

Remote Transmission SF₆ Density Relay in 1 000 kV UHV Based on Fractional-Order Butterworth Filter^{*}

LIU Chang^{*}, ZU Shutao, LI Guang, LIANG Lihui, GUO Shuai, LI Qiang
(State Grid Hebei Extra High Voltage Company, Shijiazhuang Hebei 050051, China)

Abstract: Due to the complex electromagnetic environment of 1 000 kV UHV equipment, the anti-interference ability of the remote transmission SF₆ density relay using the existing technology is poor. Therefore, the equipment information can not be accurately transmitted, which seriously affects the on-line monitoring of UHV equipment. In order to solve this problem, a new anti-interference remote transmission SF₆ density relay is designed by using fractional Butterworth filter. Results of the anti-interference test of 500 kV and 1 000 kV combined electrical appliances in three cases and the electromagnetic interference test in extreme special cases show that the remote SF₆ density relay using fractional Butterworth filter has a good maximum suppression multiple, verifying the effectiveness and comprehensiveness of this method.

Key words: UHV technology; SF₆ density relay; online monitoring; high anti-interference; fractional-order butterworth filter
EEACC: 1270F; 8150 doi: 10.3969/j.issn.1005-9490.2023.01.029

基于分数阶巴特沃斯滤波器的1 000 kV特高压 远传式SF₆密度继电器^{*}

刘畅^{*}, 祖树涛, 李光, 梁利辉, 郭帅, 李强
(国网河北省电力有限公司超高压分公司, 河北石家庄 050051)

摘要: 由于1 000 kV特高压设备所处电磁环境复杂, 采用现有技术的远传式SF₆密度继电器抗干扰能力差, 无法将设备信息准确远传, 严重影响特高压设备在线监测。为解决这一问题, 利用分数阶巴特沃斯滤波器设计了一种新型抗干扰远传式SF₆密度继电器。通过500 kV及1 000 kV两类组合电器在三种情况下抗干扰试验、极端特殊情况下的电磁干扰试验, 表明采用分数阶巴特沃斯滤波器的远传式SF₆密度继电器具有良好的最大抑制倍数, 验证了本文方法的有效性、全面性。

关键词: 特高压技术; SF₆密度继电器; 在线监测; 高抗干扰; 分数阶巴特沃斯滤波器

中图分类号: TM51

文献标识码: A

文章编号: 1005-9490(2023)01-0172-07

SF₆密度继电器用来检测高压电器设备中SF₆气体密度的变化情况, 其广泛用于SF₆断路器、互感器、避雷器、电容器、电缆等单一设备中, 也用于气体绝缘封闭式组合电器(Gas Insulated Switchgear, GIS)、插接式开关系统(Plug and Switch System, PASS)等组合电器设备中。

目前, 变电站中SF₆密度继电器信号通常采用RS232、485的有线传输方式, 其精度已达到0.005 MPa, 能够满足超特高压变电站中对于各类设备在线监测要求^[1-6]。随着无线传输技术的发展, 远传式SF₆密度继电器也逐渐应用在各个电压等级的变电站中。对于目前电压等级最高的1 000 kV

特高压变电站, 由于站内电磁环境比35 kV至500 kV变电站更为复杂、电磁强度也更大、干扰信号种类更多, 导致现有SF₆密度继电器信号远传技术在1 000 kV特高压变电站中应用效果一般, 远传式SF₆密度继电器抗干扰能力较差。

文献[7]研究了基于电力物联网NB-IOT无线通讯技术的SF₆密度继电器, 但由于设备所处电磁环境噪声复杂, 导致通过在线监测系统获取的SF₆气体密度数据并不准确。国外对于SF₆密度继电器研究主要侧重于有线传输以及不同温度条件下的适应性^[8]。目前, 国内外对SF₆密度继电器在1 000 kV特高压变电站中多电磁环境下的抗干扰性研究很少。

项目来源: 国家自然科学基金项目(51177048)

收稿日期: 2022-02-24

修改日期: 2022-06-29

为此,研究1 000 kV特高压变电站中数据准确的新型抗干扰远传式SF₆密度继电器对突破传统运检模式的信息获取方式、提升数据精准性、保证特高压电网安全稳定具有重要意义。

1 SF₆密度继电器

传统SF₆密度继电器是由带报警和闭锁触点的密度表或密度表与继电器合二为一组成,可以直观地监测SF₆气体的压力情况。当电器设备内的SF₆气体密度下降至压力报警值时,SF₆密度继电器发出报警信号;当电器设备内的SF₆气体密度下降至压力闭锁值时,SF₆密度继电器发出闭锁信号^[9]。

