

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.181520

特高压 GIS 变电站 VFTO 波形衰减仿真研究

王磊¹, 刘衍², 冯宇¹, 王浩³, 赵军¹

(1. 中国电力科学研究院有限公司, 湖北 武汉 430074; 2. 国网江西省电力有限公司电力科学研究院, 江西 南昌 330096; 3. 中国电力科学研究院有限公司, 北京 100192)

摘要: 为研究特高压 GIS 变电站 VFTO 计算中波形衰减程度与实测相差较大的原因, 首先介绍了我国某特高压变电站 VFTO 实测波形的产生方式和波形特征; 其次对 VFTO 波形的衰减因素, 如弧道电阻、盆式绝缘子、GIS 弯管和 GIS 套管的模型进行了分析。在可能产生的电磁泄漏或辐射等损耗的基础上改进了原有 IEC 推荐模型。最终建立了 GIS 变电站的整体仿真模型。通过对实测波形的等值转换, 将仿真条件与实测波形进行统一后, 获得不同模型下的仿真波形特征。结果表明考虑所研究的波形衰减因素后, 仿真波形的衰减程度与实测更加吻合, 验证了所提出模型的合理性。

关键词: 特快速瞬态过电压; 特高压; 气体绝缘变电站; 辐射电阻; 波形衰减

Simulation research on VFTO waveform attenuation in UHV GIS substation

WANG Lei¹, LIU Yan², FENG Yu¹, WANG Hao³, ZHAO Jun¹

(1. China Electric Power Research Institute, Wuhan 430074, China; 2. State Grid Jiangxi Electric Power Research Institute, Nanchang 330096, China; 3. China Electric Power Research Institute, Beijing 100192, China)

Abstract: In order to study the reason why the waveform attenuation degree is quite different from the actual measurement in the VFTO calculation of UHV GIS substation, this paper first introduces the generation mode and waveform characteristics of the measured VFTO waveform of a UHV substation in China. Then the possible attenuation factors of the VFTO waveform, such as the arc resistors, basin insulators, GIS elbows and GIS bushings are analyzed. The original IEC recommended model is improved based on possible electromagnetic leakage or radiation loss. Finally, the overall simulation model of GIS substation is established. Through the equivalent conversion of the measured waveform, the simulation conditions are unified with the measured waveform, and the simulated waveform characteristics under different models are obtained. The results show that after considering the waveform attenuation factors studied in this paper, the attenuation degree of the simulated waveform is more consistent with the actual measurement, and the rationality of the proposed model is verified.

This work is supported by Science and Technology Plan of SGCC ‘Study of Accurate Simulation of Overvoltage in UHV Project and Study of a New High Frequency Overvoltage Suppression Wire (No. GY71-16-006)’.

Key words: very fast transient overvoltage (VFTO); UHV; gas insulated substation (GIS); radiation resistance; waveform attenuation

0 引言

气体绝缘开关设备(Gas Insulated Switchgear, GIS), 因其存在占地面积小、检修时间长、绝缘性能不受大气影响等优点, 在我国特高压工程建设中

得到了广泛应用。但同时, 由于其结构紧凑, 隔离开关等操作时可能存在的高幅值特快速瞬态过电压(Very Fast Transient Over-voltage, VFTO)现象^[1-6]会严重威胁到 GIS 的内部设备、外部连接设备以及二次设备的安全运行。由于 VFTO 的产生是一种随机过程, 取决于多种因素, 利用统计法开展变电站内 VFTO 的仿真及对应绝缘配合, 是保证 GIS 变电站安全经济运行的重要条件^[7]。但是, 目前针对 VFTO

基金项目: 国家电网公司科技项目资助(GY71-16-006)“特高压工程过电压精密仿真及高频过电压新型抑制导线研究”

的仿真模型，主要借鉴与 IEC 或者 CIGRE 中的推荐电路模型^[8-16]，存在的最大问题就是仿真中缺乏足够的衰减因素。通过大量研究表明，仿真与实测波形虽然在最大幅值上已获得较好的一致性，但在波形持续时间、衰减过程等方面仍相差较大。这样也直接导致了无法通过仿真获得 VFTO 的统计特性，也会在判断 VFTO 对设备绝缘影响时造成干扰。因此，特高压 GIS 变电站 VFTO 波形衰减仿真研究显得尤为重要。

