

DOI:10.13296/j.1001-1609.hva.2016.05.003

基于分段电弧模型的多次重燃弧VFTO计算与分析

张建功¹, 王红超², 赵 军¹, 刘震寰¹, 谢鹏康³, 陈恒林³

(1. 中国电力科学研究院武汉分院电网环境保护国家重点实验室, 武汉 430074;

2. 中国电力技术装备有限公司, 北京 100052; 3. 浙江大学电气工程学院, 杭州 310027)

摘要: 精确的隔离开关电弧模型对变电站特快速暂态过电压(very fast transient overvoltage, VFTO)的仿真有着关键性的作用。文中对开关电弧的电阻模型进行了优化,建立了电弧的分段模型。同时,笔者从间隙击穿,高频电弧熄弧对电弧重击穿的影响等方面进行了讨论,并以此为判据,建立了可以反映VFTO多次重燃过程的计算流程。根据实际测试线路,在ATP仿真软件中搭建了仿真电路并进行了暂态仿真。仿真结果表明,相对于单次燃弧的传统电弧模型,基于分段电阻的多次重燃弧模型可以更好地模拟实际开关特性。在此基础上,文中对重燃弧过程中各个关键位置的VFTO波形以及流过隔离开关的电流波形进行了计算与分析。

关键词: VFTO; 电弧模型; 重燃弧。

Calculation and Analysis of Multiple Restrikes VFTO Based on Piecewise Arc Model

ZHANG Jiangong¹, WANG Hongchao², ZHAO Jun¹, LIU Zhenhuan¹,
XIE Pengkang³, CHEN Henglin³

(1. State Key Laboratory of Power Grid Environmental Protection, Wuhan Branch of China Electric Power Research Institute, Wuhan 430074, China; 2. China Electric Power Equipment and Technology Co., Ltd., Beijing 100052, China; 3. College of Electrical Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China)

Abstract: Precise arc model of disconnecting switches plays an important role in multiple restrikes very fast transient overvoltage(VFTO) simulation. In this paper, switch arc resistance model is optimized and a piecewise model is built. Meanwhile, the influence of gap breakdown and high frequency arc extinguishing to the restrikes of VFTO is discussed. An arc calculating flow of disconnecting switches is built which can reflect the multiple restrikes. According to real test line, the simulation model is built in ATP software, and dynamic simulation has been done. The results show that the piecewise resistor multiple-restrike model is better than the traditional single-restrike model in simulation of the physical process of VFTO. Using the proposed model, the VFTO in key positions and current waveform through the disconnecter are analyzed during the arcing process.

Key words: VFTO; arc model; multiple restrike

0 引言

随着电力系统的不断发展,气体绝缘开关设备(gas insulated switchgear, GIS)在高压变电站中得到了广泛的应用。在变电站隔离开关动作时,会产生幅值较高,陡度很大,频率很高的特快速暂态过电压(very fast transient overvoltage, VFTO),对变电站中

的电力设备造成巨大的危害^[1-7]。在针对VFTO的研究中,由于实验条件受限,目前国内外缺乏对VFTO的大量试验数据^[3],因此有必要通过仿真计算来分析VFTO各项特征。

国内外学者对VFTO的仿真研究表明^[8-10],建立精确的电弧模型是VFTO仿真的关键。通常仿真中采用指数时变电阻等效高频电弧^[11],文[10]采用了起弧,燃弧与电弧熄灭的电阻模型,然而并未考虑到

收稿日期:2015-12-15; 修回日期:2016-01-26

基金项目:国家电网公司科技项目(GY71-11-050, GY71-14-036)。

Project Supported by Science and Technology Project of SGCC(GY71-11-050, GY71-14-036).