根据结构可将SF₆密度继电器分为I、II、III、IV型^[10-12]。其中I型SF₆密度继电器主要用于早期高压电气设备,由感温包、微动开关、杠杆及波纹管组成。其原理是设备工作于额定气压时杠杆平衡;当温度变化时两组波纹管气压等幅变化,实现温度补偿;当设备内SF₆漏气时波纹管压缩,发出报警信号;若补气不及时,会触发闭锁信号进而闭锁。其结构示意图如下所示。

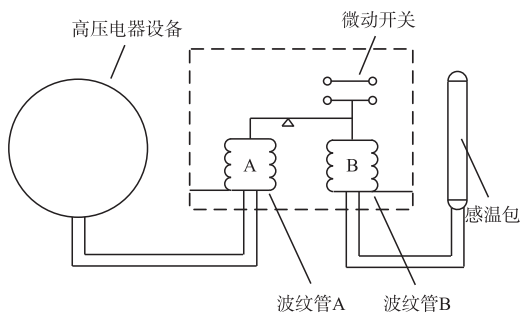


图1 I型SF₆密度继电器

I型继电器的感温包大多置于机构箱内,并且箱内与高压设备内部SF₆温度通常不等,造成继电器误报情况频繁发生。

II型密度继电器在I型的基础上,减少波纹管的个数,并配合SF₆真空压力表进行检测。但由于同样安装于机构箱内,误报情况仍然频繁发生。III和IV密度继电器将真空压力表与SF₆密度继电器进行组合,利用压力检测弹簧管检测设备内SF₆气体压力,利用膨胀系数不同的双金属片进行温度补偿,二者达到平衡,进而很大程度上减少了继电器的误报。但由于双金属片特性,对继电器精度有一定影响。IV型密度继电器在III型基础上加入温度补偿弹簧管,使得可靠性进一步提升。IV型密度继电器的结构示意图如下所示。

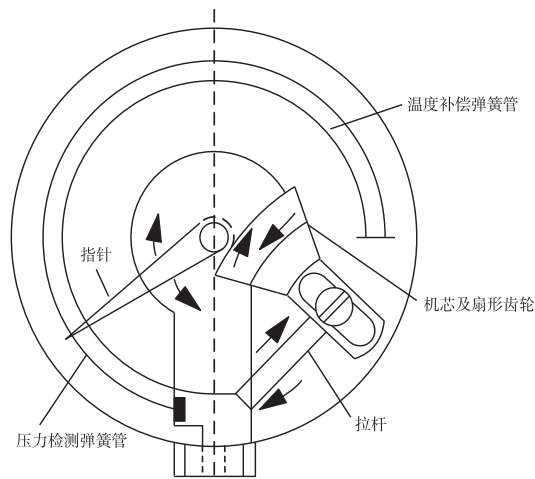


图2 IV型SF₆密度继电器

2 1 000 kV特高压变电站远传式SF₆密度继电器抗干扰分析

2.1 远传式SF₆密度继电器抗干扰分析

远传式SF₆密度继电器主要包括机械部分和电子远传部分。其中机械部分用于电气设备的SF₆气体密度进行机械指示,并不受电磁环境影响;电子远传部分用于将具体数据信号进行远传,易受电磁环境影响。

一方面,从干扰的传播源头及途径角度考虑,对于SF₆密度继电器,其重点在于抑制所处1 000 kV特高压变电站电磁环境中的干扰源、切断干扰传播途径以及提高器件自身的抗干扰性;另一方面,结合1 000 kV变电站复杂电磁环境,从抑制电磁环境中的干扰源角度研究要比切断传播途径及提高器件的抗干扰性效果更好、更直接。此外,在远传式SF₆密度继电器的电子远传部分中,电源占据非常重要的地位。1 000 kV变电站中的干扰主要通过电子远传部分、各类传感器的供电电源耦合进入。因此,本文主要从供电电源干扰这个重要方面出发,对远传式SF₆密度继电器进行研究。

2.2 传统供电电源噪声滤波抗干扰

在35 kV至500 kV电压等级变电站中,远传式SF₆密度继电器通常利用噪声滤波器对供电电源进行滤波。图3所示为供电电源抗干扰等效电路,图中 U_s 表示等效电源, P, N, P', N' 分别表示噪声滤波器的输入二端口、输出二端口, U_1, U_2, I_1, I_2 分别表

