

基于分数阶滤波系统的LoRa新型抗干扰 SF₆密度继电器

刘畅,郭帅,武倩男

(国网河北省电力有限公司检修分公司,河北 石家庄 050000)

摘要:随着中国超特高压的迅速发展,SF₆气体密度继电器在各类电压等级设备中广泛应用。由于电网设备所处的电磁环境复杂,现有SF₆气体密度继电器无法将各类信息准确远传,因此研究一种新型抗干扰远传式SF₆气体密度继电器具有重要的意义。介绍了SF₆气体密度继电器的基本原理,并以分数阶滤波系统为基础,提出了一种新型抗干扰SF₆气体密度继电器,并通过现场试验验证了该设备的可靠性。

关键词:分数阶滤波系统;远距离无线电技术;抗干扰;SF₆气体密度继电器

中图分类号:TM133 **文献标识码:**A **DOI:** 10.19457/j.1001-2095.dqcd22257

The New LoRa Anti-interference SF₆ Gas Density Relay Based on Fractional Order Filtering System

LIU Chang, GUO Shuai, WU Qiannan

(State Grid Hebei Maintenance Branch, Shijiazhuang 050000, Hebei, China)

Abstract: With the rapid development of ultra-high voltage in China, SF₆ gas density relay is widely used in various voltage level equipment. Due to the complex electromagnetic environment of power grid equipment, the existing SF₆ gas density relay can not transmit all kinds of information accurately, so it is of great significance to study a new type of anti-interference remote transmission SF₆ gas density relay. The basic principle of SF₆ gas density relay was introduced. Based on the fractional order filtering system, a new anti-interference SF₆ gas density relay was proposed. The reliability of the device was verified by field test.

Key words: fractional order filtering system; long range radio (LoRa); anti-interference; SF₆ gas density relay

SF₆气体密度继电器是用来检测高压电器设备中SF₆气体密度的变化情况,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、插接式开关系统等组合电器设备中,其密度数据能否准确获取直接影响高压电器设备的安全稳定运行。传统SF₆气体密度继电器数据获取需要人工进行设备全面巡视,设备的增多会导致工作量及巡视误差的增大。部分变电站虽装有SF₆气体密度在线监测系统,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^[1-4]。

为此,研究数据准确的新型抗干扰远传式SF₆气体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、保证设备安全稳定具有重要意义。

1 SF₆气体密度继电器

传统SF₆气体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^[5]。

根据结构可将SF₆气体密度继电器分为I, II, III, IV型^[6]。I型SF₆气体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。

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。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并达到平衡,进而减少了继电器的误报^[6]。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。

现有大部分变电站高压电器设备SF₆密度信息需要传统人工巡视获取,无法在主控制室直接获取。此外,部分变电站中密度继电器虽装有SF₆密度在线监测系统或采用有线传输SF₆气体密度继电器^[7],由于元件设备所处电磁环境较为复杂,其数据采集存在一定误差,严重情况会导致误判甚至设备已发生故障而未收到报警信息,对电网安全稳定运行造成极大影响。

2 基于LoRa的远传式SF₆气体密度继电器

为了解决现有SF₆气体密度继电器存在的问题,特别是在复杂电磁环境下无法准确采集气体密度数据的问题,本文研究一种基于远距离无线电技术(long range radio, LoRa)的抗干扰远传式SF₆气体密度继电器。LoRa是基于低功耗广域网络的远距离无线电技术^[8-10]。与传统传输方式相比,LoRa具有传播距离远、低功耗、准确精度高的特点。LoRa通信技术的特性如表1所示。

表1 LoRa通信技术特性

Tab.1 LoRa communication technology characteristics

序号	属性	特点
1	传输距离	城镇:2~5 km; 郊区:15 km
2	功耗	很低
3	容量	一个LoRa网关可以连接上万个LoRa节点
4	电池寿命	长达10 a
5	标准	IEEE 802.15.4g

在高压电器设备的SF₆密度继电器上布置集成LoRa通信组件的数据采集传感器,传感器通过LoRa组件与布置在类端的LoRa基站通信;LoRa基站可以通过多跳的方式进行组网,将传感器处获得的感知数据通过电力光纤网回传至电力内

网,并利用云平台处理利用,整体网络主架构如图1所示。

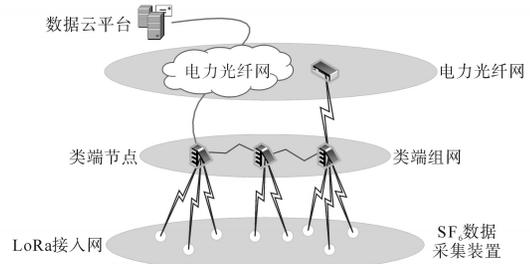


图1 基于LoRa的远传式SF₆密度继电器网络主架构

Fig.1 Main architecture of remote SF₆ density relay network based on LoRa

1)LoRa接入网:SF₆数据采集装置通过“多对一”的方式接入到类端节点。在标准的LoRa WAN通信协议基础上,针对SF₆数据采集传感器的使用特点,进行协议裁剪和优化。

