

隔离开关操作速度对特快速瞬态过电压的影响

韩彬¹, 林集明¹, 陈维江², 班连庚¹, 项祖涛¹, 陈国强²

(1. 中国电力科学研究院, 北京市 海淀区 100192; 2. 国家电网公司, 北京市 西城区 100031)

Analysis on the Influence of the Switching Speed of Disconnecter on Very Fast Transient Overvoltage

HAN Bin¹, LIN Jiming¹, CHEN Weijiang², BAN Liangeng¹, XIANG Zutao¹, CHEN Guoqiang²

(1. China Electric Power Research Institute, Haidian District, Beijing 100192, China;

2. State Grid Corporation of China, Xicheng District, Beijing 100031, China)

ABSTRACT: During the switching of the disconnectors in gas insulated switchgear (GIS), repeated strikes of the contact gap will lead to very fast transient overvoltage (VFTO) with high amplitude and steepness. Severe VFTO may damage transformers and other equipment. One of the important influential factors on VFTO is the switching speed of the disconnector, and there are still different opinions on this factor. In this paper the whole repeated strike process associated with the switching operation of the disconnector was simulated and analyzed. The polarity effect and the probability characteristics of breakdown voltage and residual voltage were analyzed. The impacts of the switching speed of the disconnector on VFTO were analyzed with the statistical method. Comparisons were made between simulation and measured results. The simulation result shows that within certain range of speed, disconnectors with low speed generate lower residual voltage after opening, and lower VFTO during opening and closing processes.

KEY WORDS: ultra high voltage (UHV); very fast transient overvoltages (VFTO); gas insulated switchgear (GIS); disconnector

摘要: 气体绝缘开关设备(gas insulated switchgear, GIS)内的隔离开关在操作空载短母线时会发生多次击穿,并产生特快速瞬态过电压(very fast transient overvoltage, VFTO),严重时可能造成变压器和其他电气设备的损坏。隔离开关的操作速度是影响 VFTO 的重要因素之一,对此国内外有不同

看法。在仿真研究中考虑了隔离开关操作过程中的多次重击穿、间隙击穿电压的极性特性、概率特性及其随操作速度变化的特性,采用统计分析方法研究了隔离开关的速度对 VFTO 的影响,并与实测结果进行了对比。研究表明,在一定范围内当隔离开关速度较慢时,分闸后负载侧残压较低,合闸、分闸操作过程中产生的 VFTO 幅值也较低。

关键词: 特高压; 特快速瞬态过电压; 气体绝缘开关设备; 隔离开关

0 引言

超/特高压气体绝缘开关设备(gas insulated switchgear, GIS)中的隔离开关操作时,由于其动作速度较低,会发生数十次的触头间隙重复击穿,产生幅值较高、陡度很大、频率很高的特快速瞬态过电压(very fast transient overvoltage, VFTO),严重时可能造成 GIS 设备及变压器的损坏^[1-2]。操作速度是隔离开关的重要特性,它是影响 VFTO 的重要因素,对此有 2 种不同观点:一种认为,提高隔离开关速度可以缩短操作时间,减少重复击穿次数,从而降低 VFTO 出现的几率^[3];另一种则认为,降低隔离开关速度可以降低分闸后空载母线上的残余电压,有利于降低合闸操作的 VFTO^[4]。这些观点仅从一个侧面定性考虑了速度对 VFTO 的影响,因此,定量分析研究操作速度对 VFTO 的影响是十分必要的,对隔离开关的设计、制造和选型也都有重要的意义。

以往进行 VFTO 仿真计算时多假定隔离开关在触头间隙两侧电压为工频峰值且相位相反的情况下击穿时,得到最严重的 VFTO^[5-10],这种方法虽然可以用来研究某一回路理论上可能出现的 VFTO 的

基金项目: 国家重点基础研究发展计划(973 计划)(2011CB209405); 国家电网公司科技项目(SGCC[2011])(特高压 GIS(HGIS)设备 VFTO 实测及仿真研究)。

The National Basic Research Program of China (973 Program) (2011CB209405); Science and Technology Project of State Grid Corporation of China (SGCC[2011]) (Experimental and Simulating Study on VFTO Generated in UHV GIS (HGIS)).

