

微缩 GIS 中 VFTO 的传播特性研究

成 林¹, 杨鼎革¹, 王彦懿², 杨昌建¹

(1. 国网陕西省电力有限公司电力科学研究院, 西安 710100; 2. 西安交通大学电力设备与电气绝缘国家重点实验室, 西安 710049)

摘要: 气体绝缘金属封闭开关设备(gas-insulated metal-enclosed switchgear, GIS)在进行开关操作时会产生严重电磁干扰,为了减小特快速暂态过电压(very fast transient overvoltage, VFTO)等电磁暂态过程对二次设备的影响,文中搭建微缩 GIS 模拟实验平台,对 VFTO 在 GIS 中的传播特性进行研究。结果表明,线路末端 VFTO 的波形在空载情况下剧烈振荡,阻性负载下单调衰减,容性负载下阻尼性波动衰减。VFTO 最大幅值与传输距离和负载性质有关,空载幅值沿传输线逐渐增大,阻性负载幅值沿传输线逐渐减小。脉冲前沿时间与传输距离呈正相关,在电容性负载的稳压作用下末端脉冲陡度急剧减小。VFTO 的 RMS 均方根抖动对于阻性负载较为敏感,阻性负载时抖动幅度约为空载时的 1/20。除此之外,GIS 多线路负载相比于单线路对脉冲前沿的减缓作用更加明显,同时也能够降低脉冲的最大幅值。

关键词: 特快速暂态过电压; 电磁干扰; 脉冲幅值; 脉冲前沿

Study on Propagation Characteristics of VFTO in Micro GIS

CHENG Lin¹, YANG Dingge¹, WANG Yanyi², YANG Changjian¹

(1. State Grid Shaanxi Electric Power Research Institute, Xi'an 710100, China; 2. State Key Laboratory of Electrical Insulation and Power Equipment, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: Gas insulated switchgear(GIS)substation can produce serious electromagnetic interference during switching operation. In order to reduce the influence of such electromagnetic transient processes as very fast transient overvoltage(VFTO) on secondary equipment, a micro GIS simulation experiment platform is set up in this paper so to study the propagation characteristics of VFTO in GIS. The results show that the waveform of VFTO at the end of the line oscillates violently under no-load condition, attenuates monotonically under resistive load and attenuates damping fluctuation under capacitive load. The maximum amplitude of VFTO is related to the transmission distance and load properties. The amplitude under no-load increases gradually along the transmission line, while the amplitude under resistive load decreases gradually along the transmission line. The pulse rise time is positively correlated with the transmission distance. Under the voltage regulation of the capacitive load, the steepness of the trailing pulse decreases sharply. The RMS jitter of VFTO is sensitive to resistive load, with the jitter amplitude under resistive load being approximately 1/20 of that under no-load conditions. In addition, compared with a single line, the multi-line load of GIS has a more obvious slowing effect on the pulse rise time, and it also reduces the maximum amplitude of the pulse.

Key words: very fast transient overvoltage(VFTO); electromagnetic interference; pulse amplitude; pulse rise

收稿日期:2026-01-12; 修回日期:2026-03-17

基金项目:国家电网有限公司总部科技项目(典型环境下电力传感器可靠性评测技术及电磁兼容性研究)。

Project Supported by Science and Technology Project of State Grid Corporation of China(Research on Reliability Evaluation and Electromagnetic Compatibility of Sensors for Electric Power Application Under Typical Environment).