2)类端组网:类端节点间通过无线多跳实现信息传输,具备自组网、自适应路由等功能,优化数据的调度和传输质量。

3)电力光纤网:利用成熟的电力光纤网技术,在类端加装终端模块,实现类端接入电力专网能力;或者利用变电站已铺设电力光纤网,通过有线接入方式并经加密和防火墙,实现电力内网的接入。

根据LoRa通信技术容量大特点,1个类端节点可以连接上万个数据采集信号,即在采集SF₆数据信号的基础上,可以获得大量元件信息,进而组成SF₆数据信息电力物联网,实现电网高压电器设备信息的有效获取。

2.1 远传式SF₆密度继电器数据感知装置

SF₆密度继电器数据感知装置一般由感知、处理、通信和供电这4个基本功能模块组成,总体架构设计如图2所示。数据感知装置连接于SF₆密度继电器本体下部。

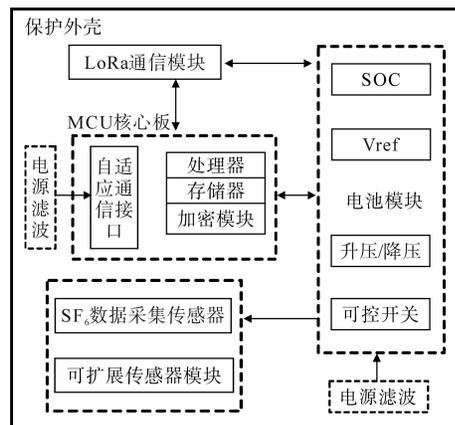


图2 数据感知装置总体架构设计

Fig.2 Overall architecture design of data sensing device

基于LoRa的嵌入式数据感知装置,采用模块化、芯片化设计技术提高装置的集成度。将传感器模块和核心板(microcontroller unit, MCU)的接口标准化,使各类传感器可以接入同一个MCU核心板,MCU核心板是数据感知装置算法和通信协议的载体。低功耗高能电池管理模块包括用于切除传感器模块的可控开关、用于调节不同类型传感器供电电压的升压和降压模块、用于为传感器提供稳定参考电压的Vref模块以及用于电池管理的模块(system on chip technology, SOC)。LoRa通信模块为传感器数据与基站进行通信。

2.2 远传式SF₆气体密度继电器类端设计

远传式SF₆气体密度继电器的类端节点应用场景根据电压等级或设备类型进行区域划分。

根据电压等级进行区域划分时,同一电压等级电气间隔末端设置类端节点,收集该电压等级内不同设备SF₆气体密度继电器数据。图3所示为220 kV电压等级GIS设备每个电气间隔装设1个SF₆气体密度继电器类端,该类端收集220 kV电气间隔三相设备中SF₆密度继电器的数据信息。图中虚线框表示采集传感器设计位置,采用无线传输的方式将数据传递至该电压等级类端节点。不同的电压等级类端节点进行组网,并通过电力光纤网传至数据云平台。

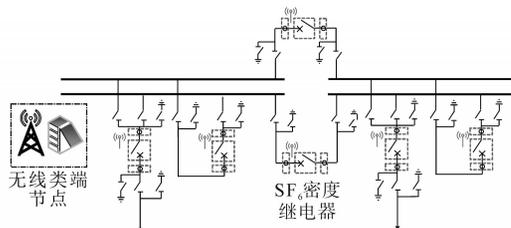


图3 220 kV电压等级GIS设备无线类端节点设计

Fig.3 Design of wireless end node of 220 kV voltage grade GIS equipment

该型区域划分的类端节点设计方式可以横向获得同一电压等级不同设备的SF₆数据信息,提升了该电压等级下设备状况分析效率。根据电压等级进行区域划分的类端节点可以广泛适用于各种电压等级变电站。

根据设备类型进行划分的设计原理图如图4所示。该型区域划分的类端设计方式,可以纵向获得同一类型设备在不同电压设备区的SF₆数据信息。根据设备类型进行区域划分时,类端节点收集不同电压等级电气间隔同类型设备的SF₆气体密度继电器数据。例如1 000 kV特高压变电站中,断路器类端节点可分别收集1 000 kV,500 kV,

110 kV,35 kV电压等级中各三相断路器的SF₆密度数据信息,见图4。隔离开关类端节点可收集不同电压等级中各三相隔离开关的SF₆密度数据信息,不同设备类端节点进行组网,并传至数据云平台。

