

DOI:10.13296/j.1001-1609.hva.2019.02.005

高频过电压抑制导线抑制VFTO的试验研究

冯宇¹, 吴士普¹, 吴细秀², 刘衍³, 龙国华³,
王磊¹, 李超², 周帆², 张圆圆²

(1. 中国电力科学研究院有限公司, 武汉 430074; 2. 武汉理工大学, 武汉 430070;
3. 国网江西省电力有限公司电力科学研究院, 南昌 330096)

摘要: 为验证高频过电压抑制导线(以下简称抑制导线)对VFTO抑制效果,在某550 kV GIS试验平台上开展了VFTO抑制验证试验。为开展试验,依据IEC 62271-102—2013标准对试验平台的尺寸进行了优化设计。依据GIS的工作工况,设计了加交流、直流、隔离开关分闸、合闸等试验条件。从VFTO的幅值、持续时间、击穿次数和频率成分方面对安装抑制导线前后的试验结果进行了总结分析。试验结果表明:VFTO最高幅值可从安装前2.42 p.u.下降为1.49 p.u.;幅值抑制比最大可达52.94%,最小也有22.22%;安装抑制导线后,全波击穿次数可从13次减少到5次,持续时间从7个工频周波减少到2.5个工频周波;同时试验结果揭示抑制导线对VFTO的高频成分抑制效果明显。上述结果表明:高频过电压抑制导线法对VFTO具有很好的抑制效果,是一种极具工程应用前景的方法。

关键词: VFTO; GIS; 抑制; 高频过电压抑制导线; 击穿次数; 试验研究

Experimental Study on Restraining Busbar Suppressing VFTO

FENG Yu¹, WU Shipu¹, WU Xixiu², LIU Yan³, LONG Guohua³, WANG Lei¹, LI Chao²,
ZHOU Fan², ZHANG Yuanyuan²

(1. China Electric Power Research Institution Co., Ltd., Wuhan 430074, China; 2. WuHan University of Technology, Wuhan 430070, China; 3. Jiangxi Electric Power Research Institution Co., Ltd., Nanchang 330096, China)

Abstract: In order to verify the VFTO suppression effect of the restraining busbar, the VFTO suppression verification test was carried out on a 550 kV GIS test platform. In order to carry out the test, the dimensions of the test platform were optimized according to the IEC 62271-102—2013 standard. According to the working conditions of GIS, the test conditions of AC, DC, disconnector opening and closing are designed. From the aspect of VFTO, the duration, the number of breakdowns and the frequency components, the test results before and after the installation of the restraining busbar are summarized and analyzed. The test results show that the maximum amplitude of VFTO can be reduced from 2.42 p.u. to 1.49 p.u. before installation; the amplitude suppression ratio can reach up to 52.94%, and the minimum is also 22.22%; after installing the restraining busbar, the number of full-wave breakdown can be reduced from 13 times to 5 times, the duration is reduced from 7 power frequency cycles to 2.5 power frequency cycles; at the same time, the test results reveal that the restraining busbar has a significant effect on the high frequency component suppression of VFTO. The verification test shows that the restraining busbar has a good suppression effect on VFTO, and it is a method with great engineering application prospects.

Key words: VFTO; GIS; suppression; restraining busbar; number of breakdowns; experimental study

收稿日期:2018-06-03; 修回日期:2018-08-05

基金项目:国家电网公司科技项目(GY71-16-006)。

Project Supported by Science and Technology Plan of SGCC(GY71-16-006).

0 引言

在GIS变电站中,VFTO具有波前陡、幅值高、频带宽、持续时间长等特点^[1-5],一方面它对GIS本体及其与之相连的设备的绝缘造成威胁;另一方面还会产生电磁干扰,破坏二次设备的正常工作。因此,开展VFTO的抑制研究对保障GIS变电站安全稳定运行而言具有十分重要的意义^[6-10]。

文[1]提出一种抑制VFTO新方法—高频过电压抑制导线(以下简称抑制导线)法,并介绍了这种方法的工作原理、结构特征和设计难点。

为了验证该方法的抑制效果,在550 kV GIS试验平台上开展了VFTO抑制试验。试验结果表明:抑制导线对VFTO幅值具有明显抑制效果,VFTO最高幅值从安装前2.42 p.u.下降为1.49 p.u.,VFTO幅值抑制比最大可达52.94%,最小也有22.22%。同时,抑制导线对VFTO的频率也有抑制作用。安装抑制导线后,VFTO频率中十几MHz以上的高频成分消失不见。

1 试验设计

1.1 试验回路

根据IEC 62271-102—2013^[11]标准提出隔离开关切合短母线操作时产生VFTO的方法,考虑实际GIS变电站的接线方式^[12],确定的试验回路见图1。图1中:BG₁和BG₂是GIS套管;AC为交流电源;DC是直流电源,用于模拟残余电荷^[13];DS₁、DS₂和DS₃为隔离开关。试验时,通过BG₁引入交流电压,需要时通过BG₂经DS₁给L₃预充直流电压,通过操作DS₂产生VFTO波形。为了验证抑制导线对VFTO的抑制效果,抑制导线安装在DS₁和DS₂之间(即L₃处)。试验共有3个测点,分别布置在DS₁、DS₂和DS₃侧,见图2。