电阻变化的动态过程。现有研究中,对整个开关动作期间介质击穿,电弧熄灭以及电弧重燃过程的研究很少。

笔者在时变电阻模型的基础之上,运用麦也尔电弧理论(Mayr-Schwar)对电弧模型进行了优化,充分考虑了电弧起弧,燃弧以及灭弧期间电弧物理特性变化对电弧电阻的影响,利用电解质击穿以及能量平衡理论实现了 VFTO 多次重燃弧的计算流程。在 EMTP-ATP 软件中建立了 VFTO 测试电路的仿真模型,对比了传统时变电阻模型和分段电弧模型的仿真结果,并对 VFTO 重燃弧的计算结果进行了详细讨论。

1 隔离开关电弧模型

1.1 电弧模型

在传统的 VFTO 计算中,一般将电弧等效为一个可变电阻的形式^[12]

$$R=r_0+re^{-t/\tau_1} \quad (1)$$

式(1)中: τ_1 为时间常数; r_0 表示静态电阻通常取 0.5Ω ; r 为电阻时变参数。由式(1)可知,可变电阻模型考虑了电弧起弧过程中的暂态过程,但没有考虑熄弧后电阻的变化。

在电弧的预击穿阶段,隔离开关的电弧电阻快速下降,文[9]指出,触头间击穿通道开始建立之后,电弧通道会在几纳秒内建立,弧阻瞬间跌落到一个较小值。在考虑击穿延时的情况下,击穿阶段的电弧电阻可以表示为

$$R=2Z(\frac{t_0}{t}-1) \quad (2)$$

式(2)中: Z 表示 GIS 母线的波阻抗; t_0 表示火花击穿时间, $0<t<t_0$ 。

麦也尔电弧理论可以用来准确地描述隔离开关,电弧熄灭的物理过程:电子在较强的电场作用下积累能量,当它与 SF_6 气体分子碰撞时,产生了碰撞电离。在隔离开关动静触头之间游离的粒子数量呈指数性增加,单位时间内通过电弧横截面的电子数增加,流过隔离开关的电流增加,同时电弧直径变大,内部热能增加,这两方面的原因使得电弧电阻迅速减小,电弧开始燃烧。当单位时间内通过电弧截面的电子数减少时,流过隔离开关的电流减小,电弧直径变小,电弧电阻增加。

麦也尔模型基于热游离,热惯性以及热平衡推导得到,其数学表达式为

$$\frac{\tau}{g} \frac{dg}{dt} = \frac{P_s - u_h^2 g}{P_s} = 1 - \frac{u_h^2 g}{P_s} \quad (3)$$

式(3)中: P_s 为电弧散热功率,取为常数; g 为电弧电导; τ 为电弧时间常数; u_h 为电弧电位梯度。

令 $R=1/g$, 带入式(3)中,得到

$$\tau \frac{dR}{dt} = R - \frac{u_h^2}{P_s} \quad (4)$$

解式(4)可得动态电弧电阻

$$R(t) = e^{\frac{t}{\tau_2}} \left(R_0 - \frac{1}{\tau P_s} \int_0^t u_h^2 e^{-\frac{t}{\tau_2}} dt \right) \quad (5)$$

式(5)中: R_0 为电弧的起始电阻; t 为燃弧时间。

式(5)描述的动态电弧电阻,预击穿时间短,电阻下降时间快,可以反映出熄弧阶段恢复电压对电弧电阻的影响。在电弧燃弧阶段, $u_h > 0$,由式(5)可知,电弧电阻可以等效为一个较小恒值电阻,在电弧熄灭阶段,电弧电位梯度 $u_h \approx 0$,电弧电阻呈指数上升。

基于以上分析,笔者将电弧电阻分为 3 个阶段进行分析。第一阶段为起弧阶段,电弧电阻随时间呈指数型下降,弧阻用式(1)表示,其中 τ_1 取 2 ns , r 取 $10^{12} \Omega$ 。在电弧熄灭阶段,式(5)中,取电弧电位梯度 $u_h \approx 0$, τ_2 取 $1 \mu\text{s}$, R_0 取 50Ω ^[13]。

1.2 电弧重击穿计算流程

关于电弧的重击穿,主要有两种相应的理论:气体电介质理论和能量平衡理论。气体电介质理论认为,电弧的起弧是由于外加电场将间隙击穿的结果。因此,交流电弧的熄弧条件是电流过零后,弧隙介质恢复强度在任何时刻始终高于弧隙上的恢复电压。能量平衡理论认为,电弧的重燃并不是电流过零后简单的电压击穿,而是电路及弧隙之间能量的再次平衡。

电介质理论认为,只要间隙的电压大于间隙间的击穿电压即认为电极之间出现电弧。能量平衡理论认为,只有当电弧注入的能量小于电弧损失的能量时,电弧才开始熄灭,两种理论对实验均有较好的吻合度。文中利用电介质理论作为电弧击穿的判据,并利用能量平衡理论作为电弧熄灭的判据,建立的电弧重燃计算流程见图 1。

