

DOI:10.12158/j.2096-3203.2021.06.017

基于 SWT 的 GIS 电压互感器二次侧干扰分析

吴贤强¹, 邹志杨², 颜伟¹, 周华良², 刘兴发³

(1. 南京师范大学电气与自动化工程学院, 江苏 南京 210046;

2. 南瑞集团有限公司, 江苏 南京 211106; 3. 中国电力科学研究院有限公司武汉分院电网环境保护国家重点实验室, 湖北 武汉 430000)

摘要:特快速暂态过电压(VFTO)是气体绝缘变电站(GIS)中切换隔离开关时产生的特殊电磁暂态现象。VFTO会以传导和辐射方式影响二次设备的正常运行。为探究VFTO对二次设备的干扰特性,文中采用自制的二次侧干扰测量装置对某1 000 kV GIS的电压互感器(PT)二次侧共模干扰进行现场实测。接着,对比了5种时频分析方法的性能,采用其中性能较优的同步压缩小波变换(SWT)对实测波形进行了时频分析。实测结果表明:PT二次侧的共模干扰电压峰值最高可达9.65 kV。微脉冲的时频分析结果表明:7.8 MHz频率分量幅值高,且贯穿波形的始终,是PT二次侧干扰的主导频率分量。该分析结果可为GIS中二次设备的电磁抗扰度测试和电磁防护设计提供参考。

关键词:气体绝缘变电站(GIS);特快速暂态过电压(VFTO);电压互感器(PT);隔离开关;同步压缩小波变换(SWT);时频特性

中图分类号:TM723

文献标志码:A

文章编号:2096-3203(2021)06-0134-07

0 引言

与传统的空气绝缘变电站相比,气体绝缘变电站(gas insulated substation, GIS)占地面积小、运行安全、维护可靠,广泛应用于高压输电网络^[1-2]。通常在开合隔离开关时母线上会产生特快速暂态过电压(very fast transient overvoltage, VFTO)^[3-5]。VFTO一般分为内部VFTO和外部VFTO,前者对一次设备的绝缘设计提出了挑战^[6-7];后者通过辐射、传导、暂态壳体电压、地电位升等方式对二次线缆及其所连接的二次设备造成影响,是影响变电站特别是变电站就地化保护装置电磁兼容性设计的关键因素^[8]。

随着智能变电站的不断推进发展,二次设备逐渐集中,形成就地化保护装置^[9]。采用就地化保护后,二次设备离骚扰源更近,面临的电磁干扰问题也更加严重,已发生多起由电磁干扰引发的电子式互感器故障^[10]。目前对VFTO所引起的二次电缆和二次设备的电磁干扰问题建立了传导和辐射的模型^[11-12],但是对于此类二次侧电磁干扰的特性研究仍处于实测和仿真阶段^[13],对二次设备的电磁兼容测试没有明确的标准。因此有必要对二次侧干扰的频谱特性进行深入研究,在时频域范围内阐述二次侧干扰电压波形的特性。研究成果对二次侧

干扰的数学计算模型建立、二次设备电磁兼容测试和电磁兼容防护设计具有重要意义。

VFTO波形具有非平稳特性,传统的傅里叶变换因无法反映频率分量随时间变化的特征而不再适用于求解VFTO的频谱^[14]。文献[15]对几种时频变换的方法进行对比,最后采用广义S变换(generalized S transform, GST)得到了VFTO时频谱。由于二次设备所受到的电磁干扰是VFTO通过传导和辐射造成的,因此同样具有非平稳特性,但针对二次侧干扰的频谱分析研究目前仍停留在快速傅里叶变换(fast Fourier transform, FFT)和短时傅里叶变换(short-time Fourier transform, STFT)分析阶段^[16]。目前缺乏性能更好、时频聚集性更强的时频分析方法来获得二次侧干扰准确的时频谱。

针对上述不足,文中采用同步压缩小波变换(synchronous compression wavelet transform, SWT)时频分析方法对1 000 kV GIS电压互感器(potential transformer, PT)二次侧干扰进行分析。首先采用自制的电磁瞬态测量系统对某1 000 kV GIS就地化保护装置PT二次侧端口上的共模骚扰电压进行了测量与分析。其次利用STFT、连续小波变换(continuous wavelet transform, CWT)、SWT、S变换(S transform, ST)和GST共5种时频分析方法分析合成的具有二次侧干扰特征的波形,并对比其性能。最后采用SWT分别对隔离开关合闸和分闸时的PT二次侧干扰进行时频分析。

收稿日期:2021-05-09;修回日期:2021-07-12

基金项目:江苏省重点研发计划资助项目(BE2019716)