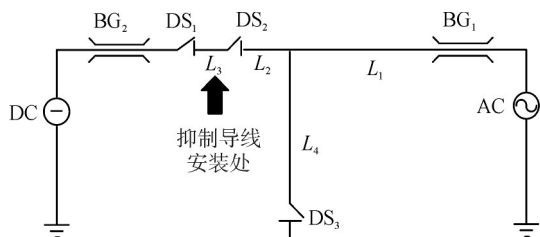


图1 550 kV GIS试验回路

Fig. 1 550 kV GIS test circuit

考虑到GIS间隔长度对VFTO大小有影响^[14-15],故在确定GIS回路尺寸时,开展了GIS回路尺寸对VFTO幅值影响的研究。试验回路尺寸确定总体原则是先根据IEC 62271-102—2013标准结合实际运行

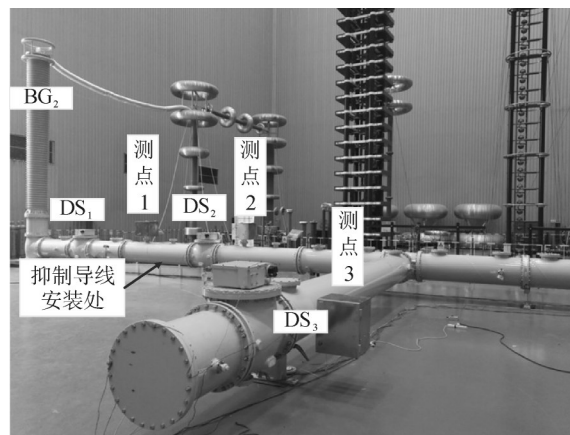


图2 测点布置示意图

Fig. 2 Schematic diagram of measuring points

550 kV GIS设计尺寸,经过初步仿真得到L₁~L₄的大致范围,即:L₁为8~10 m,L₂和L₃为3~5 m,L₄为8~11 m。在此基础上进一步仿真,结果见图3。最终确定出L₁~L₄具体尺寸大小,具体步骤如下:

1)L₁对VFTO的影响结果如图3(a)所示。由图3(a)可知,无论是电源侧还是负载侧,VFTO幅值随着L₁的增加先增大后减小。无论是电源侧还是负载侧都存在着一个使VFTO幅值最大的L₁取值,该取值并能同时使电源测和负载侧VFTO幅值达到最大。根据GIS的电压等级和实际运行工况,最终L₁的设计尺寸为8.8 m。

2)图3(b)是L₁为不同尺寸条件下,L₂尺寸变化对VFTO的影响。L₂变化时,电源侧VFTO随L₂尺寸增加先减小后增大;而负载侧VFTO随L₂的变化未表现出明显的变化规律。负载侧残余电荷对VFTO的幅值有较大影响,考虑残余电荷、测点传感器的安装以及分支母线的关系等因素,最终确定L₂为4.5 m。

3)在L₁、L₂确定的情况下,考虑抑制导线的加工与安装位置,结合抑制导线不改变GIS回路原有的设计尺寸的安装原则,确定L₃的尺寸为3.8 m。

4)图3(d)为L₁等于9 m,L₂、L₃在不同尺寸条件下,L₄尺寸变化对VFTO的影响。最后优选出L₄的尺寸为8.8 m。

GIS试验回路的最终尺寸见表1。

1.2 测量系统

VFTO测量系统主要包括VFTO测量、同步触发和波形记录存储3个部分^[16-19],见图4。

1)VFTO测量:窗口式传感器见图5,该传感器基于电容分压原理^[16,17],测量频带为10 Hz到200 MHz。对高频信号响应能力良好,对方波响应的固有响应时间小于1.75 ns^[18],实测平均分压比为97 015.4,充分满足VFTO测量需求。

