

# 高精度组合型电子式电流/电压互感器测量技术研究

宋 涛, 冯泽虎

淄博职业学院电子电气工程学院, 山东 淄博  
Email: st222999@126.com

收稿日期: 2021年1月25日; 录用日期: 2021年2月26日; 发布日期: 2021年3月5日

## 摘 要

针对电子式互感器模拟器件易受温度、环境等因素影响的问题和其对电流、电压测量中节省空间和器材要求, 本文介绍了一种电子式电流/电压互感器共用一套绝缘支柱的组合型设计, 它采用SF<sub>6</sub>绝缘技术, 利用高压壳体与接地金属屏蔽罩的双重屏蔽作用提高抗电磁干扰能力和稳定性, 采用Rogowski线圈作为被测电流的计量、保护传感元件, 取消了光供电系统, 通过基于直流负反馈原理的改进Al-Alaoui数字积分器来抑制输入信号中直流分量的影响, 改进的数字积分算法频率特性接近于理想积分器的频率特性, 试验结果显示, 该组合型电子式电流/电压互感器具有较高的准确度和稳定性。

## 关键词

组合型互感器, 电子式电流互感器, 电子式电压互感器, 数字积分, 直流负反馈

# Research on the Technology of Precise and Combined Electronic Current/Voltage Transformers

Tao Song, Zehu Feng

College of Electronic and Electrical Engineering, Zibo Vocational Institute, Zibo Shandong  
Email: st222999@126.com

Received: Jan. 25<sup>th</sup>, 2021; accepted: Feb. 26<sup>th</sup>, 2021; published: Mar. 5<sup>th</sup>, 2021

## Abstract

The electronic transformer was easily affected by temperature, environment and other factors. To solve this problem and satisfy the requirement on saving space and current/ voltage measured

equipment, a combination design of sharing insulation pillar by electronic current/voltage transformers was introduced in this study. SF<sub>6</sub> insulation technology was employed. Double shielding effects of high pressure shell and grounding metal cover improve the ability of anti-electromagnetic interference and stability. The air-core coil was adopted to measure current and as protecting sensors. Optical power supply system was cancelled. Through the improved Al-Alaoui digital integrator on the basis of the principle of direct current negative feedback, the effect of direct current in input was suppressed. And its frequency characteristic was closed to that of the ideal integrator. Experimental results show that the combined electronic current/voltage transformer has high accuracy and stability.

## Keywords

Combined Transformer, Electronic Current Transformer, Digital Integration, Direct Current Negative Feedback

Copyright © 2021 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

电子式互感器由于绝缘相对简单、动态范围大、频响宽等特点,广泛应用于电力系统测量领域[1] [2] [3] [4],常用的高压独立式电子式电流互感器存在光供电系统的稳定性不足及价格偏高等问题[5] [6] [7] [8],高压独立式电子式电压互感器抗电磁干扰能力较差,测量准确度低的问题[9] [10] [11] [12]。为了弥补独立式电子式互感器的缺点,设计一种组合型电子式互感器,实验证明,这种组合型互感器的绝缘性能可靠,测量准确度高,使用空间小,成本低,能够满足智能电网的数字化需要。