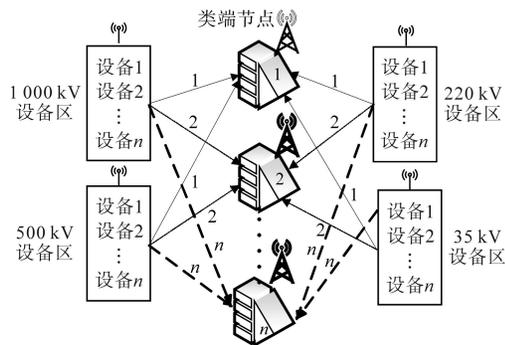


图4 设备型无线类端节点设计

Fig.4 Design of device type wireless end node

3 基于分数阶滤波系统的SF₆气体密度继电器

通过电器设备外壳、信号线、电源端口、控制线、地线等方式形成电磁干扰是电器设备在复杂电网环境下所受电磁干扰的主要方式^[1]。在远传式气体密度继电器的远传部分中,电源的地位极其重要。来自电网的干扰信号主要通过电子远传部分或数据采集传感器的供电电源等耦合串入远传密度继电器。此外,作为SF₆气体密度继电器的重要数据源头,SF₆气体压力或温度等数据采集传感器在接入MCU核心板前,其信号会受到来自地以及其两级间的硬件干扰。基于以上分析,提高SF₆气体密度继电器抗干扰性的重要原则是阻止干扰信号的传播。

本节从供电电源干扰以及硬件干扰两个重要方面出发,研究基于分数阶滤波系统的远传式SF₆气体密度继电器。

3.1 基于分数阶噪声滤波器的电源抗干扰处理

传统噪声滤波器是根据电感和电容的特性将其并联或串联入电源电路。虽然电路中电感和电容元件数的增多会一定程度降低电源电路中的干扰信号,但元件数的增多也会加大电路设计与实现难度。随着分数阶电路系统的发展,分数阶元件可以获得更多的电路特性及更大的设计自由度^[12-14]。

在电源输入端增加分数阶电源噪声滤波器,其等效电路图如图5所示。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。图中, P, N, P', N' 分别代表分数阶噪声滤波器的输入端口以及输出端口。

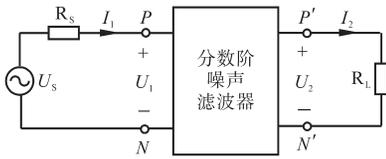


图5 电源等效电路图

Fig.5 Equivalent circuit diagram of power supply

分数阶噪声滤波器由分数阶差模及分数阶共模两部分组成,其电路原理如图6所示。其中,分数阶电容 $C_{\alpha_1}, C_{\alpha_2}$ 的阶次为 α_1, α_2 , 分数阶电感 L_{β_1}, L_{β_2} 的阶次为 β_1, β_2 。分数阶差模及共模分别用来衰减交流进线上的差模及共模干扰噪声。

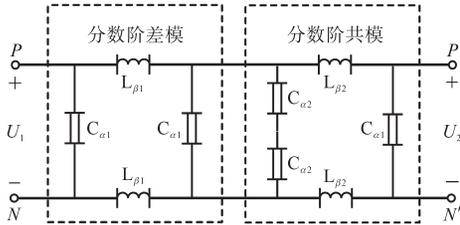


图6 分数阶噪声滤波器电路原理图

Fig.6 Schematic diagram of fractional-order noise filter circuit

根据图6的分数阶噪声滤波器电路,可以得到输出电压 U_2 如下式所示:

$$U_2 = U_s [(R_L + R_S R_L + \omega^{\beta_2} L_{\beta_2} + \omega^{\beta_1} L_{\beta_1} R_L + R_S R_L \omega^{\alpha_2} C_{\alpha_2} + \omega^{\alpha_2 + \beta_2} R_S L_{\beta_2} C_{\alpha_2} + \omega^{\alpha_2 + \beta_1} R_L L_{\beta_1} C_{\alpha_2} + \omega^{\alpha_2 + \beta_1 + \beta_2} L_{\beta_1} L_{\beta_2} C_{\alpha_2}) / (R_S + \omega^{\beta_2} L_{\beta_2})] \quad (1)$$

式中: ω 为干扰信号角频率。

利用阻抗匹配法,使得分数阶噪声滤波器对高频传导干扰具有最大损耗。

对传统噪声滤波器及分数阶噪声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。传统噪声滤波器及分数阶噪声滤波器的响应特性分别如图7、图8所示。