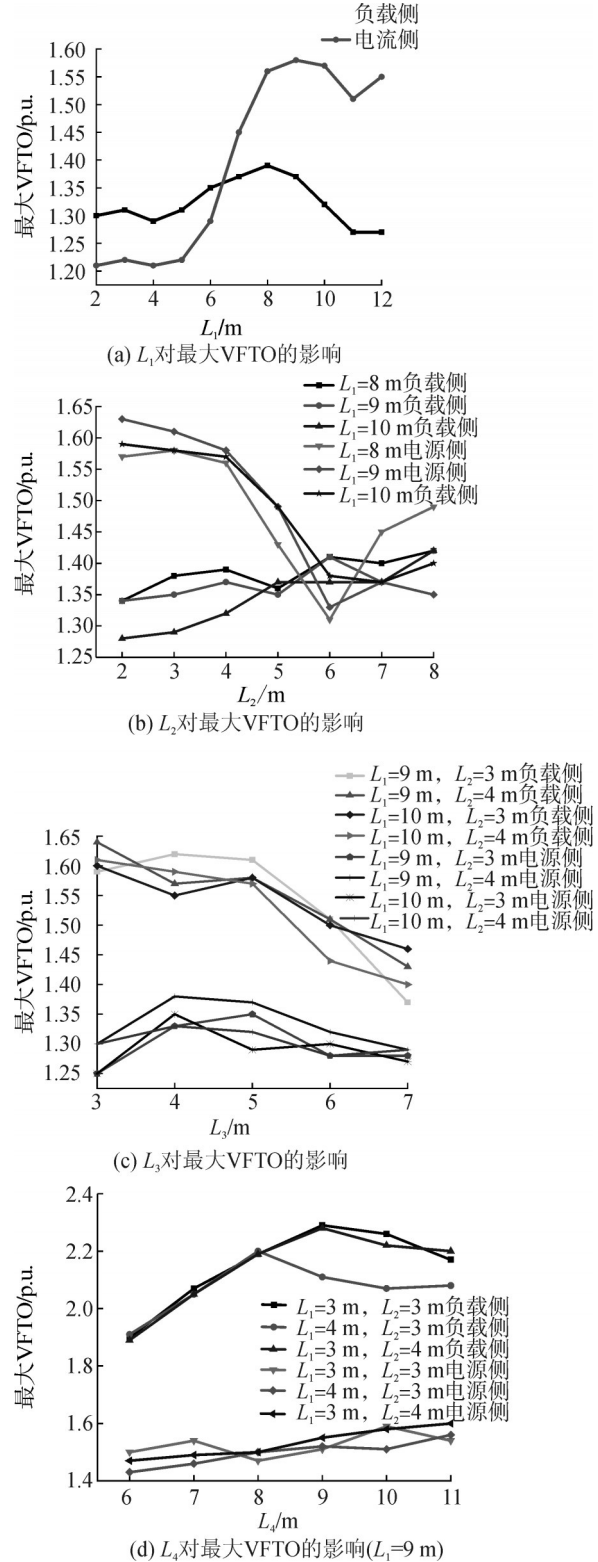


图3 GIS试验回路尺寸对最大VFTO影响的仿真结果
Fig. 3 Simulation results of GIS test circuit size impact on maximum VFTO

表1 试验回路尺寸
Table 1 Test circuit size

名称	GIS间隔			
	L_1	L_2	L_3	L_4
长度/m	8.8	4.5	3.8	8.8

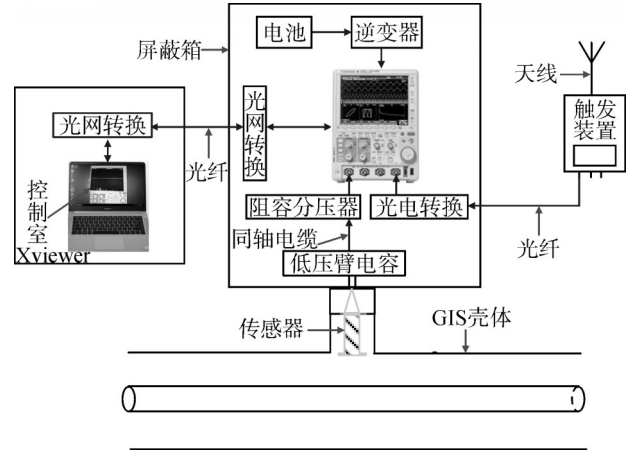


图4 VFTO测量系统
Fig. 4 VFTO measuring system

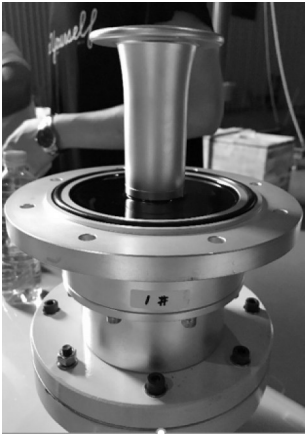


图5 窗口式传感器
Fig. 5 Window sensor

2)同步触发:测量系统采用同步触发装置以保证测量系统的稳定和同步性。同步触发包括触发装置和光电转换电路。隔离开关操作时,天线接收高频信号,即VFTO产生信号,控制同步触发装置产生触发信号,该信号经过光纤传输和光电转换,触发3个测点的示波器记录波形。

3)波形记录存储:包括示波器记录以及将示波器记录的数据传输到控制室。为防止VFTO产生的辐射干扰波形的记录,整个示波器放置于屏蔽箱内,并采用独立电源供电。现场波形记录采用高储存深度、宽带频的横河DLM2054示波器,示波器采样频率设置为125 MHz,记录波形长度为1 s,并采用上升沿触发记录模式。波形数据采用光纤构建的通讯网络远程传输至控制室内计算机,计算机通过Xviewer软件读取和存储波形数据。