本文首先对我国某特高压变电站的 VFTO 实测波形产生方式、波形特征进行了介绍和分析。其次，针对目前已有模型中，可能存在波形衰减因素的方面进行研究，包括弧道电阻、盆式绝缘子及 GIS 弯管、GIS 套管等，建立了对应部件的改进型电磁暂态模型。最后，结合完整变电站模型，获得了考虑不同衰减因素下的 VFTO 波形，并将其与实测波形对比，表明了本文所述方法的合理性。

1 特高压 GIS 变电站 VFTO 实测波形

1.1 GIS 变电站概况

本文以我国某特高压变电站 VFTO 试验测量波形为例，研究 VFTO 波形衰减的仿真方法。该特高压 GIS 变电站的主接线如图 1 所示，变电站一共有 1 台主变和 4 条出线(HA I 线、HA II 线、HW I 线和 HW II 线)，形成了一个完整串和三个不完整串。测点主要位于完整串的变压器和出线入口处的 GIS 上，由于隔离开关与断路器之间空间有限，无法额外安装传感器探头，安装现场如图 2 所示^[17-18]。

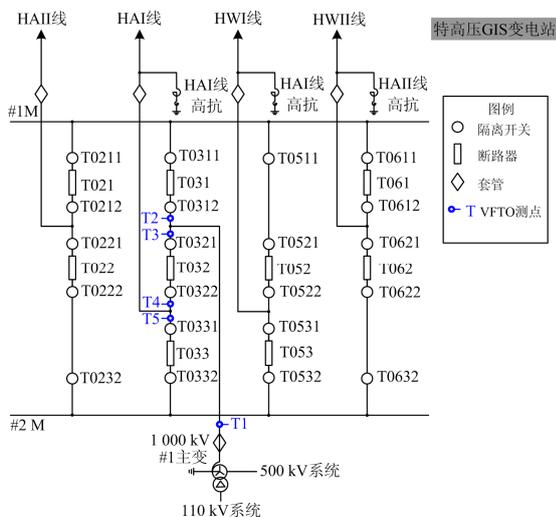


图 1 某特高压变电站主接线图及 VFTO 测点布置方案
Fig. 1 Single line diagram and the layout scheme for VFTO measuring points of one UHV GIS substation



图 2 传感器安装现场图
Fig. 2 On-site photo of VFTO sensor

1.2 产生 VFTO 方式及实测波形

GIS 变电站中一般有多间隔，产生 VFTO 的方式从数学上来说有数百种之多，本文主要针对为常见且产生 VFTO 幅值较大的方式进行研究。具体操作方式为，#1 主变带电，所有断路器和隔离开关断开，操作隔离开关 T0312，投切 T0312 和断路器 T031 之间的短管线，在 GIS 中产生 VFTO 波形。

此时 GIS 中不同位置产生的 VFTO 波形如图 3 所示。从图中可以看出，在一次完整的分合闸操作过程中会发生多次电弧重燃，单次击穿实测波形的衰减时间约为 5 μs ，高频部分衰减较快。