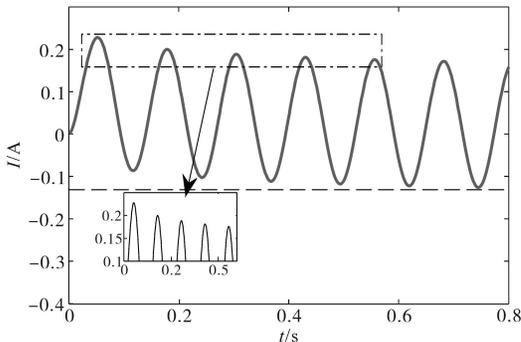


图7 传统噪声滤波器响应特性

Fig.7 Response characteristic of traditional noise filter

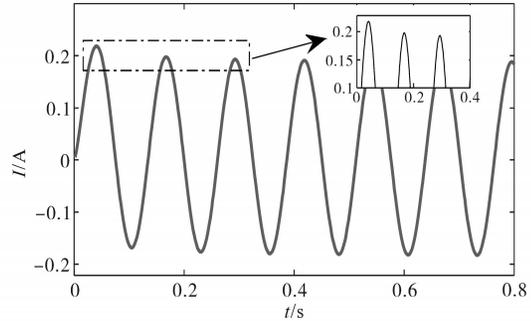


图8 分数阶噪声滤波器响应特性

Fig.8 Response characteristic of fractional-order noise filter

由图7、图8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;相同条件下分数阶噪声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,分数阶噪声滤波器更适合复杂环境下的电源抗干扰处理。

此外,给定相同输入信号,传统噪声滤波器与分数阶噪声滤波器的插入损耗如图9所示。由图可知,传统噪声滤波器的频率特性范围较窄(曲线斜率较小),分数阶噪声滤波器的频率特性范围较宽(曲线斜率较大)。传统噪声滤波器的衰减频率及通过频率的选择度较低,有可能导致部分信号衰减或噪声没有彻底去除。分数阶噪声滤波器频率的选择度较高, SF₆ 气体密度继电器各类数据可以在几乎不衰减的状态下去除噪声。

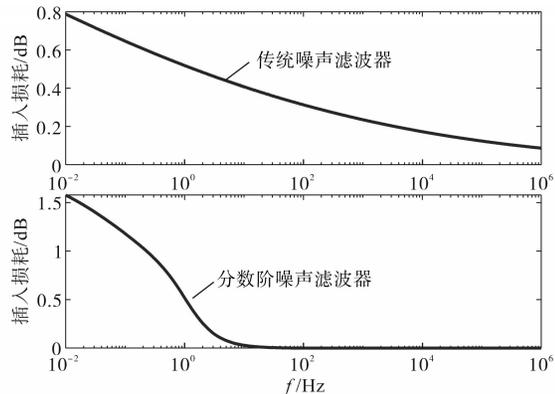


图9 传统噪声滤波器与分数阶噪声滤波器插入损耗对比

Fig.9 Comparison of insertion loss between traditional noise filter and fractional-order noise filter

如表2所示,选取不同分数阶次,分数阶噪声滤波器的插入损耗如图10所示。由图可知,随着阶次的升高,分数阶滤波器频率特性范围越大。此外, SF₆ 气体密度继电器可以根据安装位置所处的不同噪声环境,选取适当分数阶滤波阶次,达到更好的预期滤波效果。值得一提的是,随着

分数阶电容、电感的研究及开发,大部分的分数阶元件均可在市场中购买到,或通过整数阶电容、电感进行高阶逼近而实现。

表2 分数阶噪声滤波器阶次

Tab.2 Orders of fractional-order noise filter

	α_1	α_2	β_1	β_2
EX ₁	0.1	0.15	0.3	0.35
EX ₂	0.2	0.25	0.6	0.65
EX ₃	0.3	0.35	0.9	0.95
EX ₄	0.4	0.45	1.2	1.25

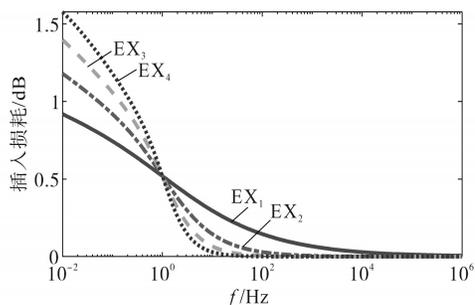


图10 不同阶次分数阶噪声滤波器插入损耗

Fig.10 Insertion loss of fractional-order noise filters with different order

3.2 基于分数阶切比雪夫滤波器的硬件抗干扰处理

对于传统SF₆气体密度继电器的硬件抗干扰处理,通常是在SF₆气体压力或温度等数据采集传感器信号接入MCU核心板前,通过信号线与地间并联电容来减少共模干扰;通过信号两极间的传统滤波器来减少差模干扰。因为电磁干扰的特性较为复杂并体现出了分数阶的特性,利用并联传统整数阶电容及电感、传统整数阶滤波器的方法无法更好地解决硬件抗干扰问题。本节利用分数阶切比雪夫滤波器对硬件抗干扰问题进行研究。