1.3 抑制导线的安装

抑制导线法抑制VFTO的最大优势是安装方便。将常规母线镂空加工成螺旋管状,再并联阻尼电阻,故它不需要改变原有母线的尺寸,所以 L_3 的尺

寸没变。试验所设计抑制导线已考虑了绝缘、通流温升、动稳特性等工程应用问题并进行了相关试验。依据工程应用经验,将抑制导线安装在产生VFTO相对大的地方,即图1中 L_3 处。试验所用抑制导线见图6。其电感值为 $40\ \mu\text{H}$,共70匝;每5匝为一个单元,共14个单元,每单元并联6个 $30\ \Omega$ 的阻尼电阻。

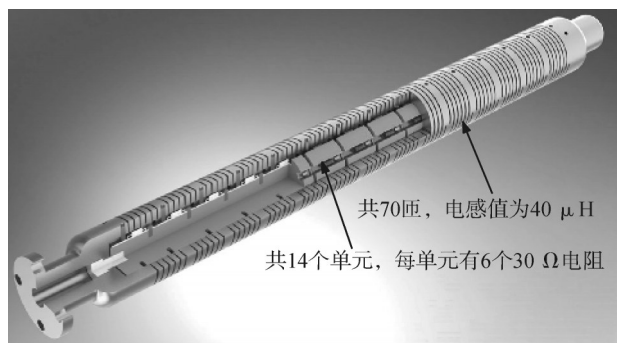


图6 抑制导线

Fig. 6 Restraining busbar

1.4 试验步骤

为研究残余电压对VFTO的影响,设计了加直流和不加直流的试验条件。不加直流时, DS_1 全过程保持分闸状态;交流加压后,重复进行先合闸再分闸 DS_2 的操作可产生多组VFTO波形。加直流电压时操作步骤流程图见图7。加直流时,先确认 DS_1 为合闸、 DS_2 为分闸状态,直流电源电压升至相电压幅值大小,随后将 DS_1 分闸,完成加直流操作;直流电源降压后再加交流电压;合、分 DS_2 产生一组VFTO波形;将交流降压、 DS_1 合闸后才能进行下一组试验。与此对应,安装抑制导线后也进行了相对应的试验。

2 试验结果分析

影响VFTO的因素有很多,如残余电荷,分合闸相角等,并且VFTO还具有一定的随机性^[13,19],这些都应该在试验中予以考虑。由于该试验的目的是验证抑制导线对VFTO的效果,即通过试验弄清楚安装抑制导线后VFTO的幅值是否降低,相应的波前陡度是否也减小。故重点关注整个试验过程中安装抑制导线前后VFTO幅值、击穿次数、持续时间等参数的变化。

2.1 幅值抑制效果分析

抑制导线安装前、后VFTO全波图和VFTO幅值统计图分别见图8、9。抑制导线安装后VFTO幅值抑制比见图10。由图8-10可知,无论是在分闸还是合闸条件下,无论是否预加直流电压,安装抑制导线后VFTO波形变化具有如下特征:

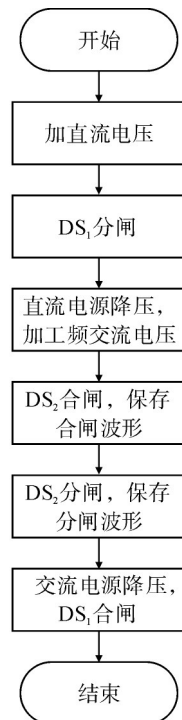


图7 加直流电压时操作步骤流程图

Fig. 7 Flow chart of operation steps when DC voltage is applied

1)幅值明显下降。由图8(c)和图9可知,加直流、合闸时测点1的最高幅值从 $2.42\ \text{p.u.}$ 下降为 $1.49\ \text{p.u.}$,此时VFTO抑制幅度高达38.43%。由图10可知,抑制导线对VFTO抑制效果最好时出现在不加直流、合闸时的测点1,其幅值抑制可达52.94%;对VFTO的抑制效果最差是在加直流、分闸时的测点1,其抑制百分比也达到22.22%。测点2分合闸的VFTO均未过冲。

2)VFTO持续时间明显减小。由图8(a)可知,不加直流、合闸时测点1的VFTO持续时间从7个工频周波下降到2.5个工频周波。

2.2 击穿次数抑制效果分析

抑制导线安装前、后波形击穿次数对比图见图11。以击穿电压超过 $0.3\ \text{p.u.}$ 算一次击穿^[20-21],抑制导线安装前、后击穿次数统计结果见图12。由图11、12可知,无论是在分闸还是合闸条件下,无论是否预加直流电压,安装抑制导线后VFTO全波击穿次数具有如下特征:VFTO全波形击穿次数减少。由图12统计结果可知,抑制导线安装后击穿系数全部呈现明显下降趋势。在不加直流、合闸时的击穿次数从安装前的13次减少到5次;加直流、分闸时的击穿次数从15次减少到8次。