1 PT 二次侧干扰的测量

PT 与 GIS 母线直接关联, VFTO 主要通过传导方式对 PT 的二次侧产生共模干扰, PT 二次侧的干扰通常是最为严重也是最有代表性的二次侧干扰。

文中自制一个专用的二次侧干扰电压测量系统, 主要由衰减器、示波器、锂电池、逆变器、屏蔽箱、光纤通信系统组成。测量装置的具体构成如图 1 所示。锂电池和逆变器组成了示波器可靠稳定且无电磁干扰的供电电源。衰减器将输入干扰电压衰减了 1 000 倍, 防止可能输入的高压对后端测量电路造成损坏。屏蔽箱的引入可以使测量系统免受一次设备所引发的辐射干扰, 从而对 PT 二次侧干扰进行更为准确的测量。测量结果在屏蔽箱内进行光电转换, 通过光纤传输到位于屏蔽室中的计算机上。测量系统中各组件的性能如表 1 所示。

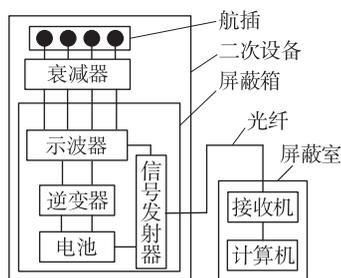


图 1 测量装置示意

Fig. 1 Schematic diagram of measuring device

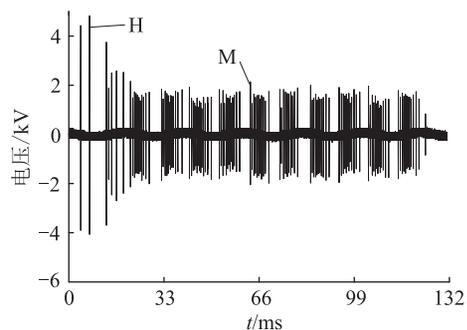
表 1 测量系统中示波器和衰减器的性能参数

Table 1 Performance parameters of oscilloscope and attenuator in measurement system

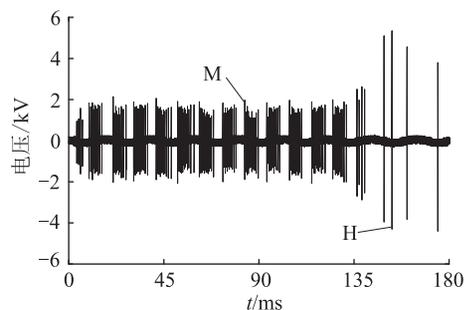
设备	型号	性能参数
示波器	Yokogawa DLM2054	采样率 2.5 GS/s, 带宽 500 MHz
衰减器	JUJUN K1000	带宽 100 MHz, 衰减率 60 dB

文中测量了隔离开关在开合空载母线时就地化保护装置 PT 二次侧输入的共模骚扰电压, 包含 PT 二次侧的芯线对就地化保护装置的接地铜排的共模骚扰电压。共进行 6 次分合隔离开关测试, 得到典型的测量波形如图 2 所示, 其中 H 和 M 分别为宏脉冲群中最高幅值和较低幅值的微脉冲。文献 [17] 指出: 一次开关操作全过程所产生的瞬态干扰以脉冲群的形式出现, 称为宏脉冲, 组成宏脉冲的独立脉冲称为微脉冲。对于测量结果中的工频分量文中不作讨论, 只关注产生干扰脉冲的暂态过程。

对隔离开关进行合闸操作和分闸操作时 PT 二次侧产生的宏脉冲分别如图 2(a) 和图 2(b) 所示。可以看出微脉冲间的时间间距不等, 脉冲出现的最大频率约为 1 kHz, 整个干扰的持续时间约为 120 ~



(a) 隔离开关合闸时 PT 二次侧干扰宏脉冲波形



(b) 隔离开关分闸时 PT 二次侧干扰宏脉冲波形

图 2 隔离开关操作时 PT 二次侧干扰宏脉冲波形

Fig. 2 PT secondary side interference macro pulse waveforms during isolation switch operation

170 ms, 微脉冲峰峰值最高约为 9.65 kV。对比图 2(a) 和图 2(b) 可知, 随着隔离开关逐渐合闸, 触头间隙逐渐减小, 隔离开关触头间的击穿电压不断降低, 微脉冲的峰峰值逐渐减小至 0。对隔离开关进行分闸操作时, 这种情况正好相反。

隔离开关操作时的 PT 二次侧干扰微脉冲波形如图 3 所示, 微脉冲波形近似阻尼振荡波。图 4 为隔离开关操作时 PT 二次侧微脉冲 FFT 对比, 可以看出, PT 二次侧干扰脉冲幅值高并且频率分量丰富。频率分量主要处于 1~100 MHz, 文中测得的 PT 二次侧干扰主频为 7.8 MHz。当隔离开关合闸开关间隙较大时, 需要更高的击穿电压。此时对应的 PT 二次侧干扰首脉冲幅值最高, 图 4(a) 对比傅里叶频谱可知幅值较高处微脉冲的频率分量相对于幅值较低处微脉冲的频率分量更为丰富。通过图 4(b) 对比合闸时 PT 二次侧干扰的傅里叶频谱可知, 隔离开关分闸过程中触头间隙较大时产生的 PT 二次侧干扰幅值高, 频率也更丰富。