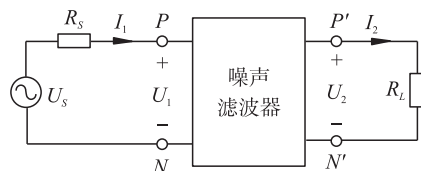


图3 供电电源抗干扰等效电路图

示噪声滤波器的输入、输出端口电压及输入、输出端口电流。图中电源输入端的正负接地电阻并入 R_s , 电源等效为一个负载 R_L 的噪声滤波电路。图 4 所示为噪声滤波器电路原理图, 其中 L_d 、 C_d 、 L_c 、 C_c 分别表示差模电感、差模电容、共模电感及共模电容。

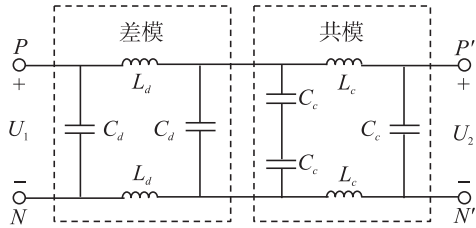


图 4 噪声滤波器电路原理图

在 1 000 kV 特高压变电站中, 利用传统噪声滤波器的方法效果甚微。图 5 所示为河北南网某 1 000 kV 特高压变电站中远传式 SF₆ 密度继电器利用传统噪声滤波器对供电电源进滤波与未采用传统噪声滤波器进行滤波的对比情况。

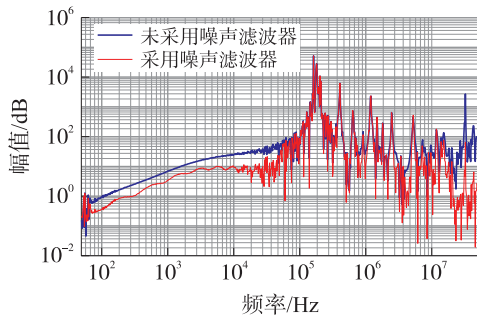


图 5 采用及未采用噪声滤波器现场对比情况

由图 5 可知, 1 000 kV 特高压变电站中采用传统噪声滤波方式的远传式 SF₆ 密度继电器在低频范围有一定效果, 但在高频区域内无法有效滤波。而 1 000 kV 特高压变电站中高频电磁干扰较多, 因此采用传统噪声滤波方式无法提高 1 000 kV 特高压变电站远传式 SF₆ 密度继电器抗干扰能力。

3 基于分数阶巴特沃斯滤波器的远传式 SF₆ 密度继电器抗干扰处理

随着分数阶电路系统的发展, 分数阶元件 (分数阶电感、分数阶电容、分数阶耦合电感等) 可以获得更多的电路特性及设计自由度^[13-17]。而分数阶滤波系统的应用范围更广, 通过选择合适的分数阶元件阶次, 可以在更加复杂电磁干扰情况下达到很好的滤波效果。

分数阶滤波器主要包括分数阶切比雪夫滤波器、分数阶巴特沃斯滤波器、分数阶卡尔曼滤波器等。而分数阶巴特沃斯滤波器具优良的频率特性,

即频率响应曲线在通带内, 在最大限度上是平坦, 并没有太多起伏, 而在阻频带则缓慢下降为零。并且具有良好的线性相位特性、实现简单、设计方便^[18]。低阶次分数阶巴特沃斯滤波器响应速度较快、超调量较小、稳定性较好, 高阶分数阶巴特沃斯低波器检波精度好^[19]。本文利用分数阶巴特沃斯滤波器对 1 000 kV 特高压变电站 SF₆ 密度继电器供电电源抗干扰进行研究。

分数阶巴特沃斯滤波器特征方程的幅值平方函数为 $|D(j\omega)|^2 = 1 + \varepsilon\omega_n^{2N}$, 其中 ω 表示频率, N 为正整数表示滤波器的阶数, ω_n 表示归一化频率, ε 表示通带的衰减。分数阶巴特沃斯滤波器的传递函数 $T(s)$ 如式(1)所示, 其中 $a, b, c, d > 0$ 为常数, α, β 为分数阶阶次并满足 $0 < \alpha, \beta \leq 2$ 。当 $s = j\omega$ 时, 传递函数的特征方程化简为式(2):

$$T(s) = \frac{d}{s^{\alpha+\beta} + as^{\alpha} + bs^{\beta} + c} \quad (1)$$

$$D(j\omega, \alpha, \beta) = A + jB \quad (2)$$

式中:

$$A = \omega^{\alpha+\beta} \cos \frac{(\alpha+\beta)\pi}{2} + a\omega^{\alpha} \cos \frac{\alpha\pi}{2} + b\omega^{\beta} \cos \frac{\beta\pi}{2} + c$$

$$B = \omega^{\alpha+\beta} \sin \frac{(\alpha+\beta)\pi}{2} + a\omega^{\alpha} \sin \frac{\alpha\pi}{2} + b\omega^{\beta} \sin \frac{\beta\pi}{2} + c \quad (3)$$