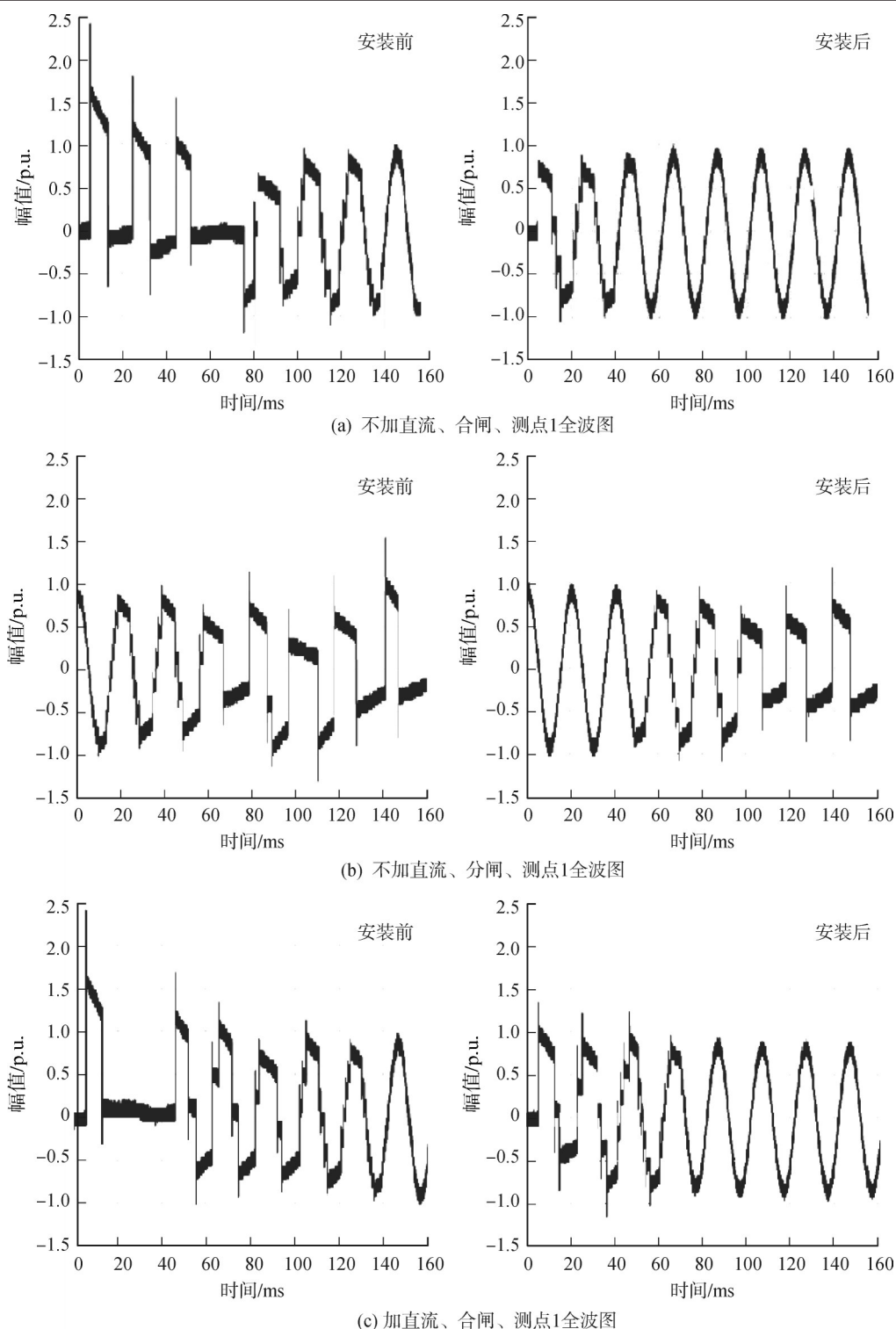


图8 抑制导线安装前、后 VFTO 全波图

Fig. 8 VFTO full wave diagram before and after installation of restraining busbar

2.3 频率抑制效果分析

安装抑制导线前后 VFTO 单脉冲展开波形对比和频谱图对比分别见图 13、14。由图 13、14 可知, 安装抑制导线后, VFTO 频率成分变化具有如下特点:

1) 安装抑制导线后, VFTO 波形振荡幅度减小, 振荡次数变少, 衰减过程迅速。

2) 频率成分变少, 高频成分抑制明显。由图 14 可知, 安装前主要有 7.5、14.5、46.5 MHz 高频成分分布; 安装后无明显高频频率。

高频成分减少的主要原因是: 抑制导线引入了高频时具有显著电感的部件, 高频时螺旋管母线电感量比常规母线高, VFTO 波通过时波头和波尾被

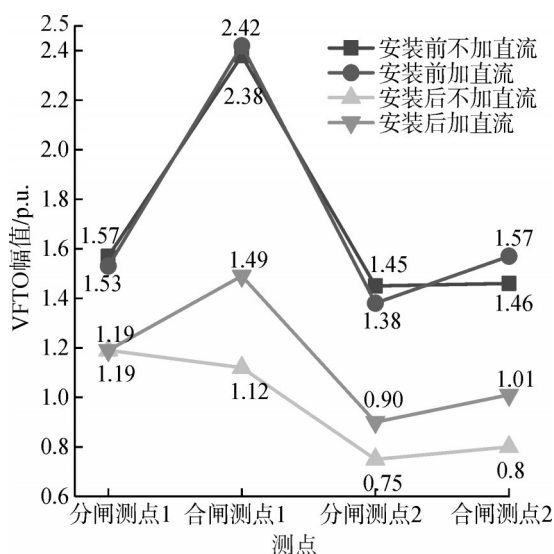


图9 抑制导线安装前后VFTO幅值统计图

Fig. 9 VFTO amplitude statistics before and after the installation of the restraining busbar