在短间隙条件下, SF_6 气体的击穿电压(kV)为^[14]

$$U_0 = 88.5\delta d + 0.38 \quad (6)$$

式(6)中: δ 为空气相对密度; d 为两级间的距离,cm。

如式(6)所示的电弧起弧判据,当动静触头之间的电压大于 SF_6 气体的击穿电压时,则间隙击穿,电弧开始燃烧。

电弧熄弧时,根据能量平衡理论^[15-17],弧隙的输入能量小于弧隙的散出能量时电弧能量降低,电弧熄灭。隔离开关击穿的初始阶段,虽然交流高频电

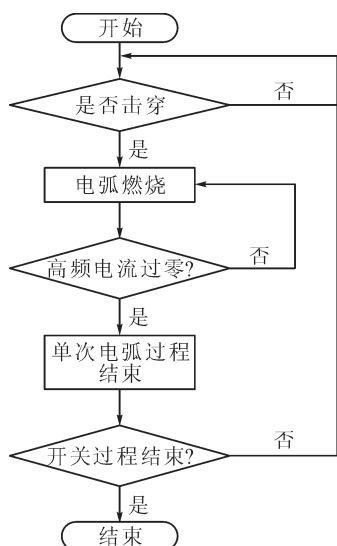


图 1 重燃弧计算流程图

Fig. 1 Calculation flow chart of heavy arc

流多次过零,但因输入弧隙的能量大于散出的能量,电弧无法熄弧。

基于能量平衡理论的熄弧判据见图 2,通常 VFTO 频率为几兆到几十兆赫兹之间^[3],在仿真计算时,取仿真时间步长为 10^{-9} s,对相隔一个时间步长的电流进行采样,当两点的电流值相乘小于零时,说明电流过零。当两点电流差值小于一定值 K 时,说明电流过零时变化趋势很小,电弧趋于熄灭。

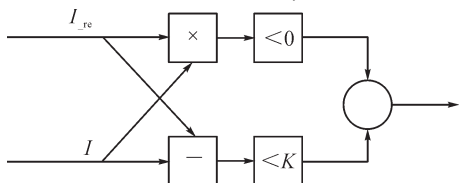
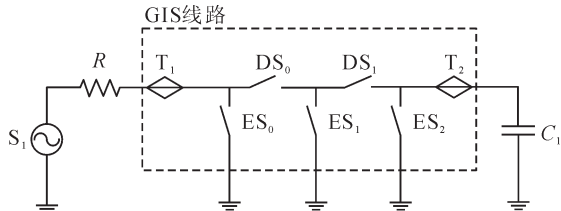


图 2 基于能量平衡理论的电弧熄灭判据

Fig. 2 Arc extinction criterion based on energy balance theory

2 GIS 暂态电路模型

GIS 暂态测试线路见图 3^[18-20],虚线框内为 GIS 管线。



S_1 —变压器,用于模拟交流变压器; C_1 —独立电容,用于模拟变电站母线; T_1 、 T_2 —GIS绝缘套管; R —保护电阻; DS —隔离开关; ES —接地开关。

图 3 变电站测试电路

Fig. 3 Substation test circuit

建立准确的元件模型是进行有效仿真的基础,根据传输线理论,图 3 中各主要设备的高频模型见表 1^[8]。

表 1 暂态计算中各电气元件模型及参数

Table 1 Model and parameters of the electrical components in transient calculation

元件	等效电路	参数
变压器		$L=20 \text{ mH}$ $C=50 \text{ pF}$
保护电阻		$R=1 \text{ k}\Omega$
绝缘套管		$C=200 \text{ pF}$
接地开关		$C=240 \text{ pF}$
隔离开关		阻值可变
		$C=80 \text{ pF}$

3 仿真结果与分析

按图 3 所示的测试线路结构,在 EMTP-ATP 软件中建立过电压仿真模型,开关电弧用可变电阻表示,其余元件建模如表 1 所示。图 3 所示的测试线路,变压器输出电压等级为 110 kV,则每相的相电压为 63.5 kV,电源电压峰值设置为 89.8 kV。隔离开关运动速度为 1.2 m/s,假设母线电容充电达到 89.8 kV,在电源电压到达负的最大值时断开隔离开关,此时过电压幅值最大。