0 引言

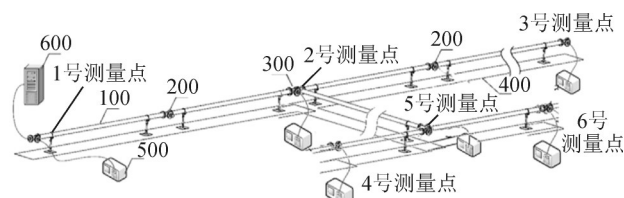
气体绝缘金属封闭开关设备(gas-insulated metal-enclosed switchgear, GIS)具有体积小、重量轻、开断性能优越等特点,在智能电网中得到了广泛的应用^[1-6]。变电站GIS将绝大部分的电气设备直接或间接密封在金属管道和套管中,从外部看不见任何开关和线路的接线端子,其主要由断路器、母线、隔离开关、电压互感器、电流互感器等高压电器组成^[7-8]。当GIS中需要进行分合闸空载母线时,由于隔离开关在操作过程中动作速度较慢,导致动静触头间的间隙多次反复击穿,在此期间会发生电弧重燃和熄灭现象,产生的电压行波沿GIS管道向负载处传播,在传输线路波阻抗不连续的位置经过多次折反射,形成了电压幅值较高、波头极陡的特快速暂态过电压(very fast transient overvoltage, VFTO)^[9-19]。国内外学者对VFTO的特性进行了深入的研究,孔旭等人研究了220 kV GIS中三相断路器关合空载变压器时的VFTO,选取了断路器出线套管下方、两台断路器中间、平行段母线3个不同位置点进行测量,发现辐射电场脉冲呈现双极性衰减形式且辐射电压幅值随距GIS的距离而衰减^[20]。刘彬等人对比了GIS隔离开关操作在电源侧和负载侧产生的VFTO暂态波形,由于波形具有工频叠加高频暂态,所以呈现为阶梯状,测量得到VFTO最大过电压倍数为1.22,上升速率约为17.2 kV/ μ s^[21]。蒋玲等人研究分析VFTO的幅值和频率特性随母线以及分支母线长度的变化规律,发现感性负载时隔离开关分闸引起的VFTO峰值随母线长度增加而发生振荡衰减,随着分支母线的长度的增加而逐渐下降^[22]。贺天任等人对550 kV GIS变电站中的VFTO与主变进线长度的关系进行了讨论,研究表明支路长度对VFTO暂态波形的形状有显著影响,支路长度较短时波形振荡剧烈且高频分量丰富^[23]。尽管许多学者对于GIS中不同位置的暂态过电压已经进行了测量和分析,但是对于VFTO多线路传播的特征性质研究还有所欠缺,因此文中搭建GIS模拟实验平台,对不同负载情况下的特快速暂态过电压的最大幅值,脉冲前沿时间和RMS均方根抖动等特征参数进行测量,对比分析多线路与单线路的输出差异,对减少电磁暂态干扰对设备的影响提供了理论依据。

1 VFTO传播模拟实验平台搭建

1.1 模拟实验平台

为了模拟GIS内部VFTO的传播过程,根据其

实际结构特点设计搭建了GIS微缩模拟实验平台,整个系统对管道结构进行了精简,忽略电压互感器、电流互感器及检修手孔等次要结构,保留主管道和断路器、隔离开关等功能部件。GIS模拟实验装置采用模块化结构,组装形成“工”字形线路排布,主要组件包括:直通管、测量三通、开关三通、固定支架、接地、沿线路设置5个测量点,其模拟实验平台装置示意图见图1。



100—直通管; 200—开关三通; 300—测量三通; 400—接地铜皮; 500—示波器/数据采集卡; 600—陡波发生器。

图1 微缩GIS模拟实验平台示意图

Fig. 1 Schematic diagram of micro GIS simulation experiment platform

根据CIGRE的标准^[24],采用波阻抗 Z 和波的传播时间 τ 作为单相无损线路的参数,波阻抗的计算式为

$$Z = 60 \times \ln \frac{r_2}{r_1} \quad (1)$$

式(1)中: r_1 为导体外半径; r_2 为罐体的内半径。

在实验器件选择中,直通管每节长1 850 mm,外金属管采用外径为 $\phi 45$ mm、内径 $\phi 38$ mm的铝合金管,内导电杆采用外径 $\phi 12$ mm无氧紫铜,计算可以得到GIS传输线路的波阻抗为70 Ω 。两端加工有法兰和带有导向的插头,可以与开关三通或者测量三通导电杆插接配合。测量三通长150 mm,外壳由铝合金制成,导线杆与外壳之间采用聚四氟乙烯绝缘连接,而开关三通与测量三通外形相似,可以通过操作手柄控制干簧管的开断。模拟接地采用0.05 mm厚,200 mm宽铜带覆盖在直通管下方,测量示波器通过测量三通的BNC接口进行信号采集。

