

电阻型分压器高压测试精度改进研究

王震 董健年 张军

(南京理工大学 能源与动力工程学院 南京 210094)

摘要: 采用电阻型分压器作为电压转换装置测量含静态过程以及动态阶跃过程的高压时,信号的高测量精度是高压测试的重要指标,而分压器高压臂电阻是影响测量精度的关键因素之一。提出使用低额定功率的电阻构成分压器装置以提高电压测试精度,并仿真了分析不同散热方式、不同绝缘介质条件下高压臂电阻温度变化情况,根据仿真结果提出通过主动冷却的方式降低电阻的初始温度,从而解决选择低功率电阻时的高温问题。实验结果表明,使用解决了高温问题的低功率电阻构成分压器可有效提高电压测量精度。

关键词: 电阻;高压;散热;测试

中图分类号: TM835.1 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 470.4017

Study of test precision improvement of high voltage with resistive divider

Wang Zhen Dong Jiannian Zhang Jun

(School of Energy and Power Engineering, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China)

Abstract: The high voltage arm resistance is a key factor to test accuracy when using a resistive divider as a voltage converter to measure high voltage which contain static and dynamic step, and the high measurement accuracy of the signal is an important indicator of the high-voltage test. This paper proposed the low-rated power resistor formed a divider to improve the accuracy of voltage test, and analyzing temperature changes under different cooling mode and different insulating medium. The issue of high temperature when selecting a low resistance be solved by reducing the initial temperature of resistance through active cooling. The experimental results show that the voltage measurement accuracy optimized effectively by using the low-rated power resistor which solved the problem of high temperature.

Keywords: resistor; high voltage; heat dissipation; test

1 引言

在测量兼顾动态和稳态两种状态的高压时,电阻型分压器因为尺寸相对较小、结构简单,往往被用作电压转换装置将高压信号转换成可以测量的小信号^[1]。由于静态高压部分的电压等级高,会在电阻上产生较大的热功率,通常都会选择额定功率较高的耐高压电阻制作分压器,此时分压器尺寸较大,杂散电容、杂散电感等分布参数对于测试的影响比较严重,采集的信号有失真现象;而选用额定功率较小的电阻会造成分压器装置无法承受测量的高压信号带来的热功率影响。针对电阻型分压器的电阻选择问题,国内外研究人员做了大量的研究。文献[2]通过调整分压器结构以改善选用大功率电阻时的输出响应。文献[3]分析了分压器装置的电阻值以及分布参数对于输出的影响,并提出采用无感电阻的方式获得较好的动态特性。文献[4]在建立分压器等效模型的基础上,通过理论计算设计适用于测

量 ns 级上升沿的电压信号。

虽然国内外关于电阻型分压器的文献较多,但测量的电压信号多是快前沿或是冲击电压,往往只对于输出响应要求较高,本文研究兼顾动态和稳态两种状态的高压信号,在保证测试精度的基础上,还需要兼顾电阻的耐压和高功率特性,与上述文献存在较大差异,在保证分压器可靠工作的前提下,需尽可能的提高测试精度。

2 分布参数对输出的影响

进行高压测试时,电阻型分压器在结构上不单单由高、低压臂的电阻组成,杂散电容、杂散电感等分布参数对输出信号也会造成影响,兼顾分布参数的电阻型分压器集中参数模型如图 1 所示^[5]。

其中 L_1, L_2 表示高低压臂杂散电感, R_1, R_2 表示高低压臂电阻, C_1, C_2 为对地杂散电容。设输入电压信号为 $U_1(t)$, 输出低压信号为 $U_2(t)$, 考虑到 $R_1 \gg R_2$, 可计算出

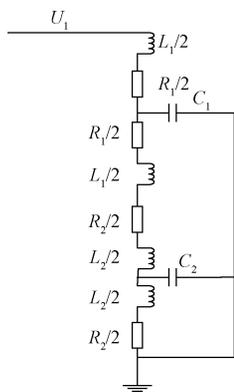


图 1 电阻型分压器集中参数模型

分压器系统的响应时间:

$$T \approx \frac{RC}{6} + \frac{L_1}{R_1} - \frac{L_2}{R_2} \quad (1)$$

由式(1)可知,电路模型中的电阻、杂散电容、杂散电感等参数对分压器系统的响应时间影响严重,而分压器接入电路中作为电压转换装置,电阻值即为下一级输入阻抗值,输入阻抗选取过小会对测量的输入高压信号造成影响,影响测试精度^[6-7],因此通常采取降低杂散参数的措施以优化输出响应,分布参数与电阻的尺寸呈正相关,可选择额定功率较小的电阻以减小尺寸。在分压器装置接入电路过程中,高压臂电阻两端承受热功率为:

$$P = \frac{U^2}{R} \quad (2)$$

由式(2)可知,当采用额定功率较小的电阻作为高压臂电阻时,由于电阻的尺寸较小,热量集中在电阻上容易造成电阻温升过高,一方面温度升高会改变电阻率,从而使分压器的分压比改变;另一方面当温度超过高压电阻的正常工作温度时,会造成分压器装置无法继续使用,因此在选用小额定功率电阻构成分压器装置时必须考虑如何解决电阻的高温问题。

由于玻璃釉膜电阻耐压高,绝缘特性好的工作特点,通常被用以高压测试,基于上述假设,选取阻值 100 kΩ/10 W 的玻璃釉膜高压电阻在静态高压 5 kV,通电时间 5 s 情况下进行电热耦合仿真,未进行散热处理的电阻温度分布情况如图 2 所示,进行散热处理前,高压电阻在 5 s 的通电时间内温度达到 85.37 °C,超过玻璃釉膜电阻的正常工作温度(-55~70 °C),导致电阻无法正常工作,因此应采取措施解决电阻的高温问题。

3 不同散热方式下电阻温度场仿真

结合电阻的正常工作温度以及热量产生方式,其传热方式主要包括热传导、热对流两种。

3.1 分压器装置的热对流

当绝缘介质选择流体(气体或液体)时,对流换热交换

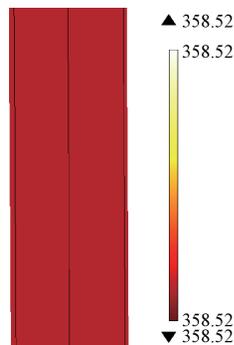


图 2 散热前电阻温度分布

热流量能力可以通过牛顿冷却定律来表示^[8]:

$$q = hS\Delta T \quad (3)$$

式中: h 表示电阻表面与流体之间对流换热系数, S 是垂直热流方向的换热面积,单位为 m^2 , ΔT 是电阻表面与流体之间的温度差。当采用流体作为绝缘介质进行对流散热时,强制对流的散热效果明显强于自然对流^[9],分别采用不同对流换热系数的绝缘材料进行仿真,散热装置设定为半径 4 cm,高 20 cm 的空心圆柱体,圆柱材料为环氧树脂,内部填充不同绝缘介质,结果如图 3、图 4 所示。

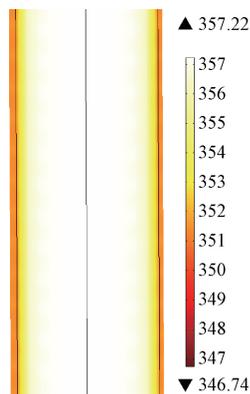


图 3 空气强制对流(10 m/s)时温度云图

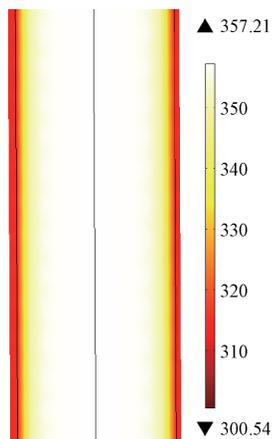


图 4 变压器油强制对流(10 m/s)时温度云图

在设定绝缘介质为空气,流速 10 m/s 情况下,电阻内最高温度达到 84.07 °C,电阻表面温度为 73.59 °C,电阻温度较热处理前下降不明显;而在流体流速相同情况下,填充变压器油为绝缘介质时,电阻内部最高温度为 84.06 °C,电阻表面温度为 27.39 °C。对比图 3 和图 4 温度云图的温度分布情况,采用散热性能更好的变压器油作为散热介质对于电阻表面温度影响明显,但对于电阻内部的温度值以及温度分布情况影响不大,电阻内部各处的温度分布均匀,几乎没有差异。