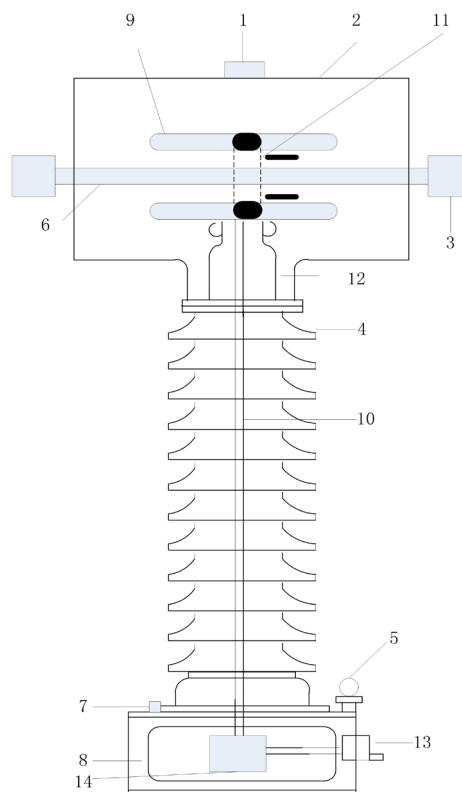
## 2. 基本结构

组合型电子式互感器的电流传感部分采用空心线圈为电流检测单元,电压传感部分以 SF<sub>6</sub> 同轴电容做成分压器,整体重量轻,无磁饱和现象和铁磁谐振问题,可提升电流传感器在动态相应、频带宽度等方面的性能[13]。组合型电子式电流/电压互感器基本结构见图 1,其主要由高压壳体、接地板与绝缘套管三部分组成,绕有一定匝数的空心线圈被放置于金属屏蔽罩内,该屏蔽罩与接地螺杆通过金属管连接作为低电位侧,高压外屏蔽壳体与一次导线为高电位侧,并利用 SF<sub>6</sub> 气体在高、低电位之间进行绝缘[14] [15]。

目前国内电子式电压互感器主要使用的为类似 CVT 串级分压结构,存在抗电磁干扰能力差的问题[16] [17] [18],图 1 所示电子式互感器电压传感部分是一个 SF<sub>6</sub> 同轴电容分压器,接地金属罩与高压壳体的屏蔽可减弱寄生电容的影响,这种结构稳定性高。在金属屏蔽罩内安装一电容环,该电容环处于一次导杆(高电位侧)与金属屏蔽罩(低电位侧)之间,电容环与一次导杆、金属屏蔽罩之间彼此绝缘作为中间电极,电容环与一次导杆和金属屏蔽罩各产生的一个电容[14]。同轴电容分压器的输出电流接入积分器电路,电流信号通过积分器转换为与被测电压成正比的电压信号,并与被测电压相位相同[15],电容中电流  $i_C$  正比于被测电压对时间的微分,采用与空心线圈相类似的信号处理电路,对  $i_C$  进行积分就可以得到与被测一次电压信号成正比的模拟信号。

电子式互感器传感单元采用空心线圈,其骨架为非磁性材料,其测量范围宽,频率带宽高,输出量为小信号电压值,体积小,绝缘工艺简单等优点[19]。其传感单元位于地电位侧,取消了光供电系统,采

用空心线圈作为计量、保护的传感单元, 将调制的电信号引到低压侧进行解调得到被测电流[20]。即线圈的输出电压与通过其中的电流成微分关系, 需要接积分器将其还原成正比于一次电流的量, 即将测得的感应电势进行积分处理并利用其互感系数进行计算, 可得到被测电流的大小, 由于模拟积分器存在分散性、温漂、零漂等问题, 因而采用数字积分技术, 首先 A/D 转换器将空心线圈输出的信号进行模数转换, 然后通过数值积分的方式还原被测信号, 得到正比于被测电流的量。



1.防爆片; 2.壳体; 3.一次接线端子; 4.绝缘套管; 5.气体密度计; 6.一次导杆; 7.接地螺杆; 8.底座; 9.金属屏蔽罩; 10.金属管; 11.线圈及电容环; 12.支持绝缘子; 13.二次接线盒; 14.铭牌