1.2 实验测量点布置

模拟实验装置平台管道“工”字上端总长16 m,下端总长12 m,中间相隔0.5 m,各测量点的距离见图2,其中可以接入负载的末端为3、4、6号点,在1号测量点接入陡波发生器,可输出130 V左右陡波电压。通过控制每个测量点之间的开关三通闭合实现不同线路的通断工况,如闭合1号与2号,2号与3号之间的开关,则工况为1-2-3通路。同时在陡波发生器端测量脉冲输出,设置为0号测量点,作为额定电压用于后文标幺值的计算。示波器采用10:1衰减比探针,量程为200 V,采样时间50 μ s/格。

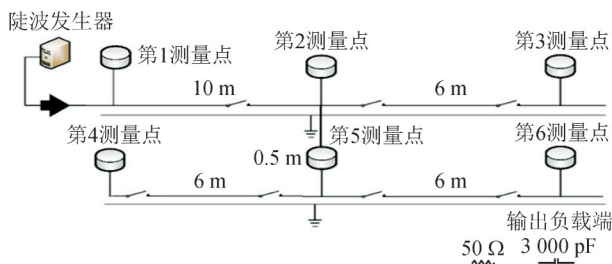


图2 GIS模拟实验测量原理图

Fig. 2 GIS simulation experimental measurement schematic

2 VFTO在传播模拟实验结果分析

VFTO的传播特性参数与GIS的长度、形状等内部结构密切相关,因此文中根据微缩GIS模拟实验平台的线路走线情况,设置接通点为1-2-3,1-2-5-6,1-2-3-5-6,1-2-3-4-5-6 4种工况,线路末端可为空载、 $50\ \Omega$ 负载、 $3\ 000\ \text{pF}$ 负载或混合性负载,分别测量每个节点的脉冲电压幅值、上升沿时间、RMS均方根抖动等特征参数,进行结果比对分析。

2.1 VFTO波形变化

将GIS线路的末端空载,接入 $50\ \Omega$ 电阻性负载和接入 $3\ 000\ \text{pF}$ 电容性负载,观察特快速暂态过电压波形随时间的变化情况,GIS末端VFTO波形展开见图3。

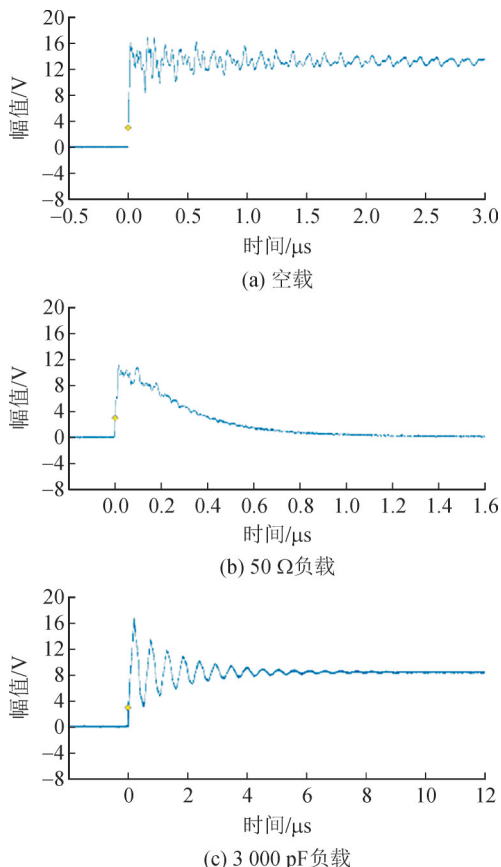


图3 末端VFTO波形展开图

Fig. 3 VFTO waveform expansion diagram at the end

从图3中可以看出,空载情况下最初波形呈现无规律化振荡形态,随时间变化波动幅度逐渐减弱,最终在管道末端存在残余电压; $50\ \Omega$ 电阻性负载下,陡波幅值整体上呈现单调衰减形态,并伴随有小幅度的幅值波动,最终末端电压趋于0,能量被电阻吸收;而 $3\ 000\ \text{pF}$ 负载情况下,脉冲输出的波形呈现阻感性波动衰减形状,衰减后末端保持一定的电压,但是幅值小于空载下的残余电压。