在 1 000 kV 特高压变电站 SF₆ 密度继电器供电电源输入端增加分数阶巴特沃斯滤波器, 其供电电源抗干扰等效电路图如图 6 所示。图中 U_s 表示等效电源, P, N, P', N' 分别表示分数阶巴特沃斯滤波器的输入二端口、输出二端口, U_1, U_2, I_1, I_2 分别表示分数阶巴特沃斯滤波器的输入、输出端口电压及输入、输出端口电流。其中, 电源输入端的正负接地电阻并入 R_s , 电源等效为一个负载 R_L 的分数阶滤波电路。

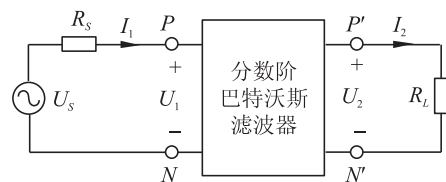


图 6 供电电源抗干扰等效电路图

分数阶巴特沃斯抗干扰滤波器的电路原理如图 7 所示, 其中分数阶电容 C_{α}, C_{β} 的阶次分别为 $\alpha, \beta, R_i (i = 1, 2, \dots, 6)$ 表示电阻, U_1, U_2 表示输入、输出电压。

根据图 7 的分数巴特沃斯抗干扰滤波器电路, 结合电网理论可以得到输出电压 U_2 如式(4)所示, 其中 ω 为干扰信号角频率。

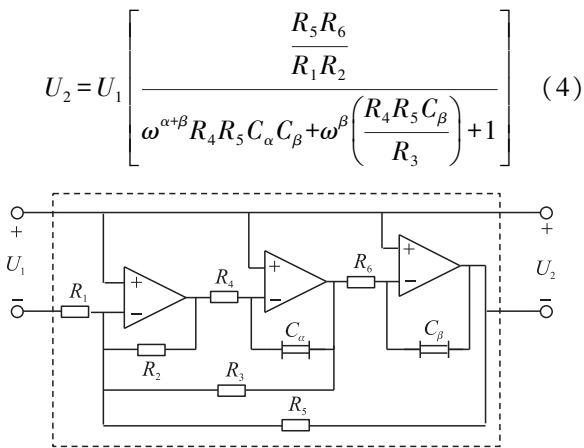


图 7 分数巴特沃斯抗干扰滤波器电路原理图

对传统噪声滤波器及分数阶巴特沃斯抗干扰滤波器分别施加频率 $\omega=50\text{ rad/s}$ 的正弦电压,通过仿真测量电源输入端端口电流。端口施加的正弦电压如图 8 所示,传统噪声滤波器及分数阶巴特沃斯抗干扰滤波器的响应特性分别如图 9 和图 10 所示。