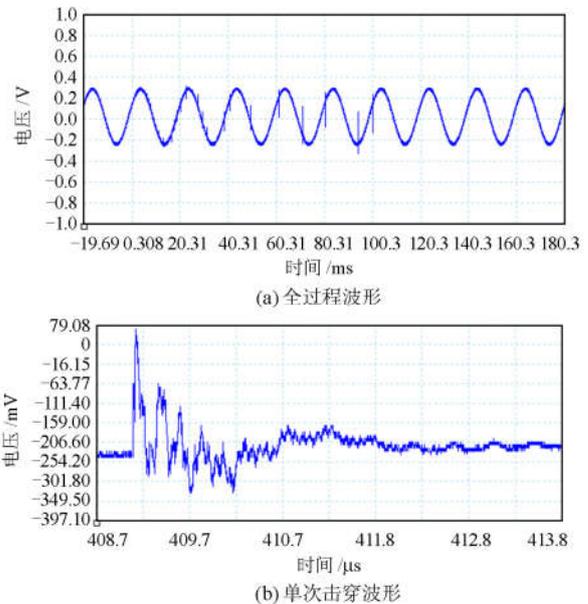


图 3 T2 测点实测波形

Fig. 3 Measured waveform of T2

2 VFTO 波形衰减因素分析

目前，VFTO 仿真建模中对波形的衰减因素关

注较少, 通常忽略 GIS 回路损耗的影响^[19]。目前电力系统中针对 VFTO 的传统绝缘配合方法, 只关心 VFTO 的最大幅值, 主要关注 VFTO 最初 1 到 2 个峰值的波形, 这时回路引起的衰减效应还不明显。已有研究针对 VFTO 试验回路以及 GIS 变电站现场实测与仿真结果对比表明, VFTO 仿真波形在初期吻合度较好, 但实测 VFTO 波形衰减要明显快于仿真 VFTO 波形。本节则针对 VFTO 可能的波形衰减因素进行理论分析。

2.1 弧道电阻

波形的衰减必然存在耗能部分, 那么自然会联想到隔离开关产生 VFTO 过程中的高频电弧可能也是 VFTO 波形仿真时产生衰减的重要来源之一。针对该模型, 目前国内外研究应用较多的是固定电阻模型或时变电阻模型, 中国电科院也通过相关研究提出了特高压 GIS 隔离开关的改进型时变弧阻模型, 如式(1)所示, 该模型能充分反映气压 p 、弧长 l 和电流 I 对弧阻特性的影响。

$$R = R_i \times e^{-l/\tau_1} + 946l^{0.63} \times p^{0.24} \times I^{-0.9} \cdot e^{l/\tau_2} \quad (1)$$

式中: R_i 为绝缘状态下的电阻; 时间常数 τ_2 远远大于 τ_1 , 可以使电阻值在击穿后一段时间内保持相对稳定。结合特高压的隔离开关来说, R_i 一般取 $10^{12} \Omega$, τ_1 一般取 $2 \mu s$, τ_2 一般取 $2 \mu s$ 。

进一步地, 开展弧道电阻对 VFTO 波形影响的研究, 仿真结果表明, 只有当电阻大于 5Ω 时, 才会对波形的衰减时间有较大影响。若人为增加弧道电阻, 一方面会造成幅值误差较大, 无法准确评估变电站内的 VFTO 幅值水平, 仿真计算表明, 弧道电阻为 5Ω 时其过电压水平相对 2Ω 会下降 8%; 另一方面, 增加弧道电阻的理论基础并不存在, 且无试验表明实际变电站隔离开关的弧道电阻会显著增加。因此, 弧道电阻不能作为 VFTO 波形衰减的主要影响因素。

2.2 盆式绝缘子及 GIS 弯管

盆式绝缘子在 GIS 管道中的作用是支撑中心导杆和分割气室, 材料主体是环氧树脂。盆式绝缘子的引入会改变 GIS 管道的电磁场分布, 在绝缘子处及附近存在电磁泄漏, 电磁波不再是 TEM 波或准 TEM 波, 不能只用传输线模型来等效。盆式绝缘子在 IEC 标准中对于电磁暂态建模采用的是对地电容, 但其电容值来源于计算经验, 并不适用于特高压系统设备。

本文针对盆式绝缘子的处理方法是: 对一段带有盆式绝缘子的 GIS 管道进行静电场分析, 观察电场在绝缘子处及附近肯定发生的畸变情况。分析该

段管道, 利用软件提取管道外壳与中心导杆之间的电容, 由于管道长度相对 VFTO 这种特快速瞬态波的波长而言, 必须考虑电磁波在管道的传播过程, 因此, 被研究管道需用一等效对地电容和传输线模型来模拟。

传输线同轴结构的单位长度电容为

$$C_0 = \frac{2\pi\epsilon}{\ln\left(\frac{r_s}{r_w}\right)} \quad (2)$$

式中: ϵ 为同轴导体之间材料的介电常数; r_s 为外导体半径(m); r_w 为内导体半径(m)。

特高压 GIS 管道内导体半径取 90 mm, 外导体半径取 440 mm。则当管道充满 SF_6 时, 其单位长度的电容为 $C_0 = 35.1 \text{ pF/m}$ 。