2.2 VFTO最大幅值

由于从脉冲输出点的0号点到1、2、5、3、6、4号测量点,沿每条单线路传输上看(如1-2-3通路,1-2-5-6通路等),传输距离是逐渐增大,所以将测量点距离脉冲输出点的距离作为变量,研究各个参数随测量距离的变化关系,其中VFTO最大幅值的变化见图4。

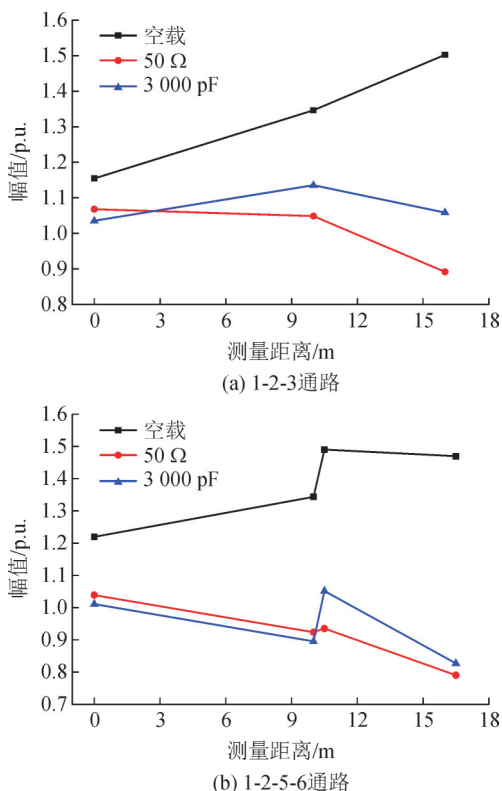


图4 不同负载下VFTO最大幅值

Fig. 4 Amplitude of VFTO under different loads

从图4中变化趋势可知,脉冲输出幅值取决于线路的传输长度和负载的性质。在空载情况下,这时的负载阻抗相当于无穷大,根据折反射原理在输出端口末端电压理论上可增大至 $2\ \text{p.u.}$,实验中3号测量点为初始幅值的 1.50 倍,6号测量点为初始幅值的 1.47 倍,测量点的最大幅值随传输距离的增大而明显增大;在电阻性负载的情况下,阻性负载需要消耗能量,随着传输距离的增大,VFTO的最大幅值逐渐减小;在电容性负载的情况下,测量点的最

大幅值随着传输距离的增大而波动变化,中间点的幅值高于管道末端,电容会储存一部分能量。从图4(b)的1-2-5-6通路的幅值变化可以看出,在5号测量点存在幅值异常增高的现象,原因可能是因为2号与5号相距较近,传输陡波幅值衰减缓慢,且测量点存在开关三通等不连续结构,造成电压波折反射在短距离线路中叠加使得幅值上升幅度较大。

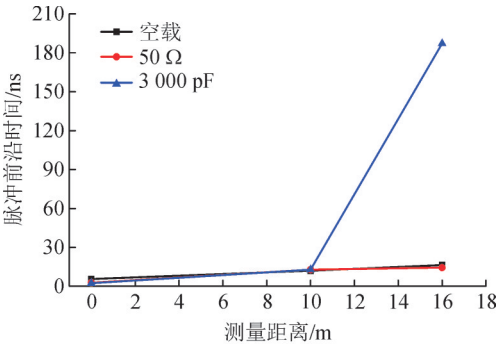
2.3 VFTO 脉冲前沿

脉冲前沿时间是衡量 VFTO 波形陡度的关键因素,对于开关器件等二次设备的安全工作具有重要意义。在单线路1-2-3通路和1-2-5-6通路末端接入不同负载,观察输出 VFTO 的脉冲前沿时间随测量距离的变化情况,见图5。