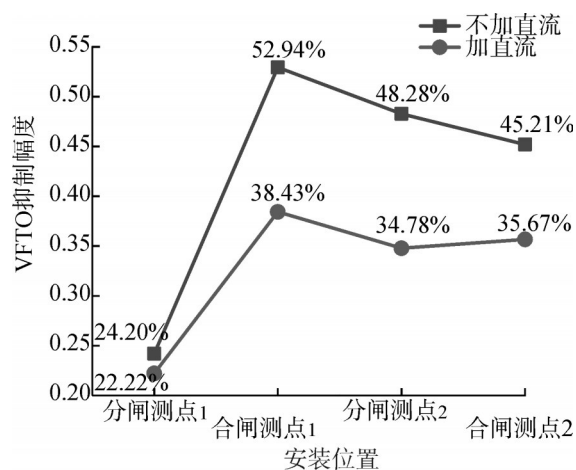


图10 抑制导线安装后VFTO幅值抑制比

Fig. 10 VFTO suppression percentage after installing the restraining busbar

拉平,波幅降低,从而使高频受到显著抑制。

3 结论

为验证高频过电压抑制导线抑制VFTO效果,在550 kV GIS平台上开展了抑制导线抑制VFTO的试验,试验结果表明:

1)抑制导线对VFTO幅值抑制效果明显。VFTO最高幅值从安装前2.42 p.u.下降为1.49 p.u.; VFTO幅值抑制比最大高达52.94%,最小也有22.22%。

2)安装抑制导线后,VFTO持续时间大为减少。加直流、合闸时的测点1的VFTO持续时间从7个工频周波减少到2.5个工频周波。

3)击穿次数减少。不加直流、合闸时全波的击穿次数从13次减少至5次;加直流、分闸时的击穿

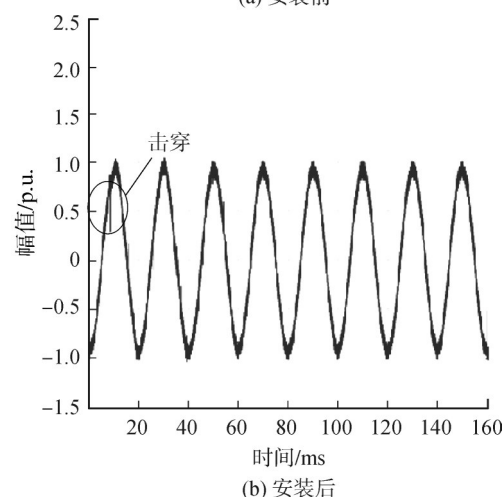
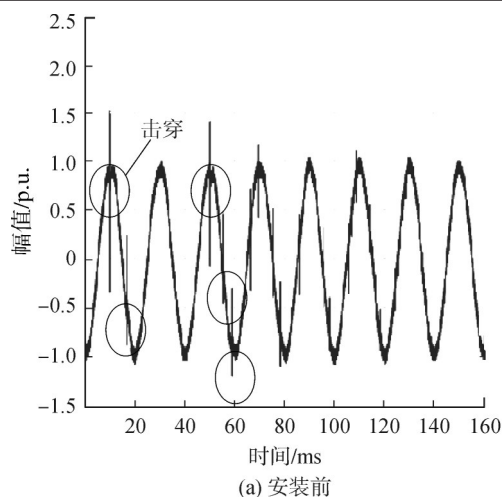


图11 击穿次数对比(加直流、合闸、测点2)

Fig. 11 Comparison of the number of breakdowns (DC voltage, closing, measuring point 2)

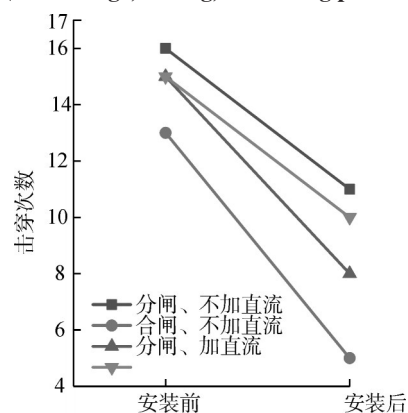


图12 抑制导线安装前、后击穿次数统计

Fig. 12 Statistics on the number of breakdowns before and after the installation of the restraining busbar