在SF₆气体压力或温度等数据采集传感器信号输出端增加分数阶切比雪夫滤波器,其等效电路如图11所示。其中, U_o, U_{in} 分别为数据采集传感器信号输出端电压及MCU核心板输入端电压; R_o, R_{in} 分别为数据采集传感器信号输出端等效电阻及MCU核心板输入端等效电阻。



图11 硬件抗干扰等效电路图

Fig.11 Equivalent circuit diagram of hardware anti-interference fractional-order Chebyshev anti-interference filter

图如图12所示,其中分数阶电容 $C_{\alpha 1}, C_{\alpha 2}$ 的阶次分别为 α_1, α_2 。

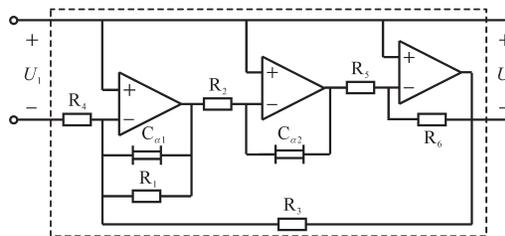


图12 分数阶切比雪夫抗干扰滤波器电路原理图

Fig.12 Schematic diagram of fractional-order Chebyshev anti-interference filter

根据图12的分数阶切比雪夫滤波器电路,结合电网络理论可以得到输出电压 U_2 如下式所示:

$$U_2 = U_1 \cdot \frac{R_3 R_5 / R_4 R_6}{\omega^{\alpha_1 + \alpha_2} R_2 R_3 C_1 C_2 + \omega^{\alpha_2} (R_2 R_3 C_2 / R_1) + 1} \quad (2)$$

给定相同输入信号,传统硬件抗干扰滤波与分数阶切比雪夫抗干扰滤波的插入损耗如图13所示。由图可知,传统硬件抗干扰滤波的频率特性范围较窄(曲线斜率较小),分数阶切比雪夫抗干扰滤波的频率特性范围较宽(曲线斜率较大)。传统硬件抗干扰滤波的衰减频率及通过频率的选择度较低,有可能导致部分硬件干扰无法彻底去除。分数阶切比雪夫抗干扰滤波频率的选择度较高,SF₆气体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硬件干扰。

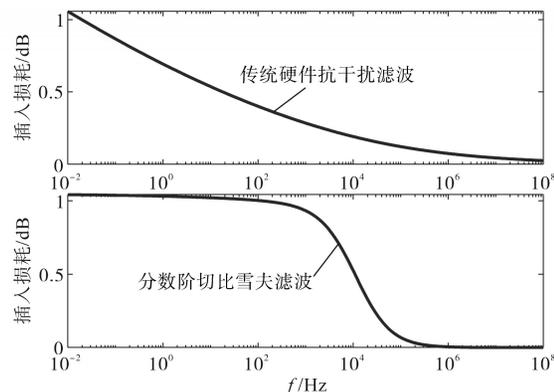


图13 传统硬件抗干扰滤波与分数阶切比雪夫抗干扰滤波插入损耗对比

Fig.13 Comparison of insertion loss between traditional hardware anti-interference filter and fractional-order Chebyshev anti-interference filter

如表3所示,选取不同分数阶次,分数阶切比雪夫抗干扰滤波器的插入损耗如图14所示。

表3 不同阶次分数阶切比雪夫滤波器参数
Tab.3 Parameters of fractional-order Chebyshev filter under different orders

元件参数	EX ₁	EX ₂	EX ₃
α_1	0.6	0.8	1.0
α_2	0.2	0.5	0.8
$C_{a1}/\mu\text{F}$		0.159	
$C_{a2}/\mu\text{F}$	173.9	12.6	0.915
$R_1/k\Omega$	5.095	12.147	3.001
R_2/Ω	679.8	1 702.5	2 150.1
R_3/Ω	749.5	713.5	710.7
$R_4, R_5, R_6/\Omega$		1 000	

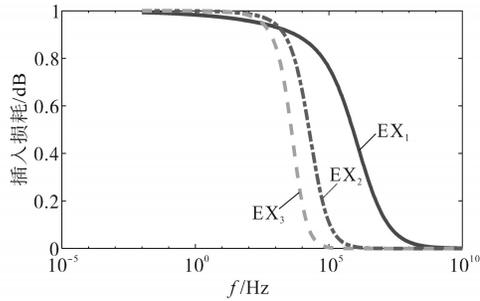


图14 不同阶次分数阶切比雪夫抗干扰滤波器插入损耗
Fig.14 Insertion loss of fractional-order Chebyshev anti-interference filters with different order