最大值，但忽略了隔离开关操作过程中的多次击穿过程，无法用来分析 VFTO 的统计特性，其结果偏于保守。由于忽略了多次击穿过程，也无法考虑操作速度对 VFTO 概率分布及统计特性的影响^[5-14]。

在本文的 VFTO 仿真分析中，考虑了隔离开关操作过程中的多次击穿过程、隔离开关分合闸速度对触头间隙击穿特性的影响以及触头间隙击穿电压的极性特性和概率特性，采用统计的分析方法研究了隔离开关速度对 VFTO 的影响，并与实测结果进行了初步对比。

1 隔离开关操作过程中的多次击穿现象

隔离开关操作过程中，会产生多次的重复击穿，每次击穿的发生取决与隔离开关两侧的电压差(即恢复电压)和隔离开关的触头间隙击穿特性，其中恢复电压取决于电源侧工频电压以及负载侧空载母线的残余电压，由于电源侧工频电压随时间不断变化，负载侧残余电压衰减很小，可近似认为是直流电压。触头间隙击穿电压随触头间隙的距离变化而变化，在隔离开关分闸操作中触头间隙距离不断变大，在合闸操作则时不断变小，变化速度取决于隔离开关动触头的运动速度，即隔离开关的操作速度。

为了研究隔离开关操作过程中的多次击穿过程，进行如下简化：1) 假设隔离开关触头间隙击穿电压与触头间隙距离 l 成正比，还假定动触头以速度 v 匀速运动。2) U_r 代表不同时刻触头间隙的击穿电压，考虑到隔离开关动、静触头是不对称的，其击穿电压有极性效应， U_{r+} 、 U_{r-} 分别代表正、负极性的击穿电压，对于分闸过程可以分别得到如下表达式：

$$U_{r+} = k_+ l = k_+ vt \tag{1}$$

$$U_{r-} = -k_- l = -k_- vt \tag{2}$$

式中 k_+ 、 k_- 分别为隔离开关触头间隙单位长度的正、负极性击穿电压。

对于合闸过程可得到如下表达式：

$$U_{r+} = k_+ l = k_+ (L - vt) \tag{3}$$

$$U_{r-} = -k_- l = -k_- (L - vt) \tag{4}$$

式中 L 为隔离开关处于分闸状态时的触头间隙距离。

根据以上假设，只要确定了 k_+ 、 k_- 、 v 这三个参数，便可确定隔离开关操作时多次击穿过程的触头

间隙击穿特性，从而对整个过程进行仿真，由式(1)–(4)可得出间隙击穿电压随时间的变化实际上由 k_+ 、 k_- 与速度的乘积来决定，对于特定的隔离开关来说 k_+ 、 k_- 为固定值，因此隔离开关操作过程中的多次击穿过程主要由触头的动作速度决定。对式(1)–(4)稍做变化也可适用触头非匀速运动的情况。

为了说明隔离开关操作中的多次击穿现象，本文采用了武汉特高压试验基地 1 100 kV GIS VFTO 试验回路作为算例，图 1 为其布置图。

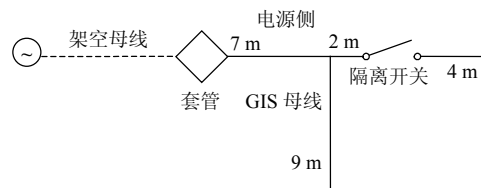


图 1 仿真采用的 GIS 布置示意图

Fig. 1 Schematic illustration of the GIS arrangement in simulation

以分闸为例，对其分闸操作多次击穿全过程中产生 VFTO 的情况进行仿真，得到隔离开关负载侧和电源侧电压的典型波形如图 2 所示，与之对应的间隙恢复电压与击穿电压的变化如图 3 所示。图 3