次数从15次减少至8次。

4)抑制导线对VFTO高频成分具有明显抑制效果。

试验表明,高频过电压抑制导线法对VFTO具有很好的抑制效果,是一种极具工程应用前景的方法。

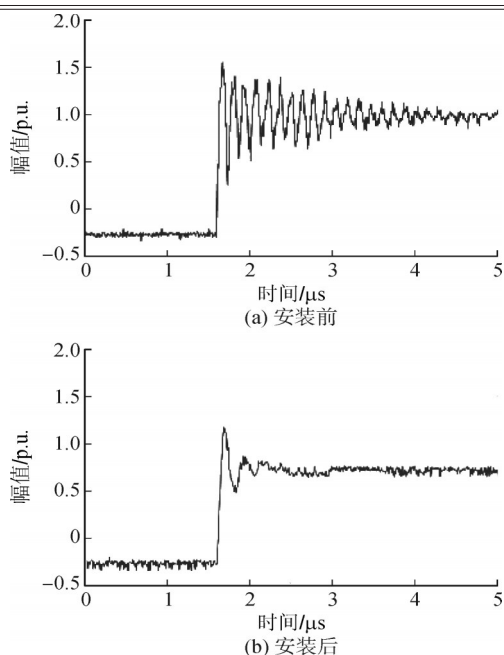


图13 抑制导线安装前、后VFTO单脉冲波形对比(不加直流、分闸、测点1)

Fig. 13 Comparison of VFTO single pulse waveform before and after installation of restraining busbar (no DC voltage, opening, measuring point 1)

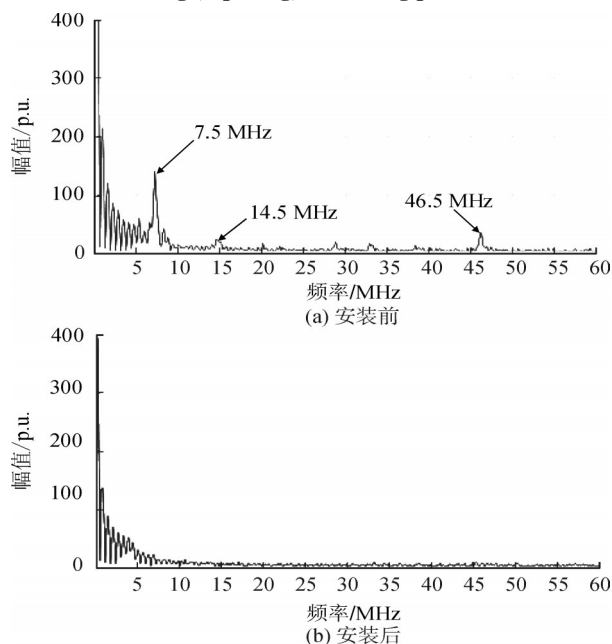


图14 抑制导线安装前后VFTO频谱图
(不加直流、合闸、测点1)

Fig. 14 VFTO spectrum diagram before and after the installation of the restraining busbar
(no DC voltage, closing, measuring point 1)

志谢

感谢国家电网《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》项目的大力支持! 感谢国网江西省电力科学研究院提供了良好的试验环境, 对该项目予以的大力支持表示深深的感

谢! 感谢状态评价中心张宇主任、周求宽主任、周友武、邹阳和徐碧川等在试验过程中给予的帮助! 感谢华北电力大学在测量过程中予以的指导! 另外, 感谢武汉理工大学自动化学院的文博、杨馨等在试验测量和数据分析中所作的工作。

参考文献:

- [1] 冯宇, 吴士普, 吴细秀, 等. VFTO抑制新方法研究-高频过电压抑制导线[J]. 高压电器, 2018, 54(10): 1-5.
FENG Yu, WU Shipu, WU Xixiu, et al. A new method to suppress VFTO—the high frequency overvoltage restraining busbar [J]. High voltage apparatus, 2018, 54(10): 1-5.
- [2] 吴士普, 李璿, 臧英, 等. 550 kV GIS站VFTO计算及抑制方法研究[J]. 高压电器, 2018, 54(1): 90-96.
WU Shipu, LI Rui, ZANG Ying, et al. Research on VFTO calculation and suppression method of 550 kV GIS station [J]. High voltage apparatus, 2018, 54(1): 90-96.
- [3] 赵承楠, 曾宪振, 孟会增, 等. 252 kV GIS特快速暂态过电压和电流的影响因素分析[J]. 高压电器, 2015, 51(3): 93-98.
ZHAO Chengnan, ZENG Xianzhen, MENG Huizeng, et al. Analysis of the factors Influencing on the very fast transient overvoltage and current generated in 252 kV GIS [J]. High voltage apparatus, 2015, 51(3): 93-98.
- [4] 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.
- [5] 刘亚培, 林生军, 高文胜, 等. 800 kV GIS变电站VFTO计算研究[J]. 高压电器, 2017, 53(9): 143-148.
LIU Yapei, LIN Shengjun, GAO Wensheng, et al. Calculation of very fast transient overvoltage for 800 kV GIS substation [J]. High voltage apparatus, 2017, 53(9): 143-148.
- [6] 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(5): 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(5): 38-47.
- [7] 朱跃, 周越, 颜湘莲, 等. 750 kV GIS电站VFTO波形特征参数的提取及统计分析[J]. 高压电器, 2016, 52(4): 75-78.
ZHU Yue, ZHOU Yue, YAN Xianglian, et al. Extraction and statistical analysis of characteristic parameters of very fast transient overvoltage in 750 kV gas insulated substation