由于盆式绝缘子的对称结构可选择 Ansys 软件对绝缘子进行仿真, 仿真得到的电场分布情况见图 4。

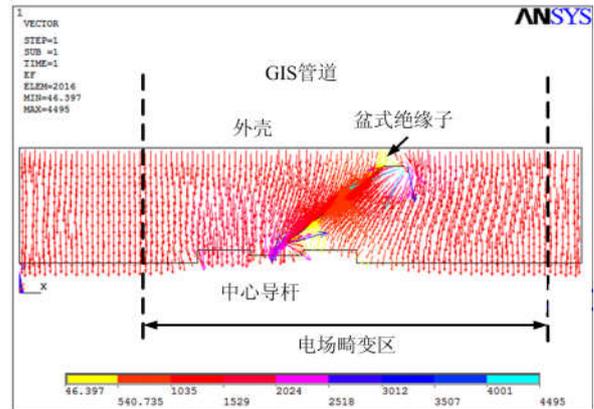


图 4 盆式绝缘子电场分布

Fig. 4 Electric field distribution of basin insulator

电磁场仿真中, 管道长度 l 取 1 m, 仿真总电容值 C 为 43.8 pF, 则电场畸变区域的补偿电容为

$$\Delta C = C - l \times C_0$$

可得到静态补偿电容值为 8.7 pF, 因此盆式绝缘子的电磁暂态模型如图 5 所示。针对本文涉及到的产生 VFTO 的方式, 电磁波传播路径上约有 12 个盆式绝缘子, 建模时需考虑其影响。

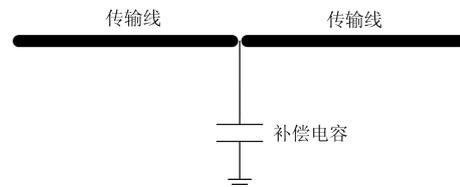


图 5 盆式绝缘子电磁暂态模型

Fig. 5 Electromagnetic transient model of basin insulator

GIS 的拐弯管道是 GIS 管道结构的主要部分，目前变电站中主要的拐弯管道结构有 L 型和 T 型。GIS 管道中的电磁波传播到拐弯管道处，由于拐弯管道的结构不规则，电磁波的电磁场会产生局部畸变^[20]。这种畸变也可以用集总参数补偿到描述电磁波的传输线模型中。

对于集总参数电路的补偿值，主要应用电磁场仿真软件进行提取。可采用图 6 所示的 π 型补偿电路对拐弯管道的电磁场畸变进行补偿，结合特高压 GIS 管道尺寸参数，以外壳内拐弯段的长度计算时，得出补偿电容约为 18~35 pF，补偿电感约为 0.09~0.22 μ H，且随频率变化。

针对本文涉及到的产生 VFTO 的方式，电磁波传播路径上约有 2 处 GIS 弯管，建模时需考虑其影响。

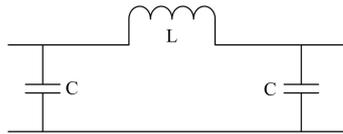


图 6 双电容、单电感的 π 型网络

Fig. 6 π -type network with double-capacitor and single-inductor

2.3 GIS 套管

GIS 套管对 VFTO 波形衰减的影响，目前有两个思路：一是考虑电磁泄漏；二是考虑辐射损耗。

图 7 所示，套管中导体与外壳间结构较为复杂。套管内存在屏蔽层、绝缘材料、均压环等，会导致隔离开关操作产生的 VFTO 在接地屏蔽和屏蔽开口间或中心导杆间的开口向外泄露^[21]。但是通过研究表明，该电磁泄漏效应其量级太小，对 VFTO 波形的衰减影响极小。