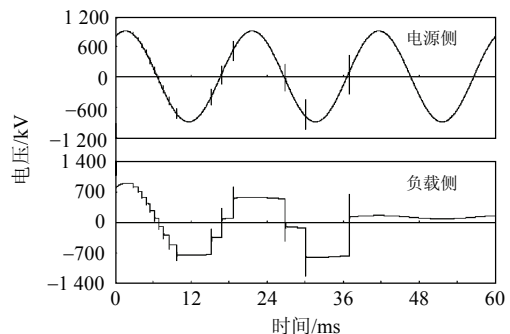


图 2 隔离开关分闸过程中电源侧和负载侧电压波形

Fig. 2 Voltage waveforms of source side and load side during disconnector opening

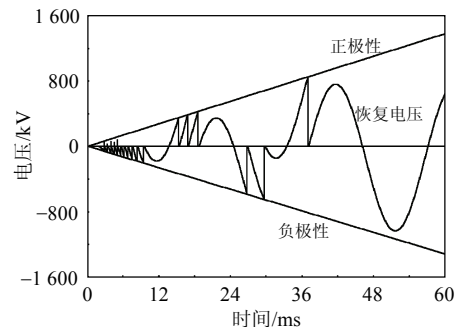


图 3 隔离开关间隙击穿电压和恢复电压波形

Fig. 3 Waveform of recovery voltage during Disconnector opening

中,当间隙恢复电压达到间隙击穿电压时,发生一次击穿,对应图2中产生一次VFTO,由此可知在分闸过程初期击穿发生较为密集,随着隔离开关间隙的增大,每次击穿发生的间隔越来越大,合闸过程的情况则与之相反。每次击穿结束后负载侧会存在一个残余电压,并一直保持到下一次击穿前,这个残压在操作过程中不断变化,同时每次击穿时电源侧工频电压也不同,因此每次击穿产生的VFTO幅值都有所不同,具有一定的随机性。

合闸过程多次击穿也可采用同样的仿真方法,此处不再详述。

2 分闸过程VFTO统计分析

同样采用图1所示的GIS布置作为算例,考虑隔离开关两侧电压为工频峰值且相位相反时击穿的情况下,计算可得该回路的最大VFTO为2.4pu,出现在负载侧母线末端。由上文分析可知,隔离开关操作过程中的VFTO具有一定的随机性,为了研究VFTO与隔离开关触头速度的关系,采用统计的方法进行分析。考虑分闸时刻为随机量,均匀分布在一个工频周期之内。计算并统计了隔离开关分闸后的负载侧残压,可得到母线残压的统计规律,图4为几种典型速度下分闸后负载侧母线残压的分布图;图5为分闸结束后的最大残压与隔离开关触头动作速度的关系。

对每次分闸过程中产生的最大VFTO进行统计,可得到VFTO幅值的统计规律,图6为不同速

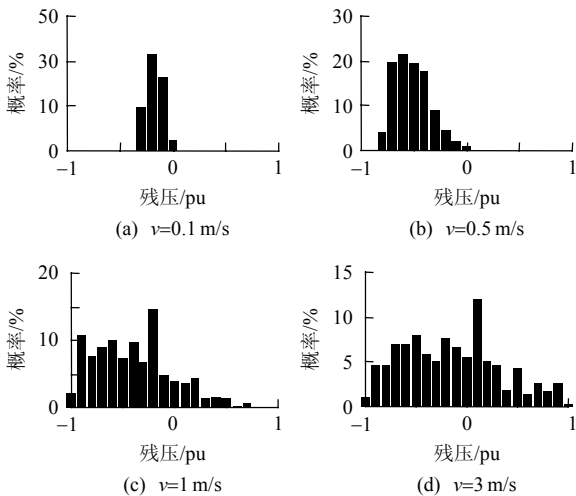


图4 隔离开关分闸操作后负载侧残压统计图
Fig. 4 Distribution of residual voltage after disconnector opening

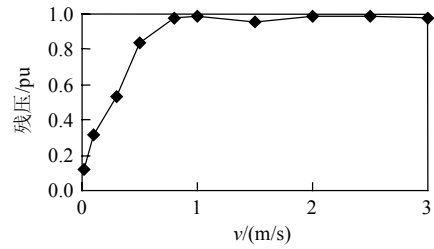


图5 隔离开关分闸结束后负载侧最大残压与速度的关系
Fig. 5 Variation of maximum residual voltage on load side with contact speed after disconnector opening