- [J]. High Voltage Apparatus, 2016, 52(4): 75-78.
- [8] 高凡夫, 谭向宇, 梁志瑞. 铁氧体磁环抑制 550 kV GIS 中的特快速暂态过电压的试验研究[J]. 高压电器, 2018, 54(10):132-136.
- GAO Fanfu, TAN Xiangyu, LIANG Zhirui, et al. Experimental study on suppressing VFTO in 550 kV GIS by ferrite beads [J]. High Voltage Apparatus, 2018, 54(10): 132-136.
- [9] 刘 青. 隔离开关不同操作方式产生的快速暂态过电压[J]. 高压电器, 2011, 47(4):17-22.
- LIU Qing. Very fast transient overvoltage caused by different switching modes of disconnecter [J]. High Voltage Apparatus, 2011, 47(4): 17-22.
- [10] 关永刚, 郭珮琪, 陈维江, 等. 铁氧体磁环抑制 252 kV GIS 中 VFTO 的试验研究[J]. 高电压技术, 2014, 40(7):1977-1985.
- GUAN Yonggang, GUO Peiqi, CHEN Weijiang, et al. Test study on suppressing VFTO in 252 kV GIS by ferrite magnetic rings[J]. High Voltage Engineering, 2014, 40(7): 1977-1985.
- [11] High-voltage switchgear and controlgear-Part 102:Alternating current disconnectors and earthing switches: IEC 62271-102—2001[S]. 2001.
- [12] 戴 敏, 谷定燮, 孙 岗, 等. 特高压气体绝缘开关设备特快速瞬态过电压的试验回路研究[J]. 中国电机工程学报, 2011, 31(31):28-37.
- DAI Min, GU Dingxie, SUN Gang, et al. Study on full-scale 1 000 kV gas insulated switchgear test circuit for very fast transient overvoltage[J]. Proceedings of the CSEE, 2011, 31(31): 28-37.
- [13] 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.
- [14] 段韶峰, 李志兵, 詹花茂, 等. 252 kV GIS 特快速瞬态试验回路研究[J]. 高压电器, 2016, 52(2):28-34.
- DUAN Shaofeng, LI Zhibing, LIU Beiyang, et al. Research on very fast transient test circuit for 252 kV GIS [J]. High Voltage Apparatus, 2016, 52(2): 28-34.
- [15] 杨 钰, 王赞基, 邵 冲, 等. 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 Zan-ji, SHAO Chong, et al. Effect of GIS bus structure and parameters on VFTO waveform[J]. High Voltage Engineering, 2009, 35(9): 2306-2312.
- [16] 陈 珉, 马国明, 李成榕, 等. 气体绝缘开关设备介质窗口式特快速暂态过电压测量用传感器研制[J]. 高电压技术, 2014, 40(3): 897-903.
- CHEN Min, MA Guoming, LI Chengrong, et al. Dielectric window sensor development for very fast transient overvoltage measurement in gas insulated switchgear[J]. High Voltage Engineering, 2014, 40(3): 897-903.
- [17] 吴 昊, 李成榕, 徐海瑞, 等. 用于 VFTO 测量的 GIS 窗口式传感器[J]. 电工技术学报, 2012, 27(9):210-217.
- WU Hao, LI Chengrong, XU Hairui, et al. Method for measurement of VFTO based on GIS disk sensor[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2012, 27(9): 210-217.
- [18] 詹花茂, 赵承楠, 段韶峰, 等. 气体绝缘开关设备的隔离开关分合空载短母线时特快速暂态过电压及特快速暂态电流测量[J]. 高电压技术, 2013, 39(6):1317-1323.
- ZHANG Huamao, ZHAO Chengnan, DUAN Shaofeng, et al. Measuring of very fast transient over-voltage and very fast transient current generated by disconnecter in gas insulated switchgear switching on/off short buses with on load [J]. High Voltage Engineering, 2013, 39(6): 1317-1323.
- [19] 关永刚, 蔡元纪, 刘卫东, 等. GIS 隔离开关操作产生的壳体电位升高和 VFTO 关系[J]. 高电压技术, 2015, 41(12): 4097-4104.
- GUAN Yonggang, CAI Yuanji, LIU Weidong, et al. Relationship between transient enclosure voltage and very fast transient overvoltage generated during disconnecter operations in gas insulated switchgear[J]. High Voltage Engineering, 2015, 41(12): 4097-4104.
- [20] 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.
- [21] 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 disconnecter in 1 000 kV GIS[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2011.
- 冯 宇(1978—), 男, 博士, 高级工程师, 主要从事电力互感器、电力变压器、电能质量分析与控制技术方面的研究工作。
- 吴细秀(1976—), 女, 博士, 副教授, 主要从事高电压绝缘、高压电器电磁仿真方面的研究工作。