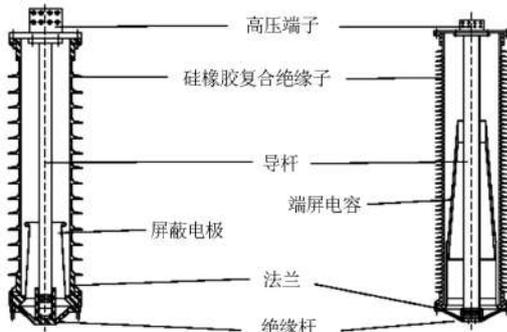


图 7 GIS 套管结构图

Fig. 7 Structure chart of GIS bushing

套管导体垂直于地面，结构上类似于垂直天线，很容易发生电磁辐射，是辐射损耗的主要来源。CIGRE 推荐模型中将气体绝缘套管部分用传输线和架空线端均压环的对地电容表示，没有考虑其辐射损耗^[22]。为此，提出了考虑辐射效应的 GIS 套管

模型如图 8 所示，主要特征是在 CIGRE 推荐模型中加入了辐射电阻。该辐射电阻为频变电阻，如图 9 所示。结合特高压 GIS 套管的尺寸，在 2 MHz 频率下辐射电阻可达 2.05 Ω ，远超 GIS 管母线的损耗电阻。由于 VFTO 波形频率丰富，在更高的频率下，套管导体的辐射电阻将明显增加，会成为 VFTO 振荡波衰减的影响因素。

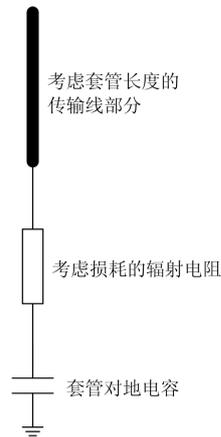


图 8 考虑辐射效应的 GIS 套管模型

Fig. 8 Bushing model considering radiation loss

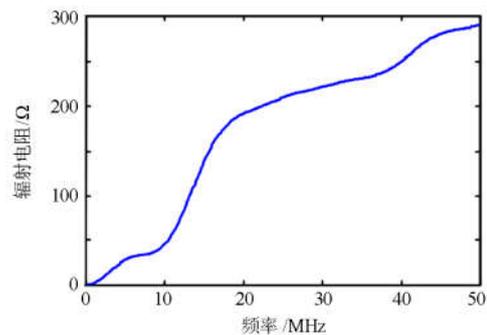


图 9 辐射电阻的频变特性

Fig. 9 Frequency-dependent characteristics of radiation resistance

由于本文所涉及的过电压仿真内容主要基于 EMTP 软件，而 EMTP 这种电路计算软件中没有频变元件的设定方法。本文的处理方法是，选取若干频率下的电阻值，通过多支路并联电阻-电感支路进行等效模拟^[23]，如图 10 所示。

3 考虑衰减的 VFTO 波形仿真

3.1 GIS 变电站主要部件建模

由于 VFTO 波形含有的主要频率分量从数百 kHz 到上百 MHz，高频电磁波对亮导体透入深度有限，导体间的位移电流效应比较明显，即导体间容抗比较小、感抗比较大，故对于外观尺寸在数米以

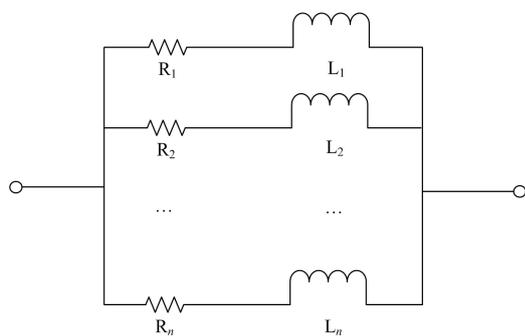


图 10 并联电感-电阻支路的仿真电路

Fig. 10 Parallel inductor-resistor branch simulation circuit

内的电气元件都用集总参数电容表示。对于几何尺寸远大于电磁波波长的原件, 如 GIS 母线、架空线等则采用传输线模型。

本文对除盆式绝缘子和 GIS 套管以外的设备, 其对地电容值如表 1 所示。

表 1 设备代号和其入口电容

Table 1 Code names and entrance capacitances of equipments

设备名称	符号	电容值/pF
变压器	T	5 000
高压电抗器	REA	4 000
电容式电压互感器	CVT	5 000
敞开式接地刀闸	EDS	150
支柱绝缘子	PS	150
电流互感器	CT	80
电磁式电压互感器	PT	197
套管	BG	300