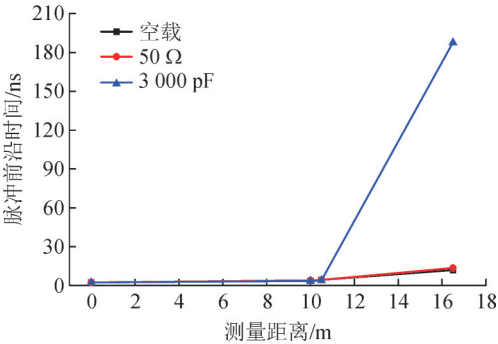
从图5中可以看出,脉冲前沿时间和脉冲陡度与传输的距离和负载性质息息相关,脉冲前沿时间随着传导距离的增大而增加,波形陡度随距离增大而下降。除此之外,可以观察到当线路末端是电容性负载时,VFTO 的脉冲前沿时间急剧增加,这是由于电容具有稳压作用,在GIS腔体输出端波动幅度会大大降低,脉冲前沿的陡度减小,有利于保护开关器件的安全性能。

2.4 VFTO 的RMS均方根抖动

由于 VFTO 波形抖动呈现出无规律化,与器件内部噪声引起的随机抖动波形相似^[25]。用于量化随机抖动的常用方法有峰峰值抖动和均方根 RMS 抖动,峰峰值抖动随着样本数量的增加而增加,会出



(a) 1-2-3通路



(b) 1-2-5-6通路

图5 不同负载下VFTO脉冲前沿时间

Fig. 5 VFTO pulse front edge time under different loads

现较大的误差,所以文中选择RMS均方根抖动表示VFTO波形相对稳定值的偏离程度,也可以体现波形中所含高频分量的多样性。

将线路接通1-2-3-5-6这5个测量点,在3号和6号线路末端测量点接入不同的负载,其测量RMS抖动情况见表1。

表1 1-2-3-5-6双负载通路RMS抖动

Table 1 1-2-3-5-6 RMS jitter of the dual-load path

测量距离/m	幅值/V				
	双空载	双50 Ω	双3 000 pF	3号点50 Ω,6号点3 000 pF	3号点3 000 pF,6号点50 Ω
0.0	3.093	0.173	1.649	0.240	0.248
10.0	3.077	0.138	1.678	0.206	0.213
10.5	3.177	0.158	1.735	0.239	0.235
16.0	3.181	0.157	1.724	0.225	0.256
16.5	3.114	0.143	1.672	0.232	0.213

观察表1中数据可知,VFTO的RMS抖动主要取决于末端负载的性质,在空载情况下VFTO均方根抖动较大,各测量点的幅值都超过3V;末端接入电阻性负载RMS的抖动幅度很小,其幅值约为空载情况下的1/20;电容性负载的RMS抖动大小介于空载与阻性负载之间,约为1.6V左右。当线路末端接入不同负载时,双线路的负载会共同影响RMS均方根的大小,如在3号点和6号点接入50Ω和3000pF,根据测量得到RMS抖动幅度介于双50Ω负载和双3000pF负载之间,且更偏向于阻性负载时的数

值,这说明VFTO的RMS抖动对于电阻性负载更为敏感。

2.5 VFTO 多线路传播

GIS气体绝缘变电站作为电力系统线路设备与信息共享的中转站,在实际工程应用中需要具备多个接入接出的通道,实现不同负载的多线路传输,因此对于GIS多线路电磁暂态过程也需要进行探讨。选取1-2-3单负载通路,1-2-5-6单负载通路以及1-2-3-5-6双负载通路进行模拟实验,其幅值沿测量距离的变化情况见图6。