**Figure 1.** The structure of combined electronic current/voltage transformers

**图 1.** 组合型电子式电流/电压互感器基本结构

### 3. 性能分析

由于 SF<sub>6</sub> 同轴电容的位置、温度、压力的变化会引起电容量的变化, 因此会对电压测量的准确度产生影响。

#### 3.1. 同轴电容的性能分析

由于 SF<sub>6</sub> 同轴电容它采用同轴结构, 即使电极片间的相对位置发生变化, 也不会使得电容量发生较大改变, 因此抗干扰能力也很强[14]。

图 2 中两同轴柱形导体壳长度为  $l$ , 外半径  $R_2$  大于内半径  $R_1$ , 且  $l \gg (R_2 - R_1)$ , 外柱面带电荷总电量为  $-Q = -\lambda l$ , 内柱面为  $+Q = +\lambda l$  [15], 可得两柱面之间的电压为

$$U = \int_A^B E \cdot dl = \int_A^B \frac{\lambda}{2\pi\epsilon r} dr = \frac{\lambda}{2\pi\epsilon} \ln \frac{R_2}{R_1} = \frac{Q}{2\pi\epsilon l} \ln \frac{R_2}{R_1} \quad (1)$$

推导得同轴时两柱面之间的电容

$$C_0 = \frac{Q}{U_{AB}} = \frac{2\pi\epsilon l}{\ln(R_2/R_1)} \quad (2)$$

出现偏轴时, 如果两圆心间距为  $R$ , 得一次导杆偏心时导体壳之间的电容量

$$C = \frac{2\pi\epsilon l}{\ln\left[\frac{R_1^2 + R_2^2 - R^2}{2R_1R_2} + \sqrt{\left(\frac{R_1^2 + R_2^2 - R^2}{2R_1R_2}\right)^2 - 1}\right]} \quad (3)$$

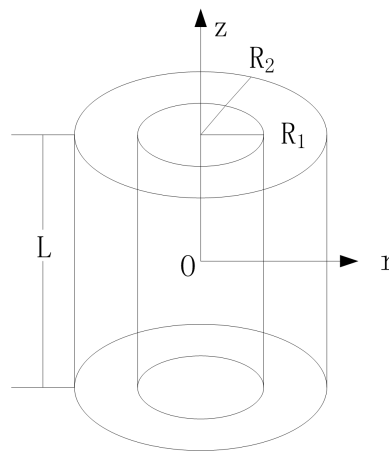


Figure 2. SF<sub>6</sub> Coaxial capacitance  
图 2. SF<sub>6</sub> 同轴电容框图

在同轴电容的分析中, 偏轴和偏角情况下都会影响电容量, 二者比较偏角影响较小[15]。当电子式电压互感器总体精度 $\leq 2\%$ , 要求一次电压传感器部分的精度应 $\leq 0.05\%$ , 实际中取  $R_1 = 45 \text{ mm}$ ,  $R_2 = 135 \text{ mm}$  [15] [21] [22] [23], 仿真结果见图 3。

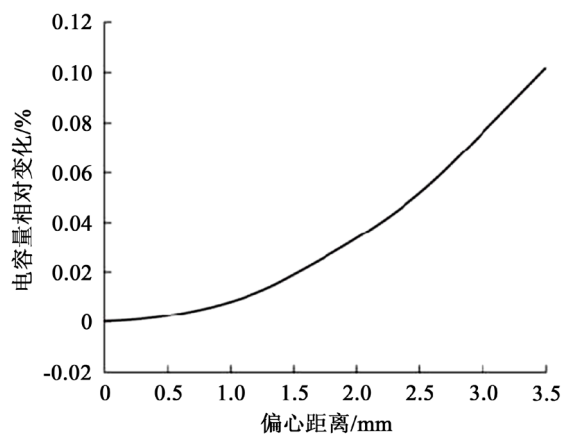


Figure 3. The variation of  $C_0$  with the variation of eccentricity distance  $R$   
图 3. 偏心距离  $R$  变化时电容量  $C_0$  的相对变化