3.1 电弧模型对 VFTO 波形频率的影响

得到隔离开关在母线负载侧的过电压见图 4。

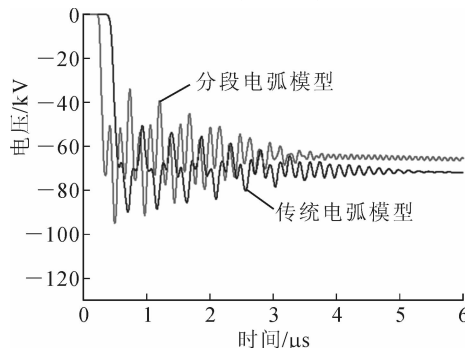


图 4 隔离开关母线侧 VFTO 波形

Fig. 4 Waveform of isolated switch bus side VFTO

比较图 4 中分段电弧和传统电弧模型所得波形见表 2。

结合图 4 以及表 2 可知,分段电弧模型 VFTO 的电压陡度以及电压幅值均大于传统的可变电阻模型。由于分段电弧模型在起弧阶段电弧电阻呈双

表 2 VFTO 波形参数

Table 2 VFTO waveform parameters

参数	分段电弧模型	传统电阻模型
幅值/kV	92.23	89.90
电压陡度/(kV·μs ⁻¹)	659	259

指数形式下降, 弧道电阻对过电压的限制作用很小, 所以电压陡度大于可变电阻模型。对两种模型下的 VFTO 波形进行频谱分析, 见图 5。

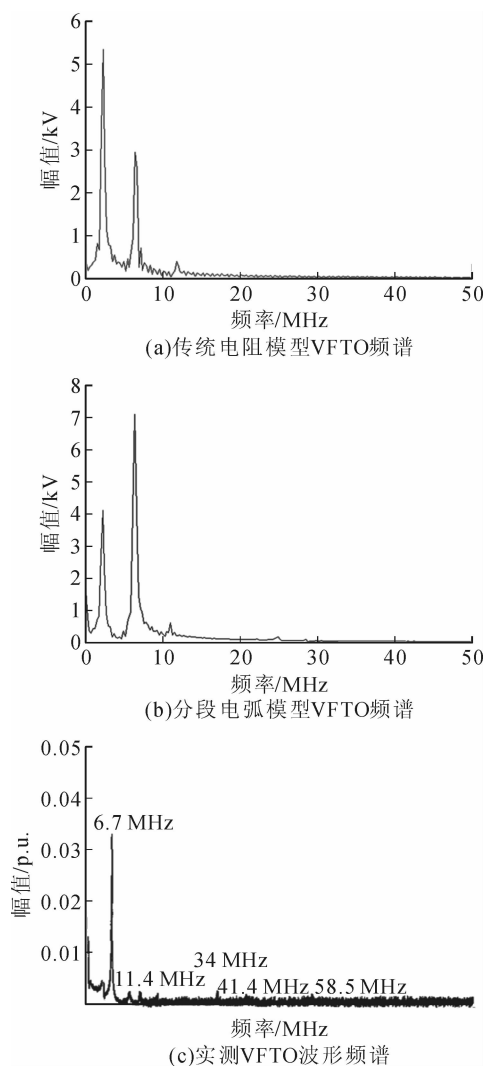


图 5 隔离开关母线侧 VFTO 波形频谱图

Fig. 5 Wave spectrum of isolation switch bus side VFTO

由图 5 可知, 隔离开关母线侧 VFTO 主要包含 3 个主要的频率分量。

1) $f < 1$ MHz: 由系统参数决定, 与电弧电阻无关。

2) $1 \text{ MHz} < f < 10 \text{ MHz}$: VFTO 的主要频率, 幅值最高, 由过电压行波在装置中来回震荡生成, 决定了整个系统的绝缘强度。

3) $f > 10 \text{ MHz}$: 幅值很低, 可以忽略不计。

对比图 5 两种电阻模型的 VFTO 频谱, 分段电弧模型 VFTO 频谱中, 高频分量所占比重大于传统

可变电阻模型。主要原因是电弧分段电阻在起弧和灭弧阶段剧烈变化, 造成过电压行波在装置中震荡。文[3]对 VFTO 波形进行了实测, 测量得到的 VFTO 波形如图 5(c)所示。图 5(c)中, 6.7 MHz 为 VFTO 的主频, 是电压波在母线上折反射的频率。对比图 5(a), 图 5(b)以及图 5(c)可知, 分段电弧模型可以更好地反映现实情况。