对于隔离开关, 其模型对应的分合闸状态有所不同: 分闸时, 隔离开关等效为两段传输线与断口电容的串联, 此断口电容约为 50 pF, 隔离开关触头由于其非对称性, 动触头对地电容为 65 pF, 静触头对地电容为 50 pF; 合闸时, 隔离开关则等效为一段传输线及对地电容, 此时对地电容值为 115 pF。

断路器的建模与隔离开关类似, 但是由于其为四端口断路器, 等效电容示意图如图 11 所示, 具体数值分别为: $C_1 \sim C_5$ 为 50 pF、 C_{12} 和 C_{45} 为 2 700 pF、 C_{23} 和 C_{34} 为 2 500 pF。

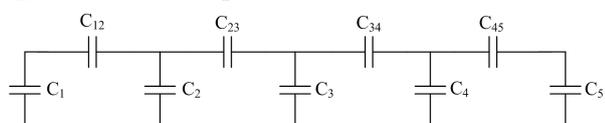


图 11 断路器电容等效示意图

Fig. 11 Equivalent capacitance of circuit breaker

3.2 实测波形的等值转换

特高压 GIS 变电站中 VFTO 水平的影响因素主

要有 3 个, GIS 变电站布置方式、击穿时刻电源电压的相位以及隔离开关触头重燃时击穿电压大小。后两个因素属于随机变量, 因此在进行仿真与实测对比时, 需要进行“归一化”化处理。具体做法: 从击穿时刻回推, 依据稳态时的工频相位获得击穿时刻的工频相位; 将击穿发生起点的工频电压瞬时值和前一次击穿时的工频电压瞬时值之差, 近似为击穿电压的大小。

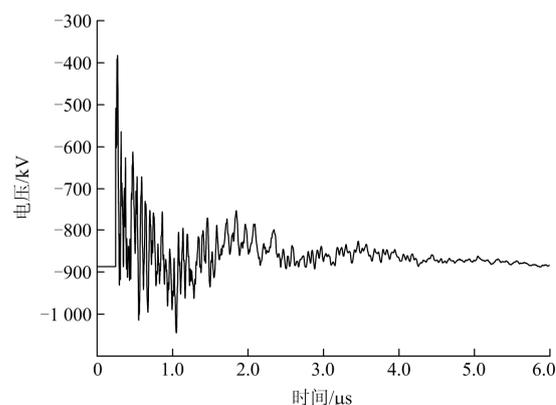
对于图 3(b)的实测波形进行归一化处理时, 工频峰值对应时间为 93.91 ms, 击穿时间为 94.4 ms, 前一次击穿时间为 80.96 ms。假设工频峰值对应相位为 90° , 则击穿时的相位为 98.82° , 前一次击穿相位为 -143.15° 。因工频峰值约为 898 kV, 因此击穿电压为

$$898 \times [\sin 98.82^\circ - \sin(-143.15^\circ)] = 1425.4 \text{ kV}$$

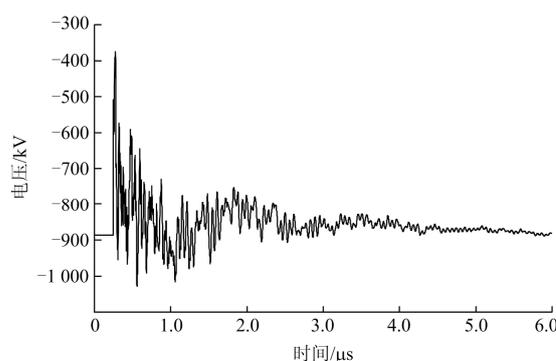
为此, 仿真时的输入条件为: 击穿相位 98.82° 、击穿电压 1 425.4 kV。