由图14可知,随着阶次的升高,分数阶滤波器频率特性范围越大。采用分数阶切比雪夫硬件抗干扰方法,可以提高SF₆气体密度继电器采用的硬件裕度,即选择适当的分数阶阶次来实现多种数据感知装置的硬件抗干扰。

对于表3所示 α_2 三种阶次0.2,0.5,0.8的分数阶电容 C_{a2} ,其电容值可以通过4阶整数阶电容、电阻组成的电路进行逼近实现,如图15所示。

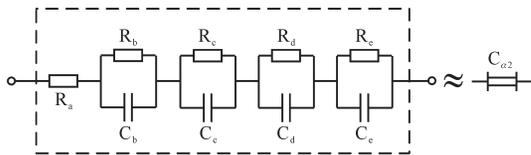


图15 分数阶切比雪夫抗干扰滤波器中分数阶电容逼近等效电路
Fig.15 Fractional capacitor approximation equivalent circuit for fractional-order Chebyshev anti-interference filters

4 现场试验验证

基于分数阶滤波系统的LoRa新型抗干扰远传式SF₆密度继电器样机现场安装如图16所示。为了测试其供电电源抗干扰及硬件抗干扰两方面的可靠性,将样机分别安装于河北南部电网某500 kV变电站的220 kV, 500 kV两种电压等级SF₆组合电器设备上,并与相同环境下传统的SF₆密度继电器进行对比。



图16 新型抗干扰远传式SF₆密度继电器现场样机
Fig.16 Field prototype of SF₆ density relay with new anti-interference and remote transmission

新型抗干扰远传式SF₆密度继电器与传统SF₆密度继电器在220 kV及500 kV电压等级的组合电器设备上供电电源抗干扰对比情况分别如图17、图18所示。其中,两种电压等级中新型抗干扰远传式SF₆密度继电器的分数阶噪声滤波器参数如表4所示。

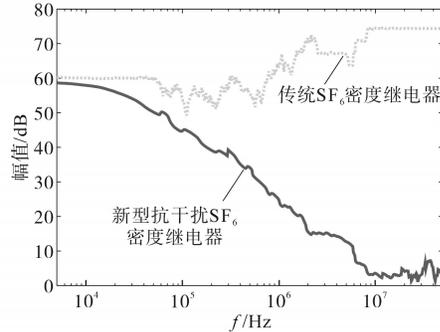


图17 220 kV组合电器供电电源抗干扰对比
Fig.17 Anti-interference comparison of power supply for 220 kV gas-insulated metal-enclosed switchgear

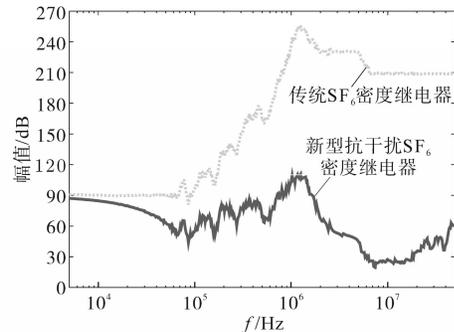


图18 500 kV组合电器供电电源抗干扰对比
Fig.18 Anti-interference comparison of power supply for 500 kV gas-insulated metal-enclosed switchgear

表4 两种电压等级中的分数阶噪声滤波器参数
Tab.4 Parameters of fractional-order noise filter in two types of voltage levels

	α_1	α_2	β_1	β_2
220 kV	0.2	0.25	0.6	0.65
500 kV	0.4	0.45	1.2	1.25

由图17可以明显看出,采用分数阶噪声滤波器供电电源抗干扰的SF₆密度继电器可以在高频

范围上有效抑制电网通过供电电源耦合进入的干扰。而传统SF₆密度继电器随着干扰频率的增加,供电电源抗干扰能力有所下降,无法有效抑制耦合进入的干扰。对于图18所示500 kV电压等级的组合电器两种SF₆密度继电器供电电源抗干扰对比情况,采用分数阶噪声滤波器的SF₆密度继电器将耦合进入的干扰信号幅值抑制在30~60 dB,而传统SF₆密度继电器无法有效抑制干扰信号,同时随着频率的增加,干扰信号幅值高达120 dB,约为新型抗干扰滤波器的4倍。

新型抗干扰远传式SF₆密度继电器与传统SF₆密度继电器在220 kV及500 kV电压等级的组合电器设备上硬件抗干扰对比情况分别如图19、图20所示。其中,两种电压等级中新型抗干扰远传式SF₆密度继电器的分数阶切比雪夫滤波器参数如表5所示。