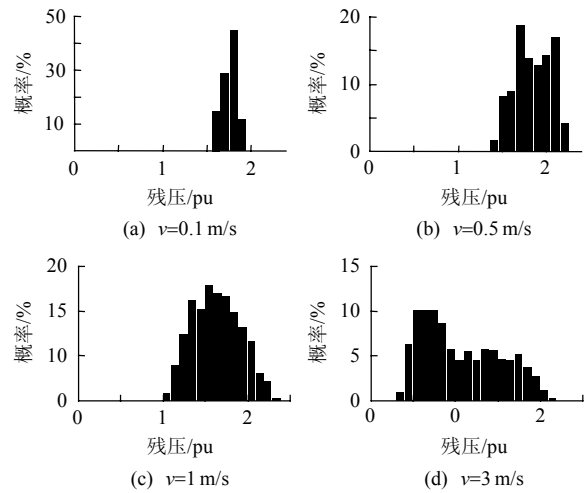


图6 隔离开关分闸过程最大残压幅值统计图
Fig. 6 Distribution of maximum VFTO during disconnector opening

度下VFTO幅值的分布图,图7为最大VFTO幅值与触头动作速度的关系。

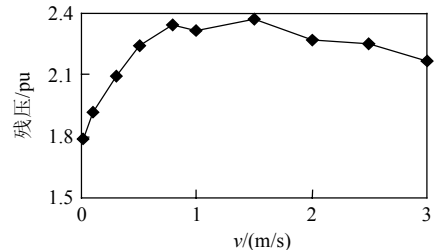


图7 隔离开关分闸过程中最大残压幅值与速度的关系
Fig. 7 Variation of maximum VFTO with contact speed during disconnector opening

由以上计算结果可以得出:

1) 当隔离开关分闸速度小于0.8 m/s时,隔离开关分闸速度越慢,分闸结束后负载侧最大残压越低,分闸过程产生的VFTO也越低。

2) 当分闸速度达到或超过0.8 m/s时,分闸结束后负载侧统计最大残压可接近1 pu,分闸过程产生的最大VFTO幅值也接近该回路可能产生的最大值2.4 pu。

3) 分闸速度越慢, 分闸结束后残压分布以及分闸过程中产生的最大 VFTO 的分布比较集中; 分闸速度越快, 分闸结束后残压分布和分闸过程产生的最大 VFTO 的分布比较分散。

3 合闸过程 VFTO 统计分析

隔离开关合闸过程中所产生的 VFTO 与隔离开关合闸前(即发生第一次击穿前)负载侧母线的残压有关, 此残压一般为隔离开关分闸操作过程结束后产生, 研究中需要考虑其影响。

以隔离开关随机分闸后的负载残压作为合闸前的母线残压, 这与实际情况较为接近。研究中考考虑隔离开关分闸时刻、合闸时刻为随机量, 且均匀分布在一个周期内, 每次操作均由分闸产生的负载侧残压作为隔离开关合闸第一次击穿前的残压, 对隔离开关每次合闸过程产生的最大 VFTO 幅值进行统计。图 8 为不同速度下 VFTO 幅值的分布, 图 9 为合闸最大 VFTO 幅值与触头动作速度的关系。