3.2 分压器装置的热传导

热传导主要发生在绝缘介质为固体的情况下,传递热量的能力可以通过傅里叶定律表达^[10]:

$$q = -kS \frac{dT}{dr} \quad (4)$$

式中: k 是绝缘介质的导热系数,单位是 $W/(m \cdot k)$, S 为导热面积,单位是 m^2 。分别选取不同导热系数的固体绝缘材料进行数值仿真,仿真结果如图 5、图 6 所示。

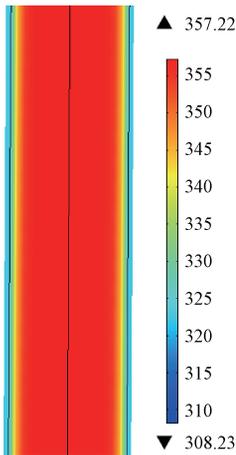


图 5 绝缘介质为硅橡胶时温度云图

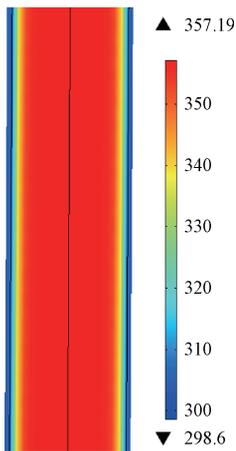


图 6 绝缘介质为导热硅脂时温度云图

在散热装置中填充硅橡胶进行热传导时,电阻内部最

高温达到 84.07 °C,电阻表面温度为 35.08 °C;绝缘介质为导热硅脂时电阻内部最高温度与采用硅橡胶时相近,表面温度达到 25.45 °C,接近通电前的初始温度。

通过对不同介质、不同散热方式的仿真效果对比可知,外部散热介质的散热能力对于电阻表面的温度影响比较严重,但对于电阻内部的温度分布及温度值影响不大。造成这一现象的主要原因是玻璃釉膜电阻本身的材料传热效果不理想,在较短的时间内传热量很小,使得电阻内部的温度分布均匀,且与电阻表面温差较大,通过散热设计控制温升难以满足设计要求,考虑到玻璃釉膜电阻的工作温度范围较广($-55 \sim 70$ °C),可以通过降低电阻初始温度的方法,在电阻温升不变的情况下,解决低额定功率电阻的高温问题。设定电阻初始温度为 273.15 K,仿真结果如图 7 所示。

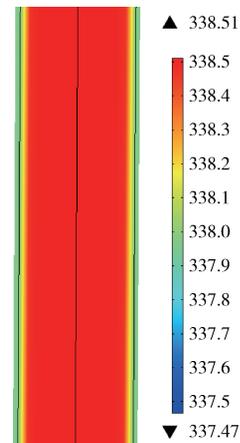


图 7 通电前进行电阻冷却的温度云图

在降低电阻初始温度的条件下,电阻内部最高温度降为 65.36 °C,满足玻璃釉膜电阻的工作要求。

4 实验设计与分析

考虑到电阻承受高压时间较短,测温器件的频响时间对于测试结果影响较大,因此使用频率响应时间低于 1 s 的贴片式 K 型热电偶作为温度传感器^[11-12]。实验前采用零点补偿的方法对 K 型热电偶进行标定,标定结果如图 8 所示,从图中可以看出测试值与理论值具有较好的吻合度,满足实验要求。

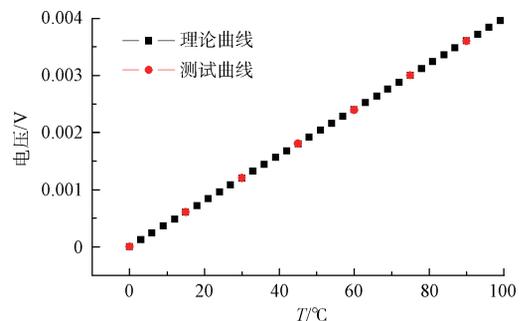


图 8 K 型热电偶温度—电压标定图

将用于温度测试的K型热电偶固定于电阻侧面、顶面以及底面3个温度测试点,为保证热电偶出线端的环境温度不会对电阻的温度场造成影响,采用胶封的方式进行保温处理,热电偶外部接线端与开关装置相连接,通过开关装置与Agilent数据采集仪形成测温电路。