2 SWT

由于 FFT 只能从整体上描述 PT 二次侧干扰电压波形所包含的频率成分, 无法反映波形中各频率分量随时间变化的特性。因此需要采用对分析此类波形性能较好的时频分析方法提取二次侧干扰信号的时频特征, 从时频域范围内揭示二次侧干扰

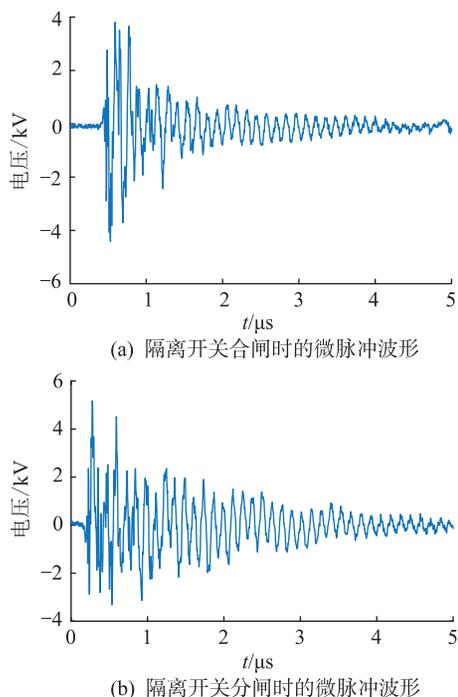


图3 隔离开关操作时 PT 二次侧干扰微脉冲波形
Fig.3 PT secondary side interference micro pulse waveforms during isolating switch operation

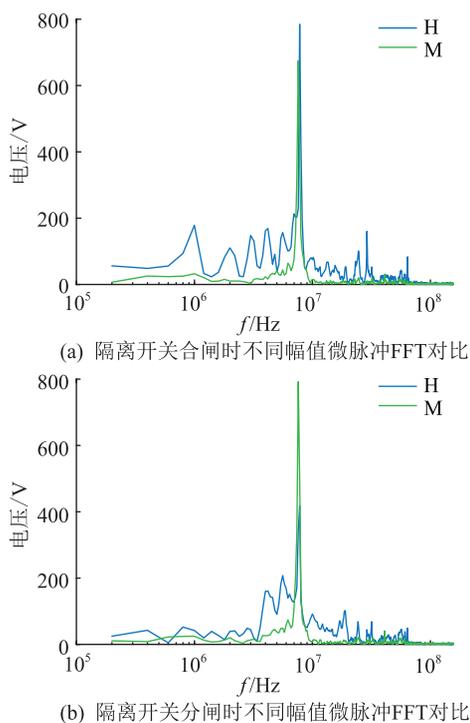


图4 隔离开关操作时 PT 二次侧微脉冲 FFT 对比
Fig.4 Comparison of PT secondary side micro pulse FFT during isolation switch operation

的机理特性。

对于线性时频变换,受不确定性原理的约束,时间分辨率 Δt 和频率分辨率 Δf 是一对矛盾体^[18]。其中任一分辨率的提高都会引起另一分辨率的下降。文中将 STFT、CWT、ST、GST 和 SWT 共 5 种时

频分析算法就其分析二次侧干扰的性能情况进行了对比,选择其中性能较优的时频分析方法对二次侧干扰波形进行时频分析,期望得到更为准确的二次侧干扰时频谱。STFT、CWT、ST、GST 等时频变换已经被广泛运用于很多领域^[19-22]。具体算法原理可以参考文献[23],文中不赘述。

SWT^[24]以 CWT 为基础,压缩频率域上所有的频率成分,从而提高频率分辨率,消除交叉项,同时在尺度域上减少能量扩散,提高时频分布的聚集程度,更为清晰地显示时频分析结果。

对信号 $x(t)$ 进行连续小波变换,定义为:

$$W_x(a, b; \varphi) = \int_{-\infty}^{\infty} x(t) \varphi_{a,b}(t) dt \quad (1)$$

式中: a 为尺度因子; b 为时间平移因子。函数族 $\varphi_{a,b}(t)$ 由基本小波函数 $\varphi(t)$ 通过平移和伸缩产生。

$$\varphi_{a,b}(t) = \frac{1}{\sqrt{|a|}} \varphi\left(\frac{t-b}{a}\right) \quad (2)$$

