜湘莲,王绍武,等.气体绝缘开关设备中特快速瞬态过电压研究的新进[J].中国电机工程学报,2011,31(31):1-11.
CHEN Weijiang, YAN Xianglian, WANG Shaowu, et al. Recent Progress in Investigations on Very Fast Transient Overvoltage in Gas Insulated Switchgear [J].Proceedings of the CSEE, 2011, 31(31): 1-11.(in Chinese)
- [11] 谷定燮,修木洪,戴敏,等.1000kV GIS变电所VFTO特性研究[J].高电压技术,2007,33(11):5-10.
GU Dingxie, XIU Muhong, DAI Min, et al. Study on VFTO Characteristics in 1000 kV GIS Substation [J]. High Voltage Technology, 2007, 33(11): 5-10.(in Chinese)
- [12] 杜巍,李永刚,刘教民,等.基于时域有限元的VFTO全过程仿真新方法[J].中国电机工程学报,2014,34(18):3004-3012.
DU Wei, LI Yonggang, LIU Jiaomin, et al. A New VFTO Whole Process Simulation Method Based on Time Domain Finite Element [J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(18): 3004-3012.(in Chinese)
- [13] 王磊,陈洁,万磊,等.特高压GIS变电站VFTO仿真计算研究[J].电力建设,2014,35(9):1-6.
WANG Lei, CHEN Jie, WAN Lei, et al. VFTO Simulation Study for UHV GIS Substation [J]. Electric Power Construction, 2014, 35(9):1-6.(in Chinese)
- [14] FUJIMOTO N, DUCJ E, BOGGS S. Transient Ground Potential Rises in gas Insulated Substations-Experimental Studies[J]. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, 1982, 101(10):3603-3609.
- [15] DELIVERYICK E, FUJIMOTO N, HARVEY G. Transient Ground Potential Rises in gas Insulated Substations problem Identification and Mitigation[J]. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, 1982, 101(10):3610-3619.
- [16] CHEVALLEY F, SAUVAIN H. Protection of Microprocessor Based Distributed Control units in gas Insulated Substations Against Electromagnetic Interference [M]. Paris: CIGRE, 1988.
- [17] POVH D, SCHMITT H. Modeling and Analysis Guidelines for Very Fast Transients[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 1996, 11(4): 231-238.
- [18] 王飞鸣,林莘,谢寅志,等.特高压半封闭气体绝缘组合电器的暂态电压仿真分析[J].高电压技术,2012,38(2):407-413.
WANG Feiming, LIN Xin, XIE Yinzi, et al. Simulation Analysis on Transient Voltage of UHV Hybrid Gas Insulated Switchgear [J]. High Voltage Technology, 2012, 38(2):407-413.(in Chinese)
- [19] 邵冲,杨钰,王赞基. GIS开关电弧建模及其对VFTO波形的影响[J].电网技术,2010,34(7):200-205.
SHAO Chong, YANG Yu, WANG Zanji. Modeling of GIS Switching arc and its Effect on VFTO Waveforms [J]. Power System Technology, 2010, 34(7):200-205.(in Chinese)
- [20] 杨钰,王赞基,邵冲. GIS母线结构及参数对VFTO波形的影响[J].高电压技术,2009,35(9):2306-2312.
YANG Yu, WANG Zanji, SHAO Chong. Effect of GIS Bus Structure and Parameters on VFTO Waveform [J]. High Voltage Technology, 2009, 35(9): 2306-2312. (in Chinese)

(编辑:徐楠楠)