3.2 GIS 关键位置 VFTO 重击穿波形

计算得到变压器入口处 VFTO 重击穿波形见图 6, 过电压的最大值出现在第一次击穿和最后一次击穿。在第一次击穿时由于母线充电电压和电源电压相位相差 180° , 导致过电压幅值较大, 随后的击穿电压较小。随着开关触头的运动, 隔离开关击穿电压增加, 导致过电压幅值增加。

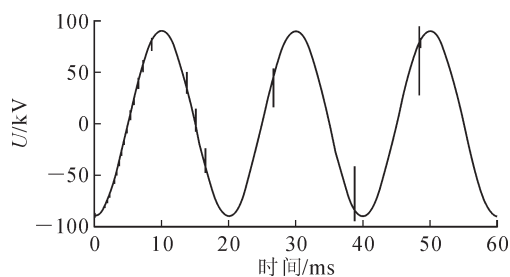


图 6 变压器入口 VFTO 重击穿波形

Fig. 6 Transformer VFTO punch through the entrance to the wave-form

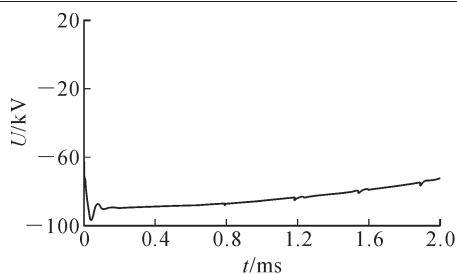
电弧第一次击穿和最后一次击穿时, 变压器入口处过电压波形见图 7, 由于线路阻抗以及变压器保护电阻等因素的存在, 过电压幅值并不高, 不足以引起变压器的匝间击穿。但该过电压会加速变压器匝间绝缘的老化, 并可能在变压器绕组内部产生谐振过电压, 对绕组内部绝缘造成威胁, 应给予关注^[9]。

在进行 VFTO 建模计算时, 将变电站母线等效为电容, 仿真得到母线电容上重击穿电压波形见图 8。

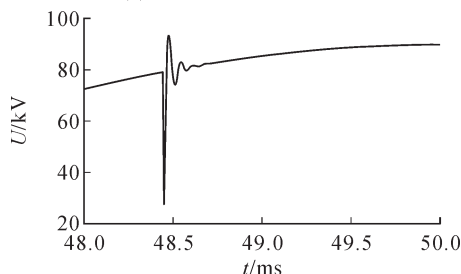
图 8 所示的隔离开关母线侧过电压波形, 每次击穿放电, 电源通过电弧向负载电容充电, 电容电压出现跳变, 当电弧熄灭, 电容上电压基本保持不变, 母线电容电压呈现出台阶特性。过电压最大值在 130 kV 左右。

隔离开关变压器侧的电压为正弦波形, 母线侧电压为台阶状。仿真得到隔离开关两端电压波形见图 9。在隔离开关断开初期, 隔离开关频繁击穿, 当隔离开关完全断开, 母线电压保持恒定值, 电源电压为正弦波。

图 9 中, 当隔离开关母线侧电压与变压器侧



(a)电弧初次击穿过电压波形



(b)电弧末次击穿过电压波形

图7 单次击穿变压器入口处过电压波形

Fig. 7 Over voltage waveform at the entrance of a single breakdown transformer

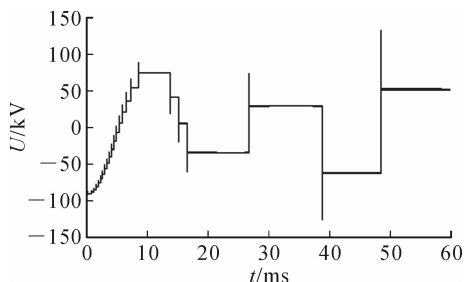


图8 母线上 VFTO 重击穿电压波形

Fig. 8 Voltage waveform on VFTO

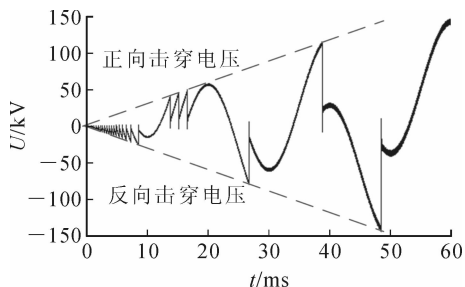


图9 隔离开关两端 VFTO 重击穿电压波形

Fig. 9 Voltage waveform of isolation switch at the ends of the VFTO Punch through