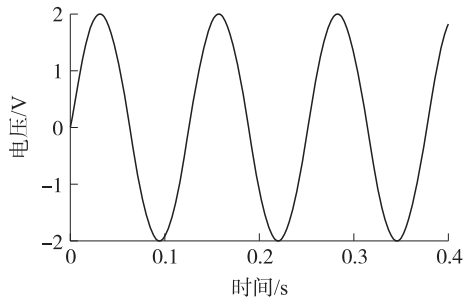


图 8 端口施加的正弦电压

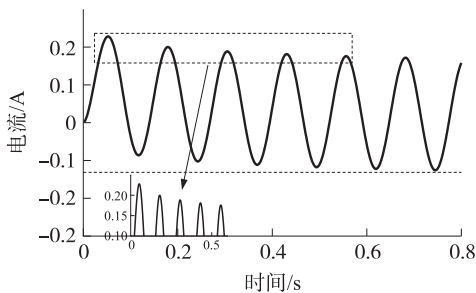


图 9 传统噪声滤波器响应特性

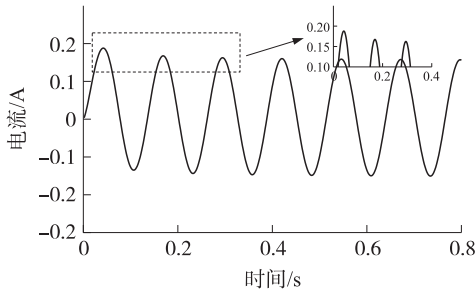


图 10 分数阶巴特沃斯滤波器响应特性

由图 9、图 10 可以得出,传统噪声滤波器的电源响应特性需要大约 5 个周期约 0.7 s 达到稳态,同时其波峰及波谷相差较大;相同条件下分数阶巴特

沃斯滤波器的电源响应特性仅需要 2 个周期约 0.2 s 达到稳态,同时其波峰及波谷相差很小。现场复杂电源环境下两种滤波器的电源响应特性之间差距更大,分数阶巴特沃斯滤波器更适合 1 000 kV 特高压变电站中复杂电磁环境下的电源抗干扰处理。

此外,给定相同输入信号,供电电源传统噪声抗干扰滤波与分数阶巴特沃斯抗干扰滤波的插入损耗如图 11 所示。由图可知,传统噪声抗干扰滤波的频率特性范围较窄(曲线斜率较小),分数阶巴特沃斯抗干扰滤波的频率特性范围较宽(曲线斜率较大)。传统噪声抗干扰滤波的衰减频率及通过频率的选择度较低,导致部分供电电源干扰无法彻底去除。分数阶巴特沃斯抗干扰滤波频率的选择度较高, SF₆ 密度、继电器压力或温度等数据采集传感器信号可以在衰减极少的状态下去除供电电源干扰。

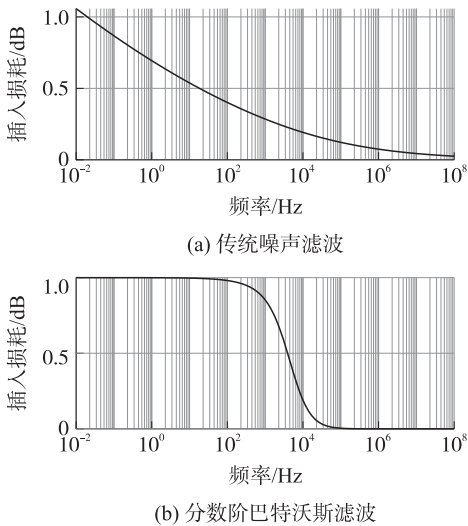


图 11 传统噪声滤波与分数阶巴特沃斯抗干扰滤波插入损耗对比

如表 1 所示,选取不同分数阶次,分数阶巴特沃斯抗干扰滤波器的插入损耗如图 12 所示。

表 1 分数阶巴特沃斯滤波器阶次

参数	数值		
	EX1 $\alpha=0.5$ $\beta=0.3$	EX2 $\alpha=0.7$ $\beta=0.5$	EX3 $\alpha=0.9$ $\beta=0.7$
C_{α}/F		0.261 μ	
C_{β}/F	203.4 μ	9.8 μ	0.823 μ
R_3/F	6 132	11.258 k	2.861 k
R_4/Ω	569.2	1 658.3	2 004.8
R_5/Ω	829.1	811.2	810.1
$R_1、R_2、R_6/\Omega$	1 000		

由图可知,随着阶次的升高,频率特性范围变大。采用分数阶巴特沃斯滤波器的供电电源抗干

扰,可以提高 1 000 kV 特高压变电站设备中 SF₆ 密度继电器的应用范围,即 SF₆ 密度继电器可以根据变电站中不同安装位置的电磁环境,选择适当的分数阶阶次来实现不同安装位置的 SF₆ 密度继电器供电电源抗干扰。

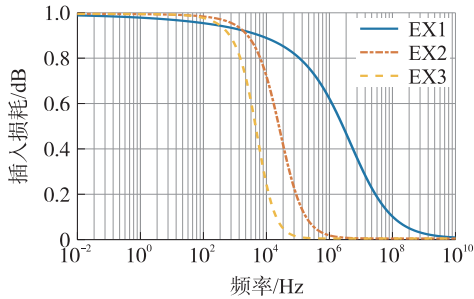


图 12 不同阶次分数阶巴特沃斯抗干扰滤波器插入损耗

对于表 1 所示三种阶次 0.3、0.5、0.7 的分数阶电容 C_β ,其电容值可以通过四阶整数阶电容、电阻组成的电路进行逼近实现,其等效电路图如图 13 所示。其中, α 表示分数阶电容阶次, R_a, R_b, R_c, R_d, R_e 表示电阻, C_b, C_c, C_d, C_e 表示整数阶电容。三种阶次及其电容值对应的四阶逼近电路参数如表 2 所示。