从图 4 可看到导电杆的偏移对电容大小的影响, 可知  $R = 2.5 \text{ mm}$  偏移时产生的测量偏差在允许的范围之内。

由于 SF<sub>6</sub> 气体的参数会随着外界环境温度  $T$ 、压强  $P$  的变化而产生变动, 这将使 SF<sub>6</sub> 同轴电容量变化。在 25℃, 0.1 MPa 的条件下, SF<sub>6</sub> 气体的密度  $\rho$  为 6.14 kg/m<sup>3</sup>, 同轴电容为

$$C = \frac{2\pi l \varepsilon_0}{\ln(R_2/R_1)} \varepsilon_r = \frac{2\pi l \varepsilon_0}{\ln(R_2/R_1)} \left( 1 + 4\pi \cdot a^3 \frac{P}{k \cdot T} \right) \quad (4)$$

式中:  $K$  为波尔斯曼常数,  $a = 2.071 \times 10^{-7}$ ,  $l$  为 SF<sub>6</sub> 同轴电容环的长度,  $R_1$ 、 $R_2$  分别为同轴电容环的内、外半径,  $\varepsilon_0$  为介电常数。

当密度不变时和当密度发生变化时(漏气量为初始值的 1%时), 电容量与温度之间的关系见图 4 和图 5。

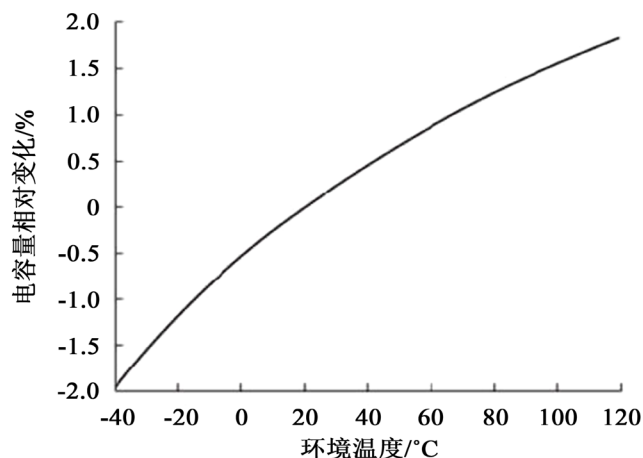


Figure 4. The relationship between capacitance and temperature when the density changes by 1%

图 4. 密度变化 1%时电容量与温度的关系

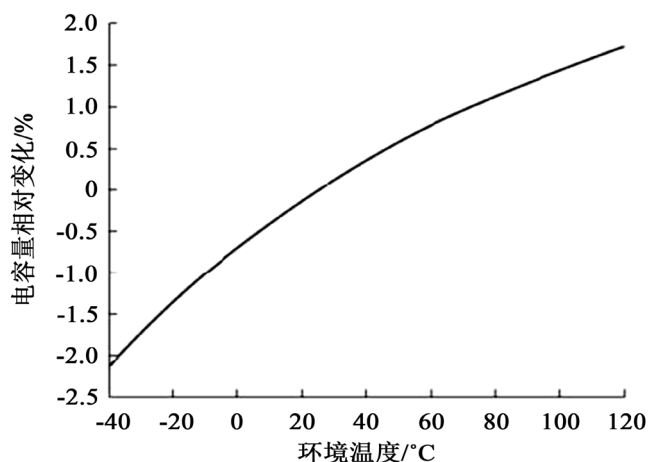


Figure 5. The relationship between capacitance and temperature when the density is constant