实验前采取主动冷却的方式降低电阻初始温度到 0°C ,分压器装置测量幅值 5 kV ,静态高压时间 5 s 的阶跃高压信号,在电阻承受静态高压过程中,为防止温度测试仪因电压等级过高导致损坏,此时保持开关系统处于断开状态,而在高压信号变为过渡过程瞬间,闭合开关系统,启动温度采集系统测量电阻表面的温度,电阻外部测点实际温度如表1所示,实测结果与仿真结果基本相符。

表1 实测电阻温度对比表

外侧点	侧面	顶面	底面
实测温度/ $^{\circ}\text{C}$	64	65	64

实验结果表明通过降低电阻初始温度的方法可有效解决电阻高温问题,为选择小额定功率电阻构成分压器装置提供了条件。

分别采用 $100\text{ k}\Omega/10\text{ W}$ 和 $100\text{ k}\Omega/50\text{ W}$ 的玻璃釉膜电阻制作分压比 $1\ 000:1$ 的分压器,用以测量幅值 5 kV 的阶跃高压信号,使用Tektronix TPS 2014型隔离通道数字存储示波器采集分压器输出端的电压信号,测量结果对比如图9所示。

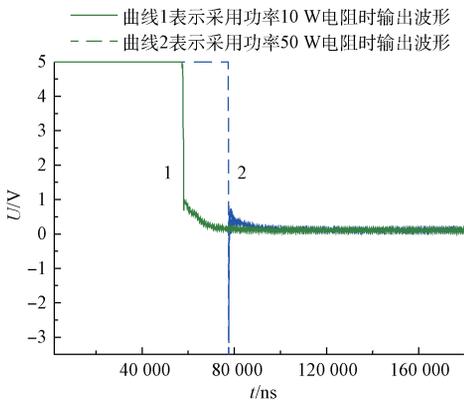


图9 选用不同额定功率电阻输出波形对比

实验结果表明,在解决电阻高温问题的前提下,采用小额定功率电阻构成分压器对于提高含静态以及动态过程高压的测试精度具有重要意义。

5 结 论

对用电阻型分压器作为电压转换装置时的输出进行理论计算,分析分布参数对于电压测量精度的影响。

提出采用小额定功率电阻作为分压器高压臂电阻的方式减小分压器尺寸以优化输出波形,并通过仿真分析了在

不同散热方式、不同绝缘介质条件下高压电阻的温度分布情况,根据仿真结果提出降低电阻初始温度的方法以解决高温问题。

经实验验证,通过冷却手段降低电阻的初始温度可有效解决小额定功率电阻的高温问题,且采用小额定功率的电阻构成分压器装置对于输出波形有明显优化提高,这一方法为提高含静态、动态两部分电压的测量精度提供了基础。

参考文献

- [1] 胡景森,陈炜峰. 纳秒高压脉冲电阻分压器的结构优化[J]. 高压电器,2011,47(1):86-90.
- [2] 曲忠旭,陈炜峰,刘伟莲. 高压纳秒脉冲电阻分压器的结构[J]. 电子测量技术,2009,32(11):23-26.
- [3] 郭晓阳,张楠,程宝山. 一种用于测量冲击高电压的电阻分压器的设计[J]. 电子科技,2015(18):1.
- [4] 马连英,曾正中,安小霞,等. 一种用于测量快前沿高压脉冲的电阻分压器[J]. 电工电能新技术,2010,29(1):58-61.
- [5] 王雅丽,毛晓慧,邵葵,等. HL-2A型受控核聚变装置高压电源用脉冲分压器的设计[J]. 高电压技术,2012,38(4):971-977.
- [6] 刘兆庆,张洋,彭喜元. 一种低速隔离A/D前端模拟通道设计[J]. 电子测量技术,2012,35(7):81-83,99.
- [7] 徐立松,李佩凤,葛川,等. 高精度DA电路的设计与实现[J]. 国外电子测量技术,2014,33(12):21-25.
- [8] ZHANG Q C, SIMKO T M, DEY C J, et al. The measurement and calculation of radiative heat transfer between uncoated and doped tin oxide coated glass surface[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 1997, 40(1):61-71.
- [9] WU X D, WU J S, WANG Z. The variation of electrical resistance of near stoichiometric NiTi during thermo-mechanic procedures[J]. Smart Materials and Structures, 1999(8):574-578.
- [10] 刘彬,黄德祥. 高压精密直流电阻分压器散热设计[J]. 高压电器,2011,47(2):31-33.
- [11] 王欢,黄晨. 高精度无线环境