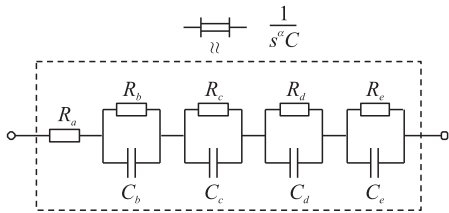


图 13 分数阶巴特沃斯抗干扰滤波器中分数阶电容逼近等效电路

表 2 分数阶电容与逼近等效电路对应参数

	$C_\beta = 203.4 \mu\text{F}$ $\beta = 0.2$	$C_\beta = 9.8 \mu\text{F}$ $\beta = 0.5$	$C_\beta = 0.823 \mu\text{F}$ $\beta = 0.7$
R_a/Ω	430.7	101.5	17.6
R_b/Ω	274.6	249.6	90.9
R_c/Ω	239.5	377.9	234.8
R_d/Ω	339.1	892.1	989.1
R_e/Ω	1022.1	7372.1	52.9k
C_b/F	54.2n	82.9n	299.8n
C_c/F	376.1n	298.2n	579.8n
C_d/F	1.109 μ	535.8n	633.9n
C_e/F	2.831 μ	632.5n	275.1n

4 1 000 kV 特高压变电站远传式 SF₆ 密度继电器抗干扰现场试验

基于分数阶巴特沃斯滤波器的远传式 SF₆ 密度继电器供电电源抗干扰核心部分如图 14 所示。所

设计的抗干扰核心部分充分结合 1 000 kV 特高压变电站 SF₆ 密度继电器的具体情况,采用三通阀的形式直接与现有 SF₆ 密度继电器进行安装。其安装便捷不需要对 1 000 kV 设备进行停电,有效保证了特高压设备安全稳定运行。

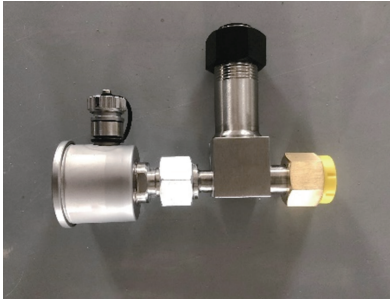


图 14 供电电源抗干扰核心部分

为了测试基于分数阶巴特沃斯滤波器的远传式 SF₆ 密度继电器供电电源抗干扰方面的可靠性,将样机安装于河北南网某 1 000 kV 特高压变电站中 500 kV、1 000 kV 两种电压等级的组合电器上。并与相同电磁环境下未安装滤波以及安装传统噪声滤波的 SF₆ 密度继电器进行对比。现场样机安装后的正面及侧面分别如图 15 和图 16 所示。

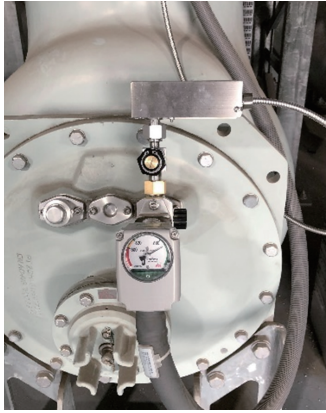


图 15 基于分数阶巴特沃斯滤波器的远传式 SF₆ 密度继电器现场安装正面

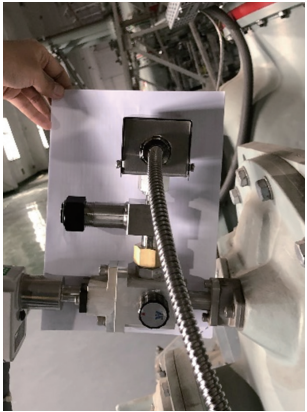


图 16 基于分数阶巴特沃斯滤波器的远传式 SF₆ 密度继电器现场安装侧面

采用分数阶巴特沃斯滤波器的 SF₆ 密度继电器与未安装滤波以及安装传统噪声滤波的 SF₆ 密度继电器在 500 kV 及 1 000 kV 组合电器设备上的供电电源抗干扰对比情况分别如图 17 和图 18 所示。