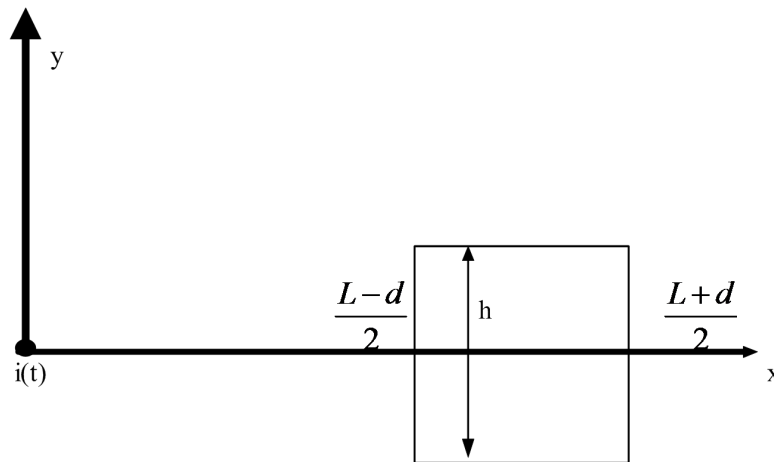
图 5. 密度不变时电容量与温度的关系

由图 4 和图 5 可以看出, 当温度在 -40℃~120℃ 范围内变化时, 两种情况电容量变化 < 0.01%, 均满足标准要求。

### 3.2. 空心线圈的性能分析

如图 6 所示, 为空心线圈的垂直截面右侧剖图, 母线到矩形截面中心的距离为  $\frac{L}{2}$ , 矩形截面的长度

为  $d$ , 高度为  $h$ 。空心线圈的骨架的磁导率为  $\mu_r\mu_0$ ,  $N$  为线圈的匝数, 假设一次目前垂直于矩形骨架的界面且经过其中心。



**Figure 6.** The right upright projection of air-core coil with round framework and rectangular section  
**图 6.** 圆形骨架矩形截面空心线圈的垂直截面右侧剖图

$$M = \mu_r\mu_0N \frac{h}{2\pi} \ln \frac{L+d}{L-d} \tag{5}$$

空心线圈所处外界环境温度变化时, 空心线圈的截面积、输出电阻等随之变化, 导致输出电压的变动, 骨架材料采用 FR-4 玻璃纤维, 热膨胀系数为 13~15 PPM/°C, 铜箔的热膨胀系数为 17 PPM/°C 左右, 可以以印制板的热膨胀系数来计算, 以 110 kv 组合型电子式互感器用空心线圈为例, 常温 25°C 下,  $h = 3 \text{ mm}$ ,  $R_1 = 93 \text{ mm}$ ,  $R_2 = 120 \text{ mm}$ , 则此时线圈的互感系数为[13] [14]:

$$M = 7.647 \times 10^{-8}$$

与常温相比, 温度变化  $t$ °C 时的互感系数为

$$\begin{aligned} \frac{M + \Delta M}{M} &= \frac{\mu_0N \frac{h(1+x*t)}{2\pi} \ln \frac{R_2(1+x*t)}{R_1(1+x*t)} - \mu_0N \frac{h}{2\pi} \ln \frac{R_2}{R_1}}{\mu_0N \frac{h}{2\pi} \ln \frac{R_2}{R_1}} \\ &= \frac{(1+x*t) \ln \frac{R_2(1+x*t)}{R_1(1+x*t)} - \ln \frac{R_2}{R_1}}{\ln \frac{R_2}{R_1}} \end{aligned} \tag{6}$$

该电子式互感器要求在 -40°C ~ +50°C 之间满足 0.2S 级测量精度要求, 通过测试温度在 -40°C ~ +50°C 范围内空心线圈的互感系数变化不超过 0.05%, 满足 0.2S 级电流互感器应用要求。

由于模拟积分器和常用数字积分算法相对存在不足, 因此通过 Al-Alaoui 数字积分算法可有效克服输入信号中直流分量产生的影响, 具有较高的准确度, 采用直流负反馈原理, 结合 PID 控制算法, 将数字积分器输出中的直流分量反馈至输入端, 进而消除直流分量的影响, 改进的数字积分算法可以在现场可编程门阵列(FPGA)中实现[13]。通过采用高分辨率的 A/D 转换器, 数字积分器可实现高准确度的信号测量。

#### 4. 实验结果分析

根据 IEC60044-7、IEC60044-8 中对电子式互感器的准确度等级的要求, 对电子式互感器的准确度、局部放电、工频耐压、电磁兼容等实验[24] [25], 均满足标准要求, 部分测试结果如下:

**Table 1.** The preliminary examination and reexamination data of measurement channel

**表 1.** 计量通道初试、复试数据

电流百分比(%)	初试比差(%)	复试比差(%)	初试相差(′)	复试相差(′)
1	-0.26	-0.24	-8	-8
5	0.12	0.13	3	2
20	-0.01	0	0	1
100	-0.03	-0.02	-1	0
120	-0.03	-0.03	-1	-1

由以上实验结果(表 1)可以看出, 计量通道在 1%~120% 额定电流范围内, 比差变化 $<0.6\%$ , 角差变化 $<12'$ , 满足 0.2S 级测量用互感器的精度要求。

**Table 2.** The experiment results of protection channel

**表 2.** 保护通道数据

电流百分比(%)	比差(%)	相差(′)
103.4	-0.01	0
3012.4	-0.18	2

由以上实验结果(表 2)可以看出, 保护通道在 100% 额定电流范围内, 比差变化 $<0.1\%$ , 角差变化 $<2'$ , 满足 5P 等级保护用互感器的精度要求, 当一次电流达到额定电流的 30 倍时, 测量精度仍然满足要求。

**Table 3.** The temperature cycle experiment results of measurement channel

**表 3.** 计量通道温度循环数据

温度(°C)	比差(%)	相差(′)
25	-0.02	1
50	-0.01	2
50	-0.01	2
50	-0.01	2
25	-0.02	1
-40	-0.03	0
-40	-0.03	1
-40	-0.03	1
25	-0.03	1
25	-0.02	1
25	-0.03	1

由以上温度循环实验数据(表 3)看出, 温度变化在 $-40^{\circ}\text{C}$ ~ $50^{\circ}\text{C}$  范围内, 计量通道比差变化 $<0.15\%$ , 角差变化 $<5'$ , 满足标准的规定。

**Table 4.** Preliminary and secondary examination data of the voltage transformer  
**表 4.** 电压通道初试、复试测试数据

电压(%)	初试比差(%)	复试比差(%)	初试相差(′)	复试相差(′)
80	-0.002	0.02	0.6	0.9
100	0.005	-0.01	0.5	2.1
120	0.007	-0.02	0.6	1.9
150	-0.003	-0.03	0.9	1.8

由以上(表 4)可以看出, 在 80%~150%额定电压内比差变化 $\leq 0.05\%$ , 相差变化 $\leq 2'$ ; 对于同一点初试比差与复试比差变化 $\leq 0.03\%$ , 初试相差与复试相差变化 $\leq 2'$ , 满足标准的要求。

## 5. 结论

本文研究的组合型电子式电流/电压互感器将 SF<sub>6</sub> 的绝缘技术与新型传感技术相结合, 电子式电流/电压互感器共用一套绝缘支柱, 节省空间和器材, 利用高压壳体与接地金属罩的双重屏蔽作用增强抗电磁干扰能力和稳定性, 测量单元位于地电位侧, 取消了光供电系统, 采用空心线圈作为传感单元, 通过 PID 反馈控制器和衰减系数来改进数字积分器直流响应, 频率特性趋于理想化, 经过测试该组合型电子式电流/电压互感器计量通道为 0.2S 级、保护通道为 5P30、电压通道为 0.2 级, 具有较高的准确度和稳定性, 能够满足 IEC60044-7、IEC60044-8 中对测量及保护用电子式互感器的准确度等级的要求。