由图 8、9 可知, 当考虑隔离开关负载侧残压

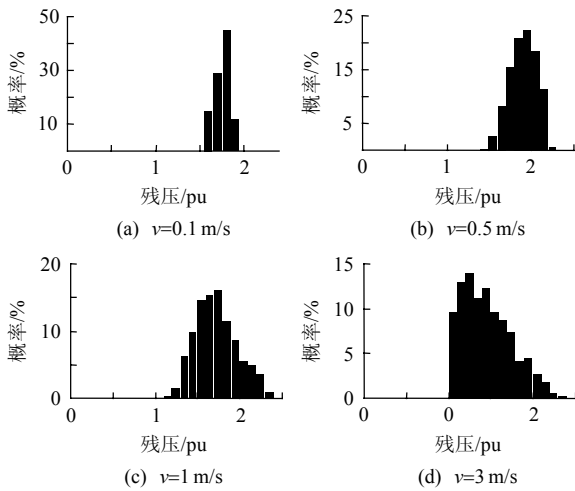


图 8 隔离开关合闸过程最大残压分布图

Fig. 8 Distribution of maximum VFTO

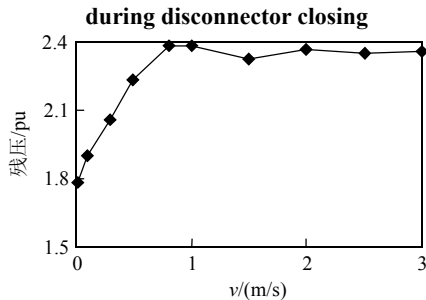


图 9 隔离开关合闸过程最大残压与速度的关系

Fig. 9 Variation of maximum VFTO with contact speed during disconnector closing

由随机分闸操作产生时, 隔离开关动作速度越慢, 合闸所产生的 VFTO 幅值越低; 分闸速度达到或超过 0.8 m/s 后, 合闸过程产生的 VFTO 幅值也接近可能产生的最大值 2.4 pu。这是因为隔离开关速度越慢, 分闸操作所产生的负载侧统计残压越低; 隔离开关速度超过一定值后, 所产生的负载侧统计残压接近 1 pu。而隔离开关速度较低时, 合闸前的负载侧残压也较低, 相应合闸产生的 VFTO 也明显降低。

4 仿真与实测结果对比

武汉特高压交流试验基地 2 个 VFTO 试验回路分别对应 2 种隔离开关, 即慢速隔离开关和快速隔离开关。其中: 慢速隔离开关的分、合闸速度约为 0.54 m/s; 快速隔离开关的分闸速度约为 1.7 m/s, 合闸速度 2.5 m/s。基于试验中获得的隔离开关触头间隙击穿电压随时间变化的关系曲线^[15], 进行一定简化后, 采用上文所述的方法对隔离开关操作过程进行仿真, 并与实测结果进行了初步对比。

对 2 种隔离开关分闸操作结束后的负载侧残压进行统计分析, 仿真与实测结果的对比如图 10 所示。可见仿真结果与实测结果趋势基本一致, 对于慢速开关, 分闸后残压在 -0.6~-0.4 pu 区间的概率较高, 残压绝对值超过 0.8 pu 的概率较小, 不超过 5%; 对于快速开关, 其分闸后出现高幅值残压的概率要明显高于慢速开关, 残压绝对值在 0.9~1 pu 间的概率在 5%左右, 在 0.8~0.9 pu 间的概率约 10%。

对 2 种隔离开关分、合闸操作过程中产生的最

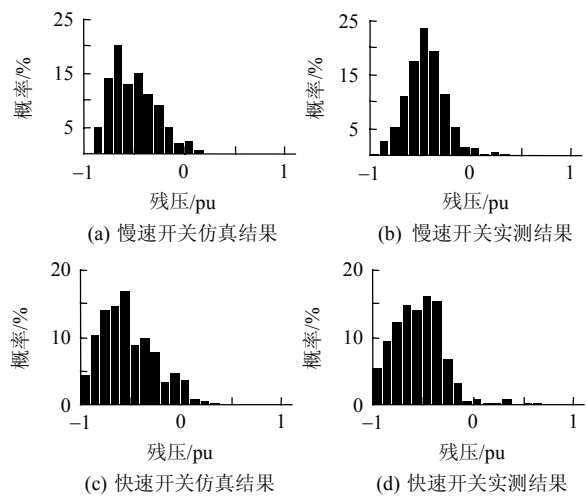


图 10 隔离开关分闸操作后负载侧残压仿真与实测对比

Fig. 10 Comparison between simulated and measured results of distribution of residual voltage after disconnector opening