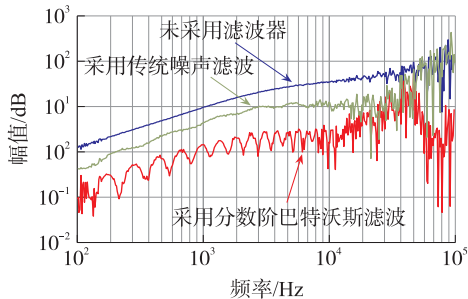


图 17 500 kV 组合电器供电电源抗干扰三种情况对比

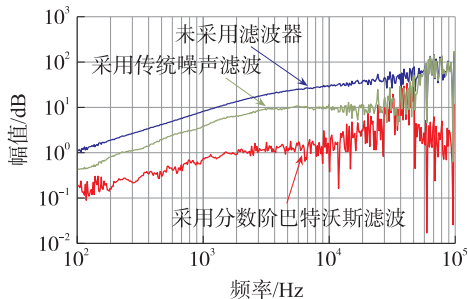


图 18 1 000 kV 组合电器供电电源抗干扰三种情况对比

通过 500 kV 及 1 000 kV 两类组合电器在三种情况(未采用滤波器、采用传统噪声滤波、采用分数阶巴特沃斯滤波器)下供电电源抗干扰试验,并利用 MATLAB 对试验数据进行最大抑制倍数计算,得到如表 3 所示对比情况。

表 3 两类设备在三种情况下最大抑制倍数对比情况

序号	对比项目	500 kV 组合电器	1 000 kV 组合电器
1	未采用滤波器与采用分数阶巴特沃斯滤波器	85 倍	206 倍
2	采用传统滤波器与采用分数阶巴特沃斯滤波器	8.8 倍	56 倍

通过试验数据计算可知

①与未采用滤波器的传统 SF₆ 密度继电器相比,采用分数阶巴特沃斯滤波器的 SF₆ 密度继电器可以在整个频带范围内抑制电网通过供电电源耦合进入的干扰,具有较好的最大抑制倍数。②与传统噪声滤波相比,采用分数阶巴特沃斯滤波器的 SF₆ 密度继电器在整个频带范围内表现出的供电电源抗干扰效果更优异。

此外,通过图 17、图 18 可以看出,对于 1 000 kV 特高压变电站中出现的 10⁴ Hz 至 10⁵ Hz 的高频区域,采用分数阶巴特沃斯滤波器可以显著降低通过

供电电源耦合进入 SF₆ 密度继电器的干扰。与 1 000 kV 以下电网电磁环境相比,1 000 kV 电网电磁环境更为复杂^[20],因此基于分数阶巴特沃斯滤波器的远传式 SF₆ 密度继电器也可应用于较低电压等级设备中。

此外,为了验证本文所研究成果的有效性、全面性,针对 1 000 kV 特高压变电站极端特殊情况下的电磁干扰情况,本文进行了如表 4 所示电磁干扰环境验证^[20-23]。

表 4 1 000 kV 特高压变电站远传式 SF₆ 密度继电器抗电磁干扰试验

序号	干扰试验项目	试验要求	试验条件	现场试验结果
1	射频电磁场辐射抗扰度	经受严酷等级为Ⅲ级的射频电磁场抗扰度试验,试验过程及试验后均能正常工作	频率:80 MHz 至 2 700 MHz 场强:10 V/m	符合要求
2	浪涌抗扰度	经受严酷等级为Ⅲ级的浪涌抗扰度试验,试验过程及试验后均能正常工作	电源线:2 kV 重复时间:1 脉冲/min	符合要求
3	电快速瞬变脉冲群抗扰度	经受严酷等级为Ⅲ级的电快速瞬变脉冲群抗扰度试验,试验过程中级试验后均能正常工作	电压(峰值):4 kV 脉冲持续时间:15 ms	符合要求
4	电压暂降、短时中断和电压变化抗扰度	经受严酷等级为 40% U _T 和 40% U _T 的电压暂降、短时中断和电压变化抗扰度试验,试验后能正常工作	电压暂降:40% U _T 和 40% U _T 短时中断(>1 s 时) 0 U _T 频率:0.15 至 0.5 MHz	符合要求

5 结论

本文基于分数阶巴特沃斯滤波器的远传式 SF₆ 密度继电器,解决了 1 000 kV 特高压复杂电磁环境下远传式 SF₆ 密度继电器供电电源抗干扰能力差的问题。通过未采用滤波器、采用传统噪声滤波器以及采用分数阶巴特沃斯滤波器三种情况进行现场试验比对,并在极端电磁干扰下进行试验,结果验证了本文研究成果的有效性和全面性。

参考文献:

[1] 王润华. SF₆ 气体监测系统在 GIS 组合电器中的应用[J]. 上海电力,2006,19(5):23-25.
[2] 习超群,邱曼曼,罗立波,等. 电接点密度继电器存在的主要问题及改进措施[J]. 高压电器,2017,53(6):

- 197-202.
- [3] 周启义,高明贵,贾凤鸣,等. 一种无油抗振型 SF₆ 气体密度继电器的研制[J]. 高压电器,2017,53(5):154-158.
- [4] 宋杲,李炜,宋竹生,等. 国网公司系统组合电器运行情况[J]. 高压电器,2009,45(6):78-82.
- [5] 国家能源局. DL/T 259-2012 六氟化硫气体密度继电器校验规程[S]. 北京:中国电力出版社,2012.
- [6] 钟世强,范明豪,许一力,等. 新型 GIS 用 SF₆ 密度在线监测装置研究[J]. 安徽电气工程职业技术学院学报,2019,24(1):1-6.
- [7] 颜晓东,李雪妍,刘传永,等. 基于泛在电力物联网 NB-IOT 无线通讯技术 SF₆ 压力远传系统的研发与应用[J]. 中国设备工程,2019,10(20):155-156.
- [8] Guan Y, Fu L. Research on Calibration Technology of SF₆ Gas Density Relay at Low Temperature [C]//2020 5th International Conference on Mechanical, Control and Computer Engineering, Harbin, China, 2020:540-543.
- [9] 中华人民共和国国家发展和改革委员会. JB/T 10549-2006 气体密度继电器和密度表通用技术条件[S]. 北京:机械工业出版社,2006.
- [10] 冯印富. SF₆ 密度表和密度继电器的结构及工作原理[J]. 农村电工,2011,19(3):31-32.
- [11] 路永玲,刘洋,胡成博,等. 基于 LoRa 的架空线路物联网感知技术研究[J]. 电气应用,2019,38(7):68-72.
- [12] 孙银山,尹军华,寇新民,等. SF₆ 密度继电器 RS-485 通信终端电阻匹配方法研究[J]. 电气自动化,2015,37(1):46-48.
- [13] 梁贵书,高世强. 油浸式变压器绕组分数阶传输线模型参数辨识的研究[J]. 华北电力大学学报(自然科学版),2016,43(5):1-7.
- [14] 刘欣,崔翔,梁贵书,等. 基于分数阶微分理论的宽频建模方法[J]. 电工技术学报,2013,28(4):20-27.
- [15] Wu C, Si G, Zhang Y, et al. The Fractional-Order State-Space Averaging Modeling of the Buck-Boost DC/DC Converter in Discontinuous Conduction Mode and the Performance Analysis [J]. Nonlinear Dynamics, 2015, 79(1):689-703.
- [16] Bertrand N, Sabatier J, Briat O, et al. Fractional Nonlinear Modelling of Ultracapacitors[J]. Communications in Nonlinear Science and Numerical Simulation, 2010, 15(5):1327-1337.
- [17] Nakagawa M. Basic Characteristics of a Fractance Device [J]. IEICE Transactions on Fundamentals of Electronics, Communications and Computer Sciences, 1992, 75(12):1814-1819.
- [18] Mahata S, Herencsar N, Kubanek D. Optimal Approximation of Fractional-Order Butterworth Filter Based on Weighted Sum of Classical Butterworth Filters [J]. IEEE Access, 2021, 9:81097-81114.
- [19] Upadhyay D K, Khanna T. Design and Analysis of Improved Fractional Order Butterworth Lowpass Filters [C]//IEEE International Conference on Electronics, Computing and Communication Technologies (CONECCT), Bangalore, India, 2015:1-6.
- [20] 工业过程测量和控制装置的电磁兼容性总论 GB/T 13926.1-1992[S]. 北京:中国标准出版社,1992.
- [21] 工业过程测量和控制装置的电磁兼容性静电放电要求 GB/T 13926.2-13992[S]. 1992.
- [22] 工业过程测量和控制装置的电磁兼容性电快速瞬变脉冲群要求 GB/T 13926.4-1992[S]. 北京:中国标准出版社,1992.
- [23] 电力设备预防性试验规程 DL/T 596-1996[S]. 北京:中国电力出版社,1996.



刘 畅(1992—),男,汉族,河北石家庄人,硕士,工程师,研究方向为电力系统自动化、新型电子器件、分数阶滤波系统。参与完成国家自然科学基金(51177048)、河北省自然科学基金(E2018502121)等多项基金课题,获多项专利等,cliuncepu@163.com。