利用小波变换得到的小波系数 $W_x(a, b; \varphi)$, 求瞬时频率 $\omega_x(a, b)$, 可表示为:

$$\omega_x(a, b) = \frac{-i}{2\pi W_x(a, b; \varphi)} \frac{\partial W_x(a, b; \varphi)}{\partial b} \quad (3)$$

上式可将时间-尺度平面转换到时间-频率平面 $(b, \omega_x(a, b))$ 。此时可将任意频率 ω_1 周围区间 $[\omega_1 - \Delta\omega/2, \omega_1 + \Delta\omega/2]$ 的值压缩到 ω_1 上, 提高时频分辨率, 达到同步压缩变换的目的, 同步压缩变换可表示为:

$$T_x(\omega_1, b) = \frac{1}{\Delta\omega} \sum_c W_x(a, b; \varphi) a_k^{-\frac{3}{2}} \Delta a_k \quad (4)$$

其中 c 为:

$$|\omega_x(a, b) - \omega_1| < \frac{\Delta\omega}{2} \quad (5)$$

式中: a_k 为离散的尺度; k 为尺度的个数。

3 时频分析方法性能对比

由于实测波形的频谱特征在频域和时域具有未知性,无法作为测试波形去判断时频分析算法的时频聚集性。文献[25]通过构造时频特性已知的波形作为测试波形来验证时频分析方法的性能。因此文中采用具有二次侧干扰波形特征的合成信号来测试上述几种时频分析算法的性能。

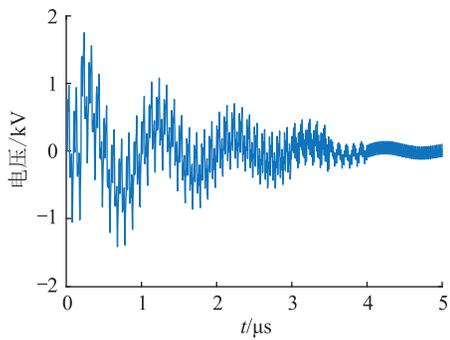
由图 3 可知,PT 二次侧干扰信号是一个不断衰减的振荡波形,因此在构建具有该波形特征的合成信号时采用的是阻尼振荡波的数学模型。考虑到实际的 PT 二次侧干扰存在不同频率分量,合成信号采用多种频率的阻尼振荡波叠加。文中构造时

间 t 从 $0 \mu\text{s}$ 到 $5 \mu\text{s}$ 的信号波形表达式为:

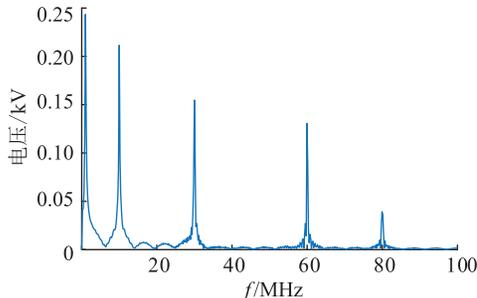
$$y(t) = \sum_{i=1}^5 y_i \quad 5 > t > 0 \quad (6)$$

$$\begin{cases} y_1 = e^{-7 \times 10^5 t} \sin(2 \times 10^6 \pi t) & 5 > t > 0.2 \\ y_2 = 0.6 e^{-5 \times 10^5 t} \sin(2 \times 10^7 \pi t) & 4 > t > 0 \\ y_3 = 0.4 e^{-3 \times 10^5 t} \sin(6 \times 10^7 \pi t) & 3 > t > 0.03 \\ y_4 = 0.2 \sin(1.2 \times 10^8 \pi t) & 3.5 > t > 0.02 \\ y_5 = 0.1 \cos(1.6 \times 10^8 \pi t) & 5 > t > 3 \end{cases} \quad (7)$$

各频率分量的表达式以及存在的时间如式(6)、式(7)所示。合成信号的波形如图 5(a)所示,波形的采样频率为 200 MHz,总体上是一个衰减的振荡波形。其频谱如图 5(b)所示,横坐标采用线性坐标,包含 1 MHz, 10 MHz, 30 MHz, 60 MHz 和 80 MHz 共 5 个频率分量。



(a) 二次干扰合成信号波形



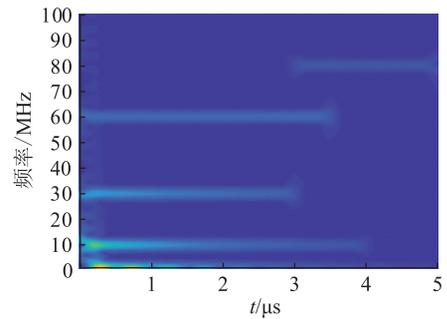
(b) 二次侧干扰合成信号频谱

图 5 PT 二次侧干扰合成信号及频谱

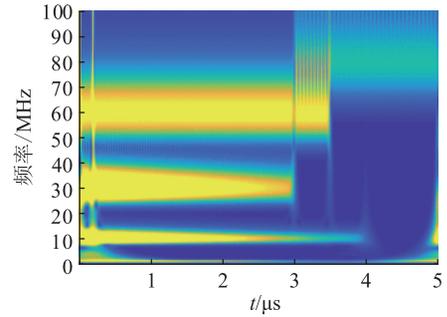
Fig.5 PT secondary side interference synthesis signal and spectrum