电压的差值大于击穿电压时,如式(6)所示,在文中近似认为隔离开关动作期间,击穿电压随时间线性增加。

3.3 隔离开关电流波形

定义从母线流至变压器侧电流为正方向,得到流过隔离开关的电流波形见图10。随着距离增加,击穿间隔时间增加,击穿电压越来越大,击穿电流幅值不断增加。

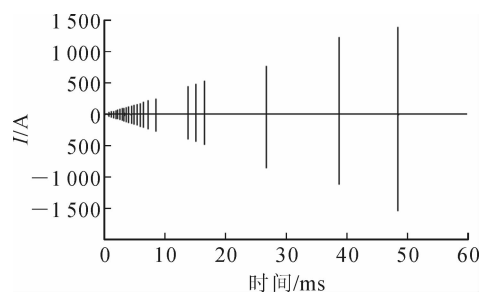
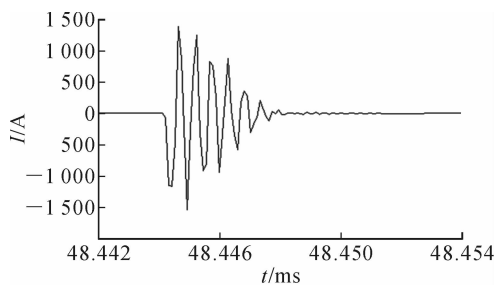


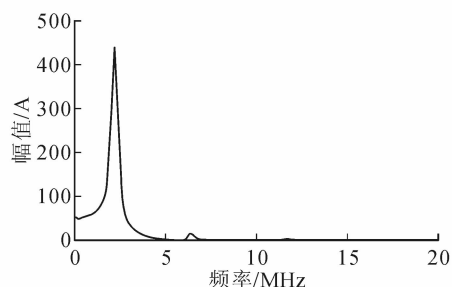
图10 隔离开关重复击穿过电流波形

Fig. 10 Current waveform of isolation switch repeatedly hit through

隔离开关断开过程中,单次击穿电流波形见图11,对单次击穿电流进行傅里叶变换,得到其频谱图。



(a)单次击穿过电流时域波形



(b)单次击穿过电流频谱分布

图11 隔离开关单次过电流波形

Fig. 11 Current waveform of isolation switch single pass

由图11所示,流过隔离开关电流的最大值在1300A左右,隔离开关过电流在1~10MHz频谱分量最大,与隔离开关过电压的频谱分布特性基本一致。

4 结论

1)根据隔离开关燃弧的物理过程,对传统的可变电阻模型进行了优化,得到了隔离开关分段电弧模型。利用介质击穿理论分析了隔离开关的击穿过程,采用能量平衡理论分析了电弧的熄弧过程,据此实现了电弧多次击穿重燃弧仿真。

2)根据VFTO测试电路,在EMTP-ATP软件中搭建了仿真模型,计算得到了传统电弧模型和分段电阻模型的波形,结果表明,分段电阻模型可以更

好地反映电弧燃烧的高频物理过程。

3) 计算得到了隔离开关各个关键位置的 VFTO 重击穿波形以及重击穿条件下流过开关的暂态电流的波形。结果表明, 在完整的重击穿燃弧过程中, 隔离开关母线电压呈现出台阶特性, 过电压过电流随时间增加, 过电压和过电流的主要频率在 1~10 MHz 之间, 所产生的 VFTO 幅值并不高, 不会造成变压器绕组击穿。

参考文献:

- [1] 周挺. 特高压 GIS 中快速暂态过电压的特性研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2013.
ZHOU Ting. The research of characteristics of very fast transient overvoltage in GIS system[D]. Wuhan: Huazhong University of Science & Technology, 2013.
- [2] 王娜. 特高压 GIS 中隔离开关操作引起的电磁暂态问题研究[D]. 沈阳: 沈阳工业大学, 2013.
WANG Na. The study of electromagnetic transient problem caused by disconnector switching operation in UHV GIS[D]. Shenyang: School of Electrical Engineering Shenyang University of Technology, 2013.
- [3] 刘卫东, 汪林森, 陈维江, 等. 特高压 GIS 特快速暂态过电压试验重复击穿过程研究[J]. 高电压技术, 2011, 37(3): 644-650.
LIU Weidong, WANG Linsen, CHEN Weijiang, et al. Investigation of the VFTO related repeated breakdown processes in UHV GIS[J]. High Voltage Engineering, 2011, 37(3): 644-650.
- [4] 许军. 特高压 GIS 快速暂态过电压(VFTO)的测量及分析[D]. 北京: 华北电力大学, 2011.
XU Jun. Measurement and analysis of very fast transient overvoltage (VFTO) induced by operating disconnector in 1 000 kV GIS[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2011.
- [5] 张重远, 梁贵书, 崔翔, 等. 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.
ZHANG Chongyuan, LIANG Guishu, CUI Xiang, et al. The effects of operations of the disconnector switch on the secondary circuits in gas insulated substations[J]. High Voltage Engineering, 2002, 28(2): 5-7.
- [6] 李文升. 220 kV GIS 用电子式电流电压互感器在午山数字化变电站中的应用[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(16): 157-162.
LI Wensheng. Application of 220 kV GIS electronic transformers in Wushan digital substation[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(16): 157-162.
- [7] 谷定燮, 修木洪, 戴敏, 等. 1 000 kV GIS 变电所 VFTO 特性研究[J]. 高电压技术, 2007, 33(11): 27-32.
GU Dingxie, XIU Muhong, DAI Min, et al. Study on VFTO of 1 000 kV GIS substation[J]. High Voltage Engineering, 2007, 33(11): 27-32.
- [8] 田芸, 吴细秀, 张欢. VFTO 计算中隔离开关燃弧模型探究[J]. 高压电器, 2013, 49(5): 106-113.
TIAN Yun, WU Xixiu, ZHANG Huan. Review on the arcing model for disconnectors in the calculation of VFTO[J]. High Voltage Apparatus, 2013, 49(5): 106-113.
- [9] 林莘, 王娜, 徐建源. 动态电弧模型下特快速瞬态过电压特性的计算与分析[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(16): 157-164.
LIN Xin, WANG Na, XU Jianyuan. Calculation and analysis of very fast transient over-voltage characteristic on the condition of dynamic arcing model[J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(16): 157-164.
- [10] 孟涛, 林莘, 徐建源. 分段电弧模型下 VFTO 的计算与分析[J]. 电工技术学报, 2010, 25(9): 69-73.
MENG Tao, LIN Xin, XU Jianyuan. Calculation of very fast transient over-voltage on the condition of segmental arcing model[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2010, 25(9): 69-73.
- [11] 王娜, 林莘, 徐建源, 等. 特高压 GIS 变电站中快速暂态过电压仿真及其特性分析[J]. 高电压技术, 2012, 38(12): 3310-3315.
WANG Na, LIN Xin, XU Jianyuan, et al. Simulation and characteristics analysis of very fast transient overvoltage in gas insulated substation with ultra high voltage[J]. High Voltage Engineering, 2012, 38(12): 3310-3315.
- [12] 林莘, 李爽, 徐建源, 等. 超高压 GIS 暂态壳体电压的仿真研究[J]. 高压电器, 2011, 47(3): 12-17.
LIN Xin, LI Shuang, XU Jianyuan, et al. Simulation of transient enclosure voltage in EHV GIS[J]. High Voltage Apparatus, 2011, 47(3): 12-17.
- [13] ZHAN Huamao, DUAN Shaofeng, LI Chengrong, et al. A novel arc model for very fast transient overvoltage simulation in a 252 kV gas-insulated switchgear[J]. IEEE Transactions on Plasma Science, 2014, 42(10): 3423-3429.
- [14] 林福昌. 高电压工程[M]. 北京: 中国电力出版社, 2006.
LIN Fuchang. High voltage engineering[M]. Beijing: China Electric Power Press, 2006.
- [15] XIN Weifeng, ZHANG Guogang, WANG Jianqiang, et al. Simulation of very fast transient overvoltage caused by disconnector Switch operation in SF₆ gas insulated switchgear using multi-restrike arcing model[C]//2013 2nd International Conference on Electric Power Equipment Switching Technology (ICEPE-ST). [S.l.]: IEEE, 2013: 1-4.
- [16] BUROW S, KOEHLER W, TENBOHLEN S, et al. Measurement system for very fast transient overvoltages in gas insulated switchgear[C]//2013 IEEE Electrical Insulation Conference (EIC). Ottawa: IEEE, 2013: 215-219.