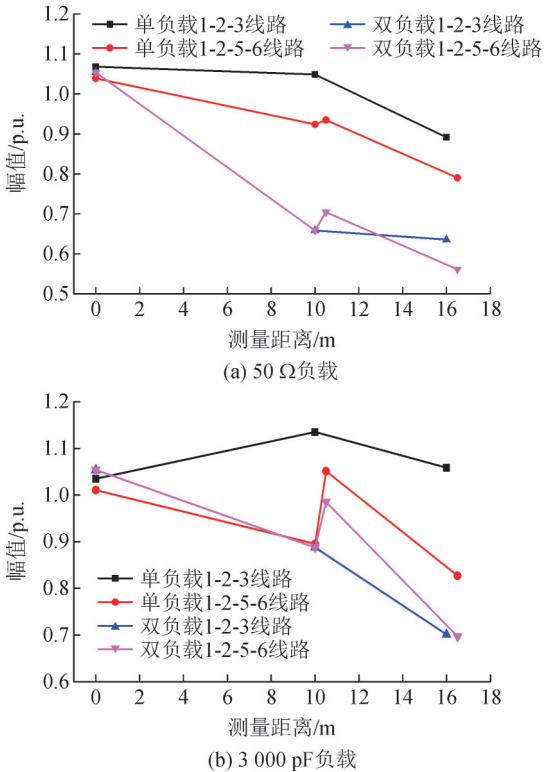


图6 多线路与单线路负载幅值对比

Fig. 6 Load amplitude comparison between multilines and single line

从图6中可以看出,无论是电阻性负载还是电容性负载,在双负载时线路末端的最大幅值都小于单负载线路,5号点由于短距离行波折反射叠加而电压略微上升。对于脉冲前沿时间,多线路与单线路负载脉冲前沿变化情况见图7,从图7可以看出双电容负载端的脉冲时间比单负载线路更长,脉冲陡度减缓更剧。总而言之,多条GIS负载线路可以减少暂态电压陡波带来的影响,在输出末端对VFTO幅值和陡度的抑制效果均有所提升。

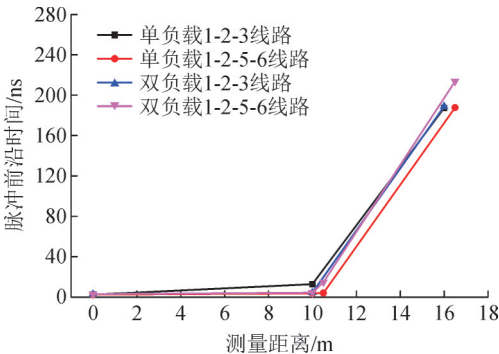


图7 多线路与单线路3 000 pF负载脉冲前沿时间对比

Fig. 7 Load pulse front edge time comparison between multilines and single line under 3 000 pF

3 结论

文中通过搭建GIS微缩模拟实验平台,在不同

工况下对特快速暂态过电压VFTO的波形幅值、脉冲前沿时间、RMS抖动参数进行了测量,分析了多线路负载相对于单线路负载在传播特性上的优势,得到以下结论:

1)GIS末端的VFTO波形在空载情况下呈现剧烈振荡形态,在阻性负载下逐渐单调衰减,容性负载下呈现阻尼性波动的衰减形状,并且空载与容性负载下都存在一定的残余电压。

2)脉冲最大幅值与线路的传输长度、负载的性质以及线路支路数密切相关。随着传输距离的增大,空载末端幅值明显增大,阻性负载末端幅值逐渐减小。

3)脉冲前沿时间与传输距离和负载的性质有关。在容性负载的末端,由于电容的稳压作用,输出VFTO脉冲前沿时间明显增加,脉冲陡度急剧减小。

4)VFTO的RMS均方根抖动对于阻性负载较为敏感,在空载时抖动最为剧烈,在阻性负载时抖动最小。

5)相比于单线路传播,GIS多线路负载时末端脉冲前沿时间有所增加,脉冲的最大幅值明显降低,有利于抑制GIS中的电磁暂态现象对二次设备的冲击影响。

参考文献:

[1] 林 莘. 现代高压电器技术[M]. 北京:机械工业出版社,2002.
Lin Xin. High voltage electrical apparatus technology in modern [M]. Beijing:China Machine Press, 2002.