对合成的 PT 二次侧干扰信号采用上述 5 种时频分析算法进行分析,结果如图 6 所示。通过结果中的时频分辨率来判断各时频算法的性能。时频聚集性越强,越适合分析 PT 二次侧干扰。

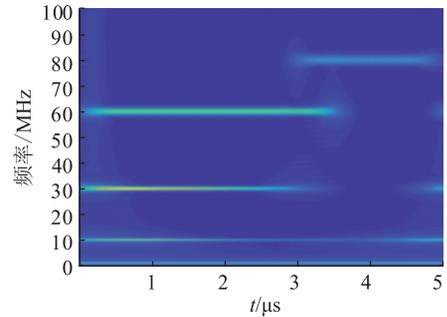
图 6(a)为 STFT 时频分析结果,由于 STFT 通过调节窗函数的宽度来调节时频分辨率,窗函数越宽时间分辨率越低,频率分辨率越高。文中通过调节窗函数的宽度,发现当海明窗取 100 时,时频分辨率效果最优,窗函数确定以后,只能以一种固定分辨



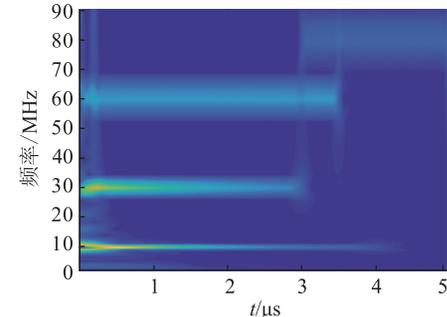
(a) STFT



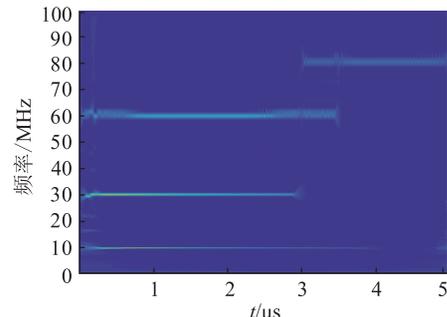
(b) ST



(c) GST



(d) CWT



(e) SWT

图 6 5 种时频变换方法得到的合成信号时频谱

Fig.6 Time-frequency spectrum of synthetic signal obtained by five time-frequency transformation methods

率进行时频分析,无法兼顾高频信息和低频信息。

图 6(b)为 ST 时频分析结果,求解的频率对其时频分辨率影响很大。可以看出在低频段 1 MHz 和 10 MHz 时间分辨率和频率分辨率较高,越往高频处频率分辨率越低,时间分辨率越高。

图 6(c)为 GST 时频分析结果,GST 是基于 ST 提出的时频分析方法,通过调节因子 λ 对时频分辨率进行调节。对调节因子进行多次调试,发现调节因子为 0.5 时,所得到的结果较好。在低频段 10 MHz 调节因子的取值显得较大,导致其时间分辨率出现偏差,未能准确停止在 4 μs 处。在其他频段调节因子的取值较为合适,时频分辨率均较高。

图 6(d)为 CWT 时频分析结果,选用 Morlet 小波作为母函数,从图中可以看出在低频段时间分辨率较低,频率分辨率较高,高频段的时频分辨率与低频段正好相反。

图 6(e)为 SWT 时频分析结果。作为 CWT 的集成和发展,SWT 具有更高的时频分辨率,并且在尺度域上可以减少能量扩散,提高时频分布的聚集程度。文中 SWT 选取 bump 小波作为母函数。低频段频率分辨率很高,时间分辨率略低。高频段时频分辨率均较高。从图 6(d)、图 6(e)可见,SWT、CWT 均存在 1 MHz 处显示不清楚的缺陷。总体来说,对比以上时频分析的结果,SWT 的时频聚集性明显高于 STFT、CWT、ST 和 GST 的时频聚集性。

4 实测波形的 SWT 分析

SWT 可以压缩频率域上所有的频率成分,从而提高频率分辨率,消除交叉项,由上述分析结果可知 SWT 相对于其他所提到的时频变换方法具有更强的时频聚集性。采用 SWT 对隔离开关合闸分闸时宏脉冲中幅值最高的微脉冲波形进行时频分析,结果如图 7 所示。