(下转第 26 页)

- Electric Power University, 2009, 36(5): 12-16.
- [13] 朱立颖, 武建文. 横向磁场下中频真空电弧形态及电弧电压特性[J]. 中国电机工程学报, 2011, 31(1): 131-137.
ZHU Liying, WU Jianwen. Modes of intermediate-frequency vacuum arc and characteristics of arc voltage under transverse magnetic field[J]. Proceedings of the CSEE, 2011, 31(1): 131-137.
- [14] SCHULMAN M B, SLADE P G, HEBERLEIN J V. Effect of an axial magnetic-field upon the development of the vacuum-arc between opening electric contacts[J]. IEEE Transactions on Components Hybrids and Manufacturing Technology, 1993, 16(2): 180-189.
- [15] 王万岗, 吴广宁, 高国强, 等. 高速铁路弓网电弧试验系统[J]. 铁道学报, 2012, 34(4): 22-27.
WANG Wangang, WU Guangning, GAO Guoqiang, et al. The pantograph-catenary arc test system for high-speed railways[J]. Journal of the China Railway Society, 2012, 34(4): 22-27.
- [16] 王万岗. 高速铁路弓网电弧动态特性研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2013.
WANG Wangang. Study of dynamic characteristic for high speed railway pantograph arcing[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2013.
- [17] 李俊山, 胡双演, 史德琴. 数字图像处理[M]. 北京: 清华大学出版社, 2009.
LI Junshan, HU Shuangyan, SHI Deqin. Digital image processing[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2009.
- [18] 秦襄培. MATLAB 图像处理与界面编程宝典[M]. 北京: 电子工业出版社, 2009.
QIN Xiangpei. Image processing and interface programming about MATLAB[M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2009.
- [19] 李 畅. 高压电弧图像采集与处理[D]. 长春: 东北电力大学, 2011.
LI Yang. Collection and processing procedure of high tension arc images[D]. Changchun: Northeast Dianli University, 2011.
- 古 圳(1991—), 男, 硕士研究生, 主要从事弓网电弧电气与形态特性方面的研究(通信作者)。
- 高国强(1981—), 男, 副教授, 主要从事弓网系统电气磨损方面的研究。
- 吴广宁(1969—), 男, 教授, 博导, 主要从事高电压绝缘技术和弓网系统机械电气相互作用损伤机理的研究。
- 朱光亚(1989—), 女, 博士研究生, 主要从事高速铁路弓网电弧等离子体特性的相关研究。

(上接第 19 页)

- [17] 万亦如, 杜 鹃, 刘 庄. 隔离开关多次重燃的 VFTO 计算模型[J]. 浙江电力, 2014(2): 22-25.
WAN Yiru, DU Juan, LIU Zhuang. VFTO calculation model for multiple restrikes of disconnecting switches[J]. Zhejiang Electric Power, 2014(2): 22-25.
- [18] 李良书, 赵宏博, 杨兰均, 等. 多次重燃弧 VFTO 的仿真隔离开关模型研究[J]. 电气技术, 2010(s1): 88-91.
LI Liangshu, ZHAO Hongbo, YANG Lanjun, et al. Investigation of simulation disconnect switch model for VFTO with multi-restrike[J]. Electric Technology, 2010(s1): 88-91.
- [19] KUMAR V, THOMAS M J, NAIDU M S. Influence of switching conditions on the VFTO magnitudes in a GIS[J]. IEEE Trans. on Power Delivery, 2001, 16(4): 539-544.
- [20] RAO M M, THOMAS M J, SINGH B P. Frequency characteristics of very fast transient currents in a 245 kV GIS [J]. IEEE Trans. on Power Delivery, 2005, 20(4): 2450-2457.
- 张建功(1975—), 男, 教授级高级工程师, 博士, 从事电磁兼容等方面的研究。