3.3 仿真波形与实测波形的对比

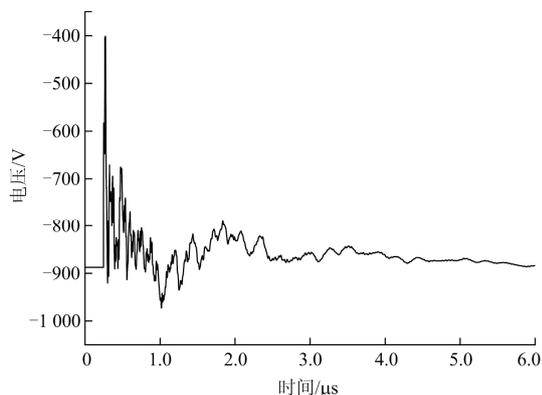
结合 3.1 节建立的仿真计算模型, 分别采用原 IEC 推荐模型、考虑盆式绝缘子和 GIS 弯管衰减因素模型、考虑所有衰减因素模型三种情况下的仿真波形如图 12 所示。



(a) IEC推荐模型计算波形



(b) 考虑盆式绝缘子和GIS弯管衰减因素模型计算波形



(c) 考虑所有衰减因素模型计算波形

图 12 不同计算模型下 VFTO 波形对比图

Fig. 12 Comparison of VFTO waveforms under different calculation models

从图 12 可以看出, 仅仅考虑盆式绝缘子和 GIS 弯管对 VFTO 波形衰减的因素对 VFTO 波形衰减的影响很小, 这主要是因其补偿参数数值较小, 只会对波的折反射发生影响, 却无法实现波形衰减。考虑所有衰减因素, 尤其是 GIS 套管辐射损耗后的 VFTO 波形, 衰减过程与实测较为相似, 表明了该模型应用于 VFTO 计算的合理性。

4 结论

1) 目前过电压仿真在 VFTO 波形的整体衰减上存在一定问题, 仿真中缺乏相应的损耗模型, 导致仿真波形衰减速度远小于实测波形。

2) 本文研究了 VFTO 这种特快速暂态过电压作用下, 考虑盆式绝缘子、GIS 拐弯管道的电磁泄漏效应的仿真模型。对特高压 GIS 内的 VFTO 而言, 盆式绝缘子和 GIS 弯管对过电压的影响可以忽略。

3) 建立了计及辐射的套管模型, 其等效电阻随频率变化而变化, 在 VFTO 主频内(2~8 MHz), 其阻值可达数 Ω 至数十 Ω 。

4) 通过新建立的套管、GIS 拐弯管道等模型, 计算出的 VFTO 波形衰减效应增强, 与实测较为一致, 后期可基于此模型开展 VFTO 统计特性分析研究。

参考文献

[1] International Electrotechnical Commission. IEC60071-4—2004 International standard insulation co-ordination—part 4: computational guide to insulation co-ordination and modeling of electrical networks[S]. Switzerland: International Electrotechnical Commission, 2004.

[2] 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展[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.

[3] 陈维江, 李志兵, 孙岗, 等. 特高压气体绝缘开关设备中特快速瞬态过电压特性的试验研究[J]. 中国电机工程学报, 2011, 31(31): 38-47.

CHEN Weijiang, LI Zhibing, SUN Gang, et al. Experimental research on the characteristics of very fast transient overvoltage in ultra high voltage gas insulated switchgear[J]. Proceedings of the CSEE, 2011, 31(31): 38-47.

[4] 舒印彪, 陈维江, 谷定燮, 等. 1 000 kV 特高压交流输电工程过电压和绝缘配合: GB/Z 24842—2009[S]. 北京: 中国标准出版社, 2009.

SHU Yinbiao, CHEN Weijiang, GU Dingxie, et al. Over-voltage and insulation coordination of 1 000 kV UHV AC transmission project: GB/Z 24842—2009[S]. Beijing: Standard Press of China, 2009.

[5] 谷定燮, 修木洪, 戴敏, 等. 1 000 kV GIS 变电站 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.

[6] 傅智为, 林一泓, 吴勇昊, 等. 特高压 1 100 kV GIS 现场交流耐压试验技术[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(3): 158-163.

FU Zhiwei, LIN Yihong, WU Yonghao, et al. Test technology of on site AC voltage test of UHV 1 100 kV GIS[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(3): 158-163.

[7] 高志远, 曹阳, 徐昊亮, 等. 电力系统关键技术发展论刍议[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(17): 14-17.

GAO Zhiyuan, CAO Yang, XU Haoliang, et al. Primary discussion on the key technologies development of power system[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(17): 14-17.