由图 7 可知隔离开关合闸和分闸时的 PT 二次侧干扰频率丰富,并且各频率分量的持续时间都不相同,说明 VFTO 引发的 PT 二次侧干扰确实具有非平稳特性。

图 7(a) 中隔离开关合闸时 7.8 MHz 频率分量持续时间贯穿波形的始终,是二次侧干扰的主导频率分量。其他频率分量例如 20 MHz, 25 MHz, 30 MHz, 65 MHz 在波形发生后幅值就开始迅速衰减,持续时间不一,最长仅约为 7.8 MHz 频率分量持续时间的一半。7.8 MHz 以下的低频段频率分量幅值较小,波形的持续时间约为 2 μs 。

图 7(b) 中隔离开关分闸时 7.8 MHz 频率分量

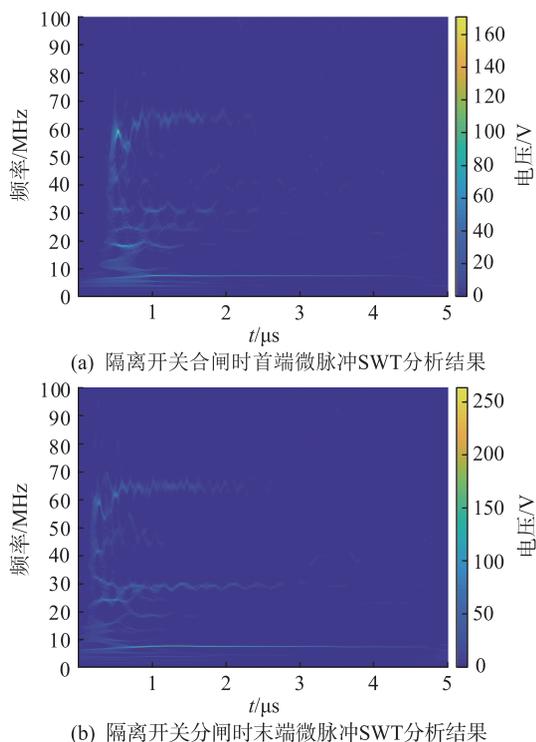


图 7 隔离开关操作时 PT 二次侧微脉冲的 SWT 分析结果
Fig.7 SWT analysis results of PT secondary side micro-pulse during isolation switch operation

依旧是主导频率分量。分闸时的频率分量主要集中在 7.8 MHz, 30 MHz, 65 MHz, 7.8 MHz 以下的低频部分。

对比图 7(a) 和 (b) 可知,在进行隔离开关合闸操作时 PT 二次侧干扰频率更为丰富,并且在干扰发生的初期,非主频分量的幅值相较于分闸操作时 PT 二次侧干扰非主频分量的幅值更高。

5 结论

文中针对 GIS 中 VFTO 对二次设备和二次线缆的电磁干扰问题,对 GIS 的 PT 二次侧的干扰进行现场实测与分析,结论如下:

- (1) 文中测得的 PT 二次侧干扰脉冲最大频率约为 1 kHz,整个干扰的持续时间约为 120~170 ms。微脉冲峰值最高约为 9.65 kV。单个微脉冲的频率分量丰富,主要处于 1~100 MHz 之间。微脉冲幅值越高,频率分量越丰富。
- (2) 对比不同时频分析方法的结果可知,SWT 更能够准确反映各频率分量随时间变化的特性,适合分析 VFTO 所引发的 PT 二次侧干扰。
- (3) SWT 对文中测得的 PT 二次侧干扰的微脉冲进行时频分析的结果表明:7.8 MHz 频率分量幅值高且贯穿波形的始终,是二次侧干扰的主导频率分量。其他频率分量在波形发生后幅值就开始迅

速衰减,持续时间不一,最长仅约为7.8 MHz 频率分量持续时间的一半。

本文得到南京市国际产业技术研发合作项目(201911021),电网环境保护国家重点实验室开放基金项目(GYW51202001558)资助,谨此致谢!

参考文献:

- [1] 陈明,马宏忠,潘信诚,等. 基于S变换和遗传算法优化SVM的GIS机械故障诊断[J]. 电力信息与通信技术,2020,18(5):1-6.
CHEN Ming, MA Hongzhong, PAN Xincheng, et al. GIS mechanical fault diagnosis based on S-transform and SVM optimized by genetic algorithm[J]. Electric Power Information and Communication Technology, 2020, 18(5):1-6.
- [2] BOLIN P, KOCH H. Introduction and applications of gas insulated substation (GIS) [C]//IEEE Power Engineering Society General Meeting. San Francisco, CA, USA. IEEE, 2005: 920-926.
- [3] KUMAR V V, THOMAS J M, NAIDU M S. Influence of switching conditions on the VFTO magnitudes in a GIS [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2001, 16(4): 539-544.
- [4] 赵军,陈维江,张建功. 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. VFTO calculation method considering radiation loss of bushing conductor[J]. Chinese Society for Electrical Engineering, 2016, 36(13): 3692-3698.
- [5] OKABE S, TAKAMI J, NOJIMA K. Circuit models of gas insulated switchgear elements for electromagnetic wave leakage analysis[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2008, 15(5): 1439-1448.
- [6] 杨玥坪,何聪,李军浩. 工频恒定电压下SF₆气体中沿面放电发展过程研究[J]. 电力工程技术, 2020, 39(1): 145-150.
YANG Yueping, HE Cong, LI Junhao. Development process of surface discharge in the SF₆ gas under constant voltage of power frequency[J]. Electric Power Engineering Technology, 2020, 39(1): 145-150.
- [7] 高旭泽,段然,谭笑. 振荡冲击及交流电压下绝缘子表面金属微粒放电特性研究[J]. 电力工程技术, 2019, 38(5): 147-156.
GAO Xuze, DUAN Ran, TAN Xiao. Discharge characteristics of metal particles on insulator surface under oscillation impulse and AC voltage[J]. Electric Power Engineering Technology, 2019, 38(5): 147-156.
- [8] 赵军,陈维江,张建功,等. 智能变电站二次设备对开关瞬态的电磁兼容抗扰度要求分析[J]. 高电压技术, 2015, 41(5): 1687-1695.
ZHAO Jun, CHEN Weijiang, ZHANG Jiangong, et al. Analysis on electromagnetic compatibility immunity requirements for secondary equipment during switching transient operations in intelligent substation[J]. High Voltage Engineering, 2015, 41(5): 1687-1695.
- [9] 王风光,杜兴伟,吕航,等. 就地化母线保护在电力系统中的应用[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(7): 155-161.
WANG Fengguang, DU Xingwei, LYU Hang, et al. Application of local busbar protection in power system [J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(7): 155-161.
- [10] 童悦,张勤,叶国雄,等. 电子式互感器电磁兼容性分析[J]. 高电压技术, 2013, 39(11): 2829-2835.
TONG Yue, ZHANG Qin, YE Guoxiong, et al. Electromagnetic compatibility performance of electronic transformers [J]. High Voltage Engineering, 2013, 39(11): 2829-2835.
- [11] CAI Y J, GUAN Y G, LIU W D, et al. Study of transient enclosure voltage coupling to secondary cables in a gas-insulated substation [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2018, 33(2): 761-768.
- [12] 张卫东,陈沛龙,陈维江,等. 特高压GIS变电站VFTO对二次电缆骚扰电压的实测与仿真[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(16): 187-196, 2.
ZHANG Weidong, CHEN Peilong, CHEN Weijiang, et al. Measurement and simulation of disturbance voltage generated by VFTO in UHV GIS substation on the secondary cables [J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(16): 187-196, 2.
- [13] HU R, CUI X, ZHANG W D, et al. Transient Enclosure Voltage (TEV) measurement system of UHV GIS and TEV statistical characterization [C]//International Symposium on Electromagnetic Compatibility Rome, Italy. IEEE, 2012: 1-6.
- [14] 康兵,舒乃秋,关向雨,等. 基于广义S变换的特快速暂态过电压频谱特性及其影响因素分析[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(15): 3988-3996.
KANG Bing, SHU Naiqiu, GUAN Xiangyu, et al. Analysis of very fast transient overvoltage frequency spectrum characteristics and their influence factors based on generalized S transform [J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(15): 3988-3996.
- [15] 康兵,关向雨,舒乃秋,等. 几种时频分析方法在VFTO频谱分析中的应用[J]. 高电压技术, 2015, 41(2): 680-686.
KANG Bing, GUAN Xiangyu, SHU Naiqiu, et al. Several time-frequency analysis methods applied in spectral analysis of VFTO [J]. High Voltage Engineering, 2015, 41(2): 680-686.
- [16] 嵇建飞,袁宇波,庞福滨. 智能变电站就地智能设备电磁兼容抗扰度实验分析[J]. 电工技术学报, 2014, 29(S1): 454-462.
JI Jianfei, YUAN Yubo, PANG Fubin. Experimental analysis of EMC immunity for field installed intelligent equipment of intelligent substation [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2014, 29(S1): 454-462.
- [17] 刘骁繁,崔翔,吴恒天,等. 500 kV 气体绝缘变电站开关操作对智能组件电流互感器端口电磁骚扰的实测及分析[J]. 高电压技术, 2015, 41(5): 1709-1718.
LIU Xiaofan, CUI Xiang, WU Hengtian, et al. Measurement and analysis on electromagnetic disturbance of intelligent electronic device current transformer ports due to switching operations in a 500 kV gas insulated substation [J]. High Voltage Engineering, 2015, 41(5): 1709-1718.