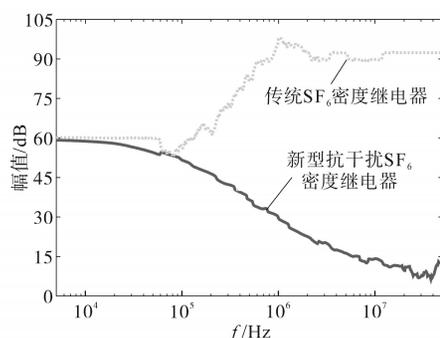


图19 220 kV组合电器硬件抗干扰对比

Fig.19 Hardware anti-interference comparison of 220 kV gas-insulated metal-enclosed switchgear

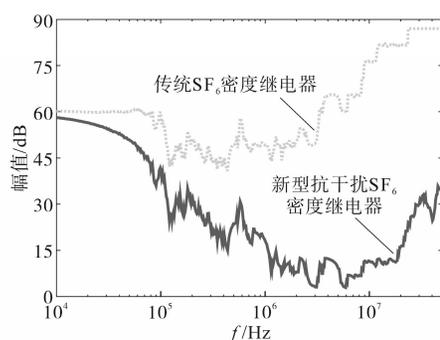


图20 500 kV组合电器硬件抗干扰对比

Fig.20 Hardware anti-interference comparison of 220 kV gas-insulated metal-enclosed switchgear

由图19可以明显看出,采用分数阶切比雪夫滤波器硬件抗干扰的SF₆密度继电器可以有效抑制共模、差模干扰,使得接入MCU核心板的SF₆气体压力或温度等数据采集传感器信号更加准确。对于图20所示500 kV电压等级的组合电器两种SF₆密度继电器硬件抗干扰对比情况,两种SF₆密

表5 两种电压等级中的分数阶切比雪夫滤波器参数

Tab.5 Parameters of fractional-order Chebyshev filter in two types of voltage levels

参数	电压等级/kV	
	220	500
α_1	0.8	1.0
α_2	0.5	0.8
$C_1/\mu\text{F}$	0.159	0.159
$R_4, R_5, R_6/\Omega$	1 000	1 000
$C_2/\mu\text{F}$	12.6	0.915
$R_1/\text{k}\Omega$	12.147	3.001
R_2/Ω	1 702.5	2 150.1
R_3/Ω	713.5	710.7

度继电器均可以在 $10^5 \sim 10^7$ Hz频带范围内对硬件干扰进行抑制。但通过试验对比可以发现,新型抗干扰SF₆密度继电器的抑制效果更加明显。同时随着频率的增加,传统SF₆密度继电器无法持续对硬件干扰进行抑制,虽然此时新型抗干扰SF₆密度继电器的抑制作用有些减弱,但要比同频带的传统SF₆密度继电器抑制效果好。高频带时新型SF₆密度继电器抑制效果约为传统密度继电器的3倍。

5 结论

本文基于分数阶滤波系统的新型抗干扰SF₆密度继电器,解决了传统SF₆密度继电器在供电电源抗干扰和硬件抗干扰两方面问题,提高了SF₆密度继电器在复杂电磁环境下的抗干扰性,提升了高压电器设备信息传输的可靠性。

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): 536-538.
Wang Runhua. Application of SF₆ gas monitoring system in GIS combination electric appliance[J]. Shanghai Electric Power, 2006, 19(5): 536-538.
- [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.
Xi Chaoqun, Qiu Manman, Luo Libo, et al. Main problems and improvement measures of electric contact density relay[J]. High Voltage Apparatus, 2017, 53(6): 192-202.
- [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.
Zhou Qiyi, Gao Minggui, Jia Fengming, et al. Development of an oil free vibration resistance type SF₆ gas density monitor[J]. High Voltage Apparatus, 2017, 53(5): 154-158.
- [4] 宋泉, 李炜, 宋竹生, 等. 国网公司系统组合电器运行情况分析[J]. 高压电器, 2009, 45(6): 78-82.