[8] International Electrotechnical Commission. Alternating current disconnectors and earthing switches: IEC 60129—1984[S]. Switzerland: International Electrotechnical Commission, 1984.

[9] 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(增刊 2): 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.

- [10] 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 disconnecter[J]. Proceedings of the CSEE, 2002, 22(7): 111-114.
- [11] YAMAGATA Y, NAKADA Y, NOJIMA K, et al. Very fast transients in 1 000 kV gas insulated switchgear[C] // IEEE Transmission and Distribution Conference, New Orleans, USA: 501-508.
- [12] RIECHERT U, NEUMANN C, HAMA H, et al. Very fast transient overvoltages (VFTO) in gas-insulated UHV substations[R]. Paris, France: International Council on Large Electric Systems, 2010.
- [13] RIECHERT U, KRÜSI U, Riechert S D, et al. Very fast transient overvoltages during switching of bus-charging currents by 1 100 kV disconnecter[R]. Paris, France: International Council on Large Electric systems, 2010.
- [14] KUMAR V V. Estimation and measurement of very fast transient overvoltage (VFTO) in a gas insulated substation (GIS)[D]. Bangalore, India: Indian Institute of Science Bangalore, 1999.
- [15] KUMAR V V, JOY THOMAS M, NAIDU M S. Influence of switching conditions on the VFTO magnitudes in a GIS[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2001, 15(4): 539-544.
- [16] TANAKA Y Y. Suppression of VFT in 1 100 kV GIS by adopting resistor-fitted disconnecter[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1996, 11(2): 872-880.
- [17] MA Guoming, LI Chengrong, QUAN Jiangtao, et al. "Measurement of VFTO based on the transformer bushing sensor[J]. IEEE Transactions on Power Delivery 2011 26(2): 684-692.
- [18] MA Guoming, LI Chengrong, CHEN Weijiang, et al. A reliable wide-bandwidth VFTO sensor based on surface-mounted devices[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2013, 28(3): 1839-1846.
- [19] 王磊, 陈维江, 岳功昌, 等. 特高压气体绝缘开关设备的隔离开关残余电荷电压仿真分析[J]. 高电压技术, 2014, 40(12): 3911-3917.
WANG Lei, CHEN Weijiang, YUE Gongchang, et al. Simulation analysis of potential caused by trapped charge in disconnecter of UHV gas insulated switchgear device[J]. High Voltage Engineering, 2014, 40(12): 3911-3917.
- [20] 曹书云, 焦重庆. L型 GIS 管道对电磁波传播的影响及等效电路建模[J]. 电气技术, 2016(11): 6-12.
CAO Shuyun, JIAO Chongqing. Influence of L-shape part of GIS enclosure on electromagnetic propagation characteristics and equivalent circuit model[J]. Electrical Engineering, 2016(11): 6-12.
- [21] 焦重庆, 李明洋, 崔翔. 特高压气体绝缘开关设备套管的宽频等效电路建模[J]. 电工技术学报, 2016, 31(10): 64-72.
JIAO Chongqing, LI Mingyang, CUI Xiang. Broadband equivalent circuit model of bushing for gas insulated switchgear in ultra high voltage substation[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2016, 31(10): 64-72.
- [22] 赵军, 陈伟江, 张建功, 等. 计及套管导体辐射损耗的 VFTO 计算方法[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(13): 3692-3698.
ZHAO Jun, CHEN Weijiang, ZHANG Jiangong, et al. VFTO calculation method considering radiation loss of bushing conductor[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(13): 3692-3698.
- [23] 杨萌, 汪芳宗. 基于 2 级 3 阶对角隐式 Runge-Kutta 法的电磁暂态计算方法[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(6): 68-73.
YANG Meng, WANG Fangzong. 2-stage 3-order diagonally implicit Runge-Kutta method for electromagnetic transient calculation[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(6): 68-73.

收稿日期: 2018-12-05; 修回日期: 2019-01-18

作者简介:

王磊(1984—), 男, 通信作者, 博士研究生在读, 高级工程师, 研究方向为电力系统过电压与绝缘配合。E-mail: wanglei8@epri.sgcc.com.cn

(编辑 许威)