大 VFTO 进行统计分析。分闸过程 VFTO 仿真与实测结果的对比如图 11 所示；合闸过程仿真与实测的对比如图 12 所示。

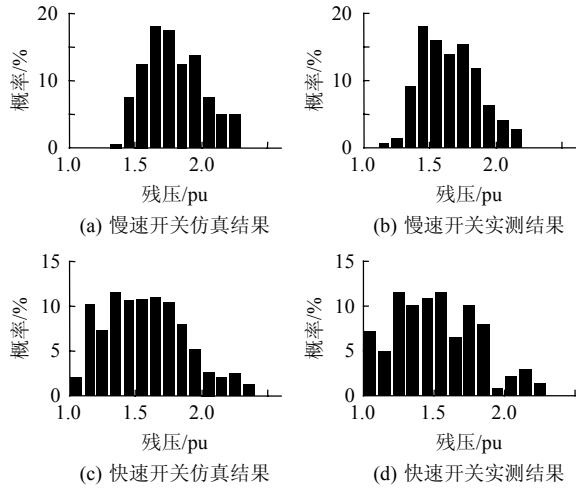


图 11 隔离开关分闸操作最大残压分布仿真与实测对比
Fig. 11 Comparison between simulated and measured results of maximum VFTO during disconnector opening

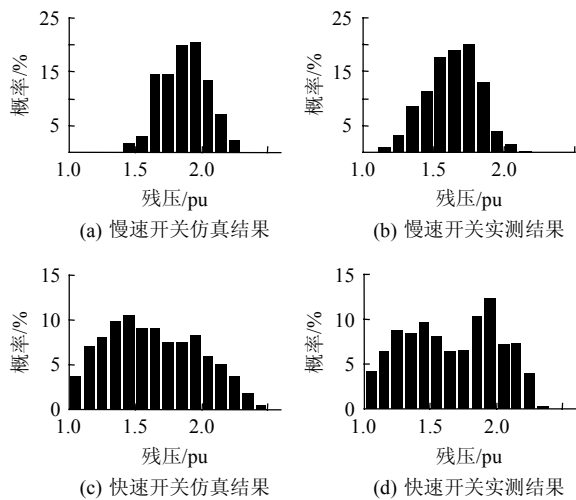


图 12 隔离开关合闸操作最大残压分布仿真与实测对比
Fig. 12 Comparison between simulated and measured results of maximum VFTO during disconnector closing

隔离开关合、分闸操作过程中仿真和实测最大 VFTO 分布规律和趋势基本一致，慢速开关操作过程 VFTO 分布较集中，而快速开关操作过程 VFTO 分布较分散。仿真结果 VFTO 分布较实测结果整体上略高，主要是由于同样击穿条件下 VFTO 幅值的仿真结果高于实测结果。

VFTO 的试验结果初步验证了此仿真方法的正确性。同时应注意到，对于不同的隔离开关，由于

其触头结构不同，间隙击穿电压特性也有所不同，即使速度相同，其 VFTO 统计分布也可能有所不同。但其随操作速度变化的趋势是一致的。

5 结论

隔离开关的操作速度对 VFTO 有较大影响。本文仿真了隔离开关操作时的多次重复击穿过程，统计分析了不同速度隔离开关操作产生 VFTO 的分布规律。结果表明，当隔离开关速度小于 0.8 m/s 时，速度越慢，操作过程中产生的 VFTO 越低；当速度达到或超过 0.8 m/s 时，操作过程中产生的 VFTO 接近理论最大值。仿真结果与实测结果规律基本一致，在 GIS 隔离开关设计、选型时应注意到这个现象。