## 基金项目

淄博市校城融合平台项目(2019ZBXC127)。

## 参考文献

- [1] 罗苏南, 曹冬明, 王耀, 丁晔, 阎嫦玲, 须雷, 石亲民.  $\pm 800\text{kV}$  特高压直流全光纤电流互感器研制及应用研究[J]. 高压电器, 2016, 52(10):1-7.
- [2] 李振华, 闫苏红, 胡蔚中, 李杨, 李振兴. 一种基于改进数字积分的高精度电流互感器在线校验系统[J]. 电网技术, 2016, 40(3): 978-984.
- [3] 李坤, 邵明鑫, 汪本进, 等.  $\pm 1100\text{kV}$  直流电压互感器在线监测系统研究[J]. 高压电器, 2017, 53(6): 1-7.
- [4] 罗苏南, 陈松林, 李力, 须雷. 电子式互感器技术发展及应用现状[J]. 中国电业(技术版), 2014, 5(5): 24-27.
- [5] 金辉, 吴浩, 李志勇, 等. 环境温度变化对 SF<sub>6</sub> 电流互感器运行性能的影响研究[J]. 电网与清洁能源, 2017, 33(12): 65-69.
- [6] 孙向飞, 束洪春, 周建萍, 夏聆峰. 电磁型与电子式电流互感器传变和应涌流比较[J]. 电力自动化设备, 2015, 35(2): 154-159.
- [7] 刘志恒, 段雄英, 廖敏夫, 邹积岩, 张文娜. 罗氏线圈电子式电流互感器积分特性研究[J]. 电力自动化设备, 2017, 37(3): 191-196.
- [8] 宋璇坤, 闫培丽, 肖智宏, 刘东伟, 李永兵. 全光纤电流互感器技术应用评述[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(8): 149-154.
- [9] 李登云, 雷民, 熊前柱, 等. 数字量输出型直流电压互感器的误差特性分析[J]. 现代电子技术, 2018, 41(4): 119-123.
- [10] 周凯. 外电场对电容式电压互感器误差特性影响研究[D]: [硕士学位论文]. 重庆: 重庆大学, 2016.
- [11] 张杰, 胡媛媛, 刘飞, 姚翔宇, 姚俊. 高压直流互感器现场校验关键技术[J]. 高电压技术, 2016, 42(9): 3003-3010.
- [12] 杨玲君, 周冬旭, 徐志超. 电容分压型电子电压互感器的特性研究[J]. 电力自动化设备, 2012, 32(8): 71-74.
- [13] 宋涛, 冯泽虎. 高精度 Rogowski 线圈电流互感器技术研究[J]. 仪器与设备, 2019, 7(4): 212-222.



- 
- [14] 李振华. 高压组合型电子式电流/电压互感器[D]: [硕士学位论文]. 武汉: 华中科技大学, 2011.
- [15] 宋涛. 倒立式 SF6 同轴电容高压电子式电压互感器[J]. 高电压技术, 2012, 38(8): 1917-1923.
- [16] 唐登平, 郑欣, 等. 直流电子式电压互感器的误差特性分析[J]. 电测与仪表, 2021, 58(2): 107-111.
- [17] 徐长宝, 高吉普, 鲁彩江, 王宇, 汤汉松. 光学电子式电压互感器暂态特性及其测试技术研究[J]. 电测与仪表, 2016(4): 84-89.
- [18] 李伟, 樊博, 陈勉舟, 梅华, 张灏, 张浩森. 220 kV 电子式电压互感器带电校验系统研究[J]. 电测与仪表, 2017, 54(21): 122-128.
- [19] 丁涛, 徐二强, 武宏波, 等. 电子式互感器现场误差测试与问题分析[J]. 电测与仪表, 2011, 48(4): 36-39.
- [20] 宋涛. 地电位供电型电子式电流互感器的设计[J]. 电测与仪表, 2012, 49(5): 80-84.
- [21] 吴涛, 周有庆, 曹志辉, 彭红海. 新型电子式电压互感器及其误差分析[J]. 电网技术, 2010, 34(4): 209-213.
- [22] 池立江, 颜语, 袁亮. SF6 气体压力对同轴电容电子式电压互感器的影响[J]. 电力电容器与无功补偿, 2013, 34(1): 61-64.
- [23] 刘延冰, 李红斌, 叶国雄, 等. 电子式互感器原理、技术及应用[M]. 北京: 科学出版社, 2009: 129-139.
- [24] IEC60044-8. 电子式电流互感器[S]. 2002.
- [25] IEC60044-7. 电子式电压互感器[S]. 1999.