[2] 王俊强,白海滨. 变电站110 kV GIS的更新改造[J]. 电世界, 2023,64(1):12-16.
Wang Junqiang, Bai Haibin. The renovation of 110 kV GIS in substation[J]. Electrical World, 2023, 64(1): 12-16.

[3] 李云阁,尚 勇,韩彦华,等. 关于极快速暂态过电压(VFTO)研究的现状[J]. 电网与清洁能源,2024,40(10):1-12.
Li Yunge, Shang Yong, Han Yanhua, et al. Current progress in research on very fast transient overvoltage (VFTO)[J]. Power System and Clean Energy, 2024, 40(10): 1-12.

[4] Moreira D C, Nunes M V A, Moreira D D C, et al. Analysis of VFTO during the failure of a 550 kV gas-insulated substation[J]. Electric Power Systems Research, 2020(189): 106825.

[5] Kang C, Zhang Z, Wang Z, et al. Study on the characteristics of the potential rise of shell under VFTO in the GIS pumped storage power station[J]. Journal of Physics: Conference Series, 2022, 2369 (1):012035.

[6] 杨 帆,高有华. Mayr电弧模型下GIS中快速暂态过电压的仿真分析[J]. 电器与能效管理技术,2024(2):28-32.
Yang Fan, Gao Youhua. Simulation Analysis of fast transient overvoltage in GIS under Mayr arc model[J]. Electrical Apparatus and Energy Efficiency Management Technology, 2024(2):28-32.