参考文献

- [1] Meppelink J, Diederich K, Feser K, et al. Very fast transients in GIS[J]. IEEE Trans. on Power Delivery, 1989, 4(1): 223-233.
- [2] Povh D, Schmitt H, Volcker O, et al. Modeling and analysis guidelines for very fast transients[J]. IEEE Trans. on Power Delivery, 1996, 11(4): 2028-2034.
- [3] 王森, 孙强, 卢江平, 等. GIS 变电站特快速暂态过电压研究的技术现状[J]. 陕西电力, 2009, 37(6): 53-58. Wang Sen, Sun Qiang, Lu Jiangping, et al. Technology status of very fast front transient voltage study in GIS [J]. Shaanxi Electric Power, 2009, 37(6): 53-58(in Chinese).
- [4] Riechert U, Krüsi U, Sologuren D. Very fast transient overvoltages during switching of bus-charging currents by 1100 kV disconnector[R]. Paris: CIGRE, 2010.
- [5] 曾昭华, 林集明, 班连庚, 等. 特快速暂态过电压及研究实例[J]. 电网技术, 1996, 20(3): 10-14. Zeng Zhaohua, Lin Jiming, Ban Liangeng, et al. Very fast transient overvoltages(VFTO) and a study of a practical case[J]. Power System Technology, 1996, 20(3): 10-14(in Chinese).
- [6] 郭洁, 刘振, 赵丹丹, 等. 750 kV GIS 中运行方式对快速暂态过电压的影响[J]. 电网技术, 2008, 32(S2): 233-235. Guo Jie, Liu Zhen, Zhao Dandan, et al. Influence of operation modes to very fast transient voltage in 750 kV GIS[J]. Power System Technology, 2008, 32(S2): 233-235(in Chinese).
- [7] 尹晓芳, 于力, 刘广维. 封闭式组合电器隔离开关产生的过电压[J]. 中国电机工程学报, 2002, 22(7): 111-114. Yin Xiaofang, Yu Li, Liu Guangwei. Overvoltage from gas insulated switchgear disconnector[J]. Proceedings of

- the CSEE, 2002, 22(7): 111-114(in Chinese).
- [8] 项祖涛, 刘卫东, 钱家骊, 等. 磁环抑制 GIS 中特快速暂态过电压的模拟试验和仿真[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(19): 101-105.
Xiang Zutao, Liu Weidong, Qian Jiali, et al. Simulation test and computation of suppressing very fast transient overvoltage In GIS by magnetic rings[J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(19): 101-105(in Chinese).
- [9] 史保壮, 李智敏, 张文元, 等. 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.
Shi Baozhuang, Li Zhimin, Zhang Wenyan, et al. Analysis of the reason why VFTO may endanger GIS above 300kV[J]. Power System Technology, 1998, 22(1): 1-3(in Chinese).
- [10] 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).
- [11] 卢铁兵, 崔翔. 变电站空载母线波过程的数值分析[J]. 中国电机工程学报, 2000, 20(6): 39-42.
Lu Tiebing, Cui Xiang. Numerical analysis of wave processes for buses without load in substations using FDTD[J]. Proceedings of the CSEE, 2000, 20(6): 39-42(in Chinese).
- [12] 张重远, 梁贵书, 崔翔. 气体绝缘变电站内 PT 的特快速暂态仿真建模[J]. 中国电机工程学报, 2003, 23(7): 84-87.
Zhang Zhongyuan, Liang Guishu, Cui Xiang. Modeling of potential transformers in gas insulated substation for the very fast transient simulation[J]. Proceedings of the CSEE, 2003, 23(7): 84-87(in Chinese).
- [13] 王赞基. 变压器线圈特快速暂态仿真的建模[J]. 中国电机工程学报. 1996, 16(5): 299-305.
Wang Zanji. Modeling of simulating very fast transient in transformer windings[J]. Proceedings of the CSEE, 1996, 16(5): 299-305(in Chinese).
- [14] 梁贵书, 张喜乐, 王晓晖, 等. 特快速暂态过电压下变压器绕组高频电路模型的研究[J]. 中国电机工程学报, 2006, 26(4): 144-148.
Liang Guishu, Zhang Xile, Wang Xiaohui, et al. Research on high frequency circuit model of transformer windings in VFTO[J]. Proceedings of the CSEE, 2006, 26(4): 144-148(in Chinese).
- [15] 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(in Chinese).



韩彬

收稿日期: 2011-06-28。

作者简介:

韩彬(1983), 男, 工程师, 主要研究方向为电力系统电磁暂态分析与仿真, hanbin@epri.sgcc.com.cn;

林集明(1941), 男, 教授级高工、博士生导师, 长期从事电力系统电磁暂态分析与仿真研究工作;

陈维江(1958), 男, 教授级高工、博士生导师, 长期从事高压技术工程及理论方面研究工作;

班连庚(1960), 男, 教授级高工, 长期从事电力系统电磁暂态分析与仿真研究工作;

项祖涛(1976), 男, 高级工程师, 主要研究方向为电力系统电磁暂态分析与仿真。

(编辑 胡琳琳)