- Song Gao, Li Wei, Song Zhusheng, *et al.* Operation condition analysis for GIS in state grid corporation of China[J]. High Voltage Apparatus, 2009, 45(6): 78-82.
- [5] 董修峰. SF₆气体密度继电器的校验[J]. 东北电力技术, 2010(7): 43-45.
- Dong Xiufeng. SF₆ calibration of gas density relay[J]. North-east Electric Power Technology, 2010(7): 43-45.
- [6] 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.
- Feng Yinfu. Structure and working principle of SF₆ density meter and density relay[J]. Rural Electrician, 2011, 19(3): 31-32.
- [7] 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.
- Sun Yinshan, Yin Junhua, Kou Xinmin, *et al.* Research on the resistance matching method of RS-485 communication terminal of SF₆ density relay[J]. Electrical Automation, 2015, 37(1): 46-48.
- [8] 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.
- Lu Yongling, Liu Yang, Hu Chengbo, *et al.* LoRa-based communication technology for overhead line internet of things[J]. Electrotechnical Application, 2019, 38(7): 68-72.
- [9] Haubro M, Orfanidis C, Oikonomou G. TSCH-over-LoRa: long range and reliable IPv6 multi-hop networks for the Internet of things[J]. Internet Technology Letters, 2020, 3(4): e165.
- ~~~~~
- (上接第52页)
- Yu Hao, Qin Wenping, Wei Bin, *et al.* Economic dispatch of hybrid AC/DC microgrid considering prediction error[J]. Power System Technology, 2019, 43(11): 3987-3996.
- [13] 邱海峰, 赵波, 林达, 等. 计及储能损耗和换流成本的交直流混合微网区域协调调度[J]. 电力系统自动化, 2017, 41(23): 29-37.
- Qiu Haifeng, Zhao Bo, Lin Da, *et al.* Regional coordinated dispatch in AC/DC hybrid microgrids considering energy storage loss and converter cost[J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(23): 29-37.
- [14] 王守相, 陈思佳, 谢颂果. 考虑安全约束的交直流配电网储能与换流站协调经济调度[J]. 电力系统自动化, 2017, 41(11): 85-91.
- Wang Shouxiang, Chen Sijia, Xie Songguo. Security-constrained coordinated economic dispatch of energy storage systems and converter stations for AC/DC distribution networks[J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(11): 85-91.
- [15] 杨旭红, 尹聪聪. 基于孤岛模式光储直流微电网的协调控制策略[J]. 电气传动, 2020, 50(5): 75-80.
- Yang Xuhong, Yin Congcong. Coordinated control strategy of light storage and DC microgrid based on islanding mode[J]. Electric Drive, 2020, 50(5): 75-80.
- [10] 陈金健. LoRa 移动物联网基站无线覆盖的研究[J]. 科技与创新, 2018(14): 87-88.
- Chen Jinjian. Research on wireless coverage of LoRa mobile Internet of things base station[J]. Science and Technology and Innovation, 2018(14): 87-88.
- [11] 王淑凤, 卢铁兵, 崔翔, 等. 电力系统电磁兼容分析方法及数学模型综述[J]. 电力情报, 1998, 9(4): 1-5.
- Wang Shufeng, Lu Tiebing, Cui Xiang, *et al.* Review of electromagnetic compatibility analysis method and mathematical model for power system[J]. Information on Electric Power, 1998, 9(4): 1-5.
- [12] Ashtiani C, Wright R, Hunt G. Ultracapacitors for automotive applications[J]. Journal of Power Sources, 2006, 154(2): 561-566.
- [13] Kötz R, Carlen M. Principles and applications of electrochemical capacitors[J]. Electrochimica Acta, 2000, 45(4): 2483-2498.
- [14] 王炎, 崔建涛, 刘忠. 基于分数阶巴特沃斯滤波器的新型超级电容器[J]. 电子元件与材料, 2017, 36(5): 30-36.
- Wang Yan, Cui Jiantao, Liu Zhong. New supercapacitor model of fractional order Butterworth filter[J]. Electronic Components and Materials, 2017, 36(5): 30-36.
- ~~~~~
- 收稿日期: 2020-08-03
修改稿日期: 2020-09-23
- ~~~~~
- [16] 金星, 邵珠超, 王盛慧. 一种基于差分进化和灰狼算法的混合优化算法[J]. 科学技术与工程, 2017, 17(16): 266-269.
- Jin Xing, Shao Zhuchao, Wang Shenghui. A hybrid optimization algorithm based on differential evolution and grey wolf optimizer[J]. Science Technology and Engineering, 2017, 17(16): 266-269.
- [17] 于德鳌, 李慧, 刘思嘉, 等. 基于改进萤火虫算法的含风电系统环境经济调度[J]. 电力科学与技术学报, 2020, 35(2): 84-92.
- Yu Deao, Li Hui, Liu Sijia, *et al.* Environmental economic dispatch of power system integrated with wind power based on an improved glowworm swarm optimization[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2020, 35(2): 84-92.
- [18] 姚方, 王佳伟, 文福拴, 等. 计及碳税的含风电和储能的电力系统经济调度[J]. 电力科学与技术学报, 2019, 34(1): 37-46.
- Yao Fang, Wang Jiawei, Wen Fushuan, *et al.* Economic dispatch for a power system containing wind power and energy storage with Carbon tax considered[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2019, 34(1): 37-46.
- ~~~~~
- 收稿日期: 2020-09-11
修改稿日期: 2020-10-23