- [18] BOASHASH B. Time frequency signal analysis and processing: a comprehensive reference[M]. Brisbane, Australia; Elsevier Science & Technology Books, 2003: 41-42.
- [19] 马嘉秀,徐玮浓,何复兴,等. 基于 WT 和 SVM 的电能质量分类识别方法[J]. 智慧电力, 2019, 47(3):16-22, 37.
MA Jiaxiu, XU Weinong, HE Fuxing, et al. A novel power quality classification and identification method based on WT and SVM[J]. Smart Power, 2019, 47(3):16-22, 37.
- [20] 孙浩飞,吕新良,琚泽立,等. 基于小波变换和嵌入式零树编码的电力录波有损压缩应用[J]. 电网与清洁能源, 2020, 36(6):31-38.
SUN haofei, LYU Xinliang, JU Zeli, et al. Application of power disturbance data compression based on wavelet transform and EZW coding[J]. Power System and Clean Energy, 2020, 36(6):31-38.
- [21] 甄永赞,杨荆宜,张冰. 基于小波变换的直流线路行波保护采样数值稳定性研究[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(9):42-48.
ZHEN Yongzan, YANG Jingyi, ZHANG Bing. Study on numerical sampling stability of traveling wave protection based on wavelet transform [J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(9):42-48.
- [22] 李振春,刁瑞,韩文功,等. 线性时频分析方法综述[J]. 勘探地球物理进展, 2010, 33(4):239-246, 227.
LI Zhenchun, DIAO Rui, HAN Wengong, et al. Review on linear time-frequency analysis methods[J]. Progress in Exploration Geophysics, 2010, 33(4):239-246, 227.
- [23] MERTINS A, MERTINS D A. Signal analysis: wavelets, filter banks, time-frequency transforms and applications[M]. Chichester: John Wiley & Sons, Inc, 1999.
- [24] DAUBECHIES I, LU J F, WU H T. Synchrosqueezed wavelet transforms: an empirical mode decomposition-like tool[J]. Applied and Computational Harmonic Analysis, 2011, 30(2):243-261.
- [25] 刘世明,李帅,谈翀,等. 基于 NSTFT-WVD 变换的 VFTO 频谱分析方法[J]. 华北电力大学学报(自然科学版), 2018, 45(5):52-61.
LIU Shiming, LI Shuai, TAN Chong, et al. Spectral analysis method of VFTO based on NSTFT-WVD transform[J]. Journal of North China Electric Power University (Natural Science Edition), 2018, 45(5):52-61.

作者简介:



吴贤强

吴贤强(1996),男,硕士在读,研究方向为 GIS 变电站的电磁兼容(E-mail:1127532626@qq.com);

邹志杨(1980),男,硕士,高级工程师,从事继电保护设备的电磁兼容相关工作;

颜伟(1987),男,博士,副教授,研究方向为电气设备和集成电路的电磁兼容。

PT secondary interference of GIS based on synchronous compression wavelet transform

WU Xianqiang¹, ZOU Zhiyang², YAN Wei¹, ZHOU Hualiang², LIU Xingfa³

(1. School of Electrical and Automation Engineering, Nanjing Normal University, Nanjing 210046, China;

2. NARI Group Co., Ltd., Nanjing 211106, China; 3. State Key Laboratory of Grid Environmental Protection,

Wuhan Branch of China Electric Power Research Institute Co., Ltd., Wuhan 430000, China)

Abstract: Very fast transient overvoltage (VFTO) is a special electromagnetic transient phenomenon when the isolation switch is switched in a gas insulated substation (GIS). VFTO affects the normal behavior of secondary equipments through conduction and radiation. In order to explore the interference characteristics of VFTO on secondary equipments, a self-made interference measuring device is used in this paper to conduct field measurement of the common mode interference on the secondary side of the potential transformer (PT) in 1 000 kV GIS. Secondly, the performances of five time-frequency analysis methods are compared, and the time-frequency analysis of the measured waveforms is carried out using the synchronous compression wavelet transform with the better performance. The measured results in this paper show that the peak-to-peak voltage of common-mode interference voltage on the secondary side of PT reaches up to 9.65 kV. The time-frequency analysis results show that the 7.8 MHz frequency component has the highest amplitude, so it is the dominant frequency component of PT secondary side interference throughout the waveform. The results in this paper provide references for the electromagnetic immunity test and electromagnetic protection design of secondary equipment in GIS.

Keywords: gas insulated substation (GIS); very fast transient overvoltage (VFTO); potential transformer (PT); isolating switch; synchronous compression wavelet transform (SWT); time-frequency characteristics

(编辑 方晶)