- [7] 舒印彪. 加快建设坚强智能电网推动能源生产和消费革命[J]. 中国科技产业, 2018(5):10.
Shu Yinbiao. Accelerate the construction of strong smart grid to promote the revolution of energy production and consumption[J]. Science & Technology Industry of China, 2018(5):10.
- [8] 刘德东. GIS中特快速暂态过电压研究[D]. 南昌:华东交通大学, 2015.
Liu Dedong. Research on extra fast transient overvoltage in GIS [D]. Nanchang: East China Jiaotong University, 2015.
- [9] 吴琦. 隔离开关分闸和空载母线对VFTO的影响研究[J]. 电工材料, 2022(2):14-16.
Wu Qi. Study on the influence of disconnector opening and no-load bus on VFTO[J]. Electrical Engineering Materials, 2022(2): 14-16.
- [10] 王磊, 刘衍, 冯宇, 等. 特高压GIS变电站VFTO波形衰减仿真研究[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(22):45-51.
Wang Lei, Liu Yan, Feng Yu, et al. Simulation research on VFTO waveform attenuation in UHV GIS substation[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(22):45-51.
- [11] 孙志刚. 核电站GIS快速暂态过电压的成因及抑制[J]. 电工技术, 2020, 41(4):94-97.
Sun Zhigang. Causes and suppression of GIS fast transient overvoltage in nuclear power plant[J]. Electric Engineering, 2020, 41(4):94-97.
- [12] Chen Weijiang, Wang Hao, Han Bin, et al. Study on the influence of disconnector characteristics on very fast transient overvoltages in 1 100 kV gas-insulated switchgear[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2015, 30(4):2037-2044.
- [13] Shu Yinbiao, Chen Weijiang, Li Zhibing, et al. Experimental research on very-fast transient overvoltage in 1 100 kV gas-insulated switchgear[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2013, 28 (1):458-466.
- [14] 张倩, 李壮优. 500 kV GIS变电站VFTO抑制措施研究[J]. 电工技术, 2021(13):16-19.
Zhang Qian, Li Zhuangyou. Research on VFTO suppression method in 500 kV GIS[J]. Electric Engineering, 2021(13):16-19.
- [15] 张普, 莫付江, 刘欣桐, 等. GIS中隔离开关多次重燃弧模型计算与分析[J]. 高压电器, 2023, 59(1):30-37.
Zhang Pu, Mo Fujiang, Liu Xintong, et al. Calculation and analysis of multiple reignition arc model of disconnector in GIS[J]. High Voltage Apparatus, 2023, 59(1):30-37.
- [16] 申萌, 丁登伟, 李强, 等. GIS隔离开关开合短母线型式试验方式1中VFTO测量系统构建及波形解析[J]. 高压电器, 2022, 58(7):207-213.
Shen Meng, Ding Dengwei, Li Qiang, et al. Construction of VFTO measurement system and waveform analysis for switching test duty 1 of short busbar by GIS disconnector[J]. High Voltage Apparatus, 2022, 58(7):207-213.
- [17] 崔建, 孙帅, 张国钢, 等. 基于双温度磁流体电弧仿真改进Mayr电弧模型的特快速暂态过电压仿真方法[J]. 电工技术学报, 2024, 39(16):5149-5161.
Cui Jian, Sun Shuai, Zhang Guogang, et al. The very fast transient overvoltage simulation method based on two-temperature MHD arc simulation to improve Mayr arc model[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2024, 39(16):5149-5161.
- [18] 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.
- [19] Shu Yinbiao, Chen Weijiang, Li Zhibing, et al. Experimental research on very-fast transient overvoltage in 1 100 kV gas-insulated switchgear[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2013, 28 (1):458-466.
- [20] 孔旭, 郭飞, 梁涛, 等. 220 kV GIS中断路器关合空载变压器所产生VFTO辐射电场的测量与波形特征分析[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(18):5087-5093.
Kong Xu, Guo Fei, Liang Tao, et al. Measurement and analysis of the transient radiation electric field excited by the breaker when closing the unloaded transformer in GIS[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(18):5087-5093.
- [21] 刘彬, 叶国雄, 童悦, 等. 气体绝缘开关设备的隔离开关分合操作对电子式互感器电磁兼容特性的影响[J]. 高电压技术, 2018, 44(4):1204-1210.
Liu Bin, Ye Guoxiong, Tong Yue, et al. Influence of disconnector in gas insulated switchgear switching on/off on electromagnetic compatibility of electronic transformer[J]. High Voltage Engineering, 2018, 44(4):1204-1210.
- [22] 蒋玲, 曲全磊, 康钧, 等. 750 kV GIS设备母线拓扑结构对VFTO影响研究[J]. 电瓷避雷器, 2020(4):95-100.
Jiang Ling, Qu Quanlei, Kang Jun, et al. Research on the influence of 750 kV GIS bus topology structure on VFTO[J]. Insulators and Surge Arresters, 2020(4):95-100.
- [23] 贺天任, 高宇, 刘晓航, 等. 550 kV GIS变电站中VFTO仿真计算及抑制措施[J]. 电力系统及其自动化学报, 2022, 34(2): 65-70.
He Tianren, Gao Yu, Liu Xiaohang, et al. Numerical simulation and suppression measure for VFTO in 550 kV GIS substation[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2022, 34(2):65-70.
- [24] 吴文辉, 曹祥麟. 电力系统电磁暂态计算与EMTP应用[M]. 北京:中国水利水电出版社, 2012.
Wu Wenhui, Cao Xianglin. Electromagnetic transient calculation and EMTP application of power system[M]. Beijing: China Waterpower Press, 2012.
- [25] 任楠. 高速串行链路信号抖动分解技术研究[D]. 成都:电子科技大学, 2022.
Ren Nan. Research on signal jitter decomposition of high-speed serial link[D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2022.
- 成林(1979—), 男, 博士, 正高级工程师, 主要从事电磁兼容、智能传感、高电压与绝缘技术研究(E-mail:172377199@qq.com)。
杨鼎革(1982—), 男, 博士, 高级工程师, 主要从事开关类设备缺陷检测与故障诊断(E-mail:32977744@qq.com)。
王彦懿(2000—), 女, 博士研究生, 主要从事电磁兼容、快速暂态过电压、暂态地电位升研究(通信作者)(E-mail:1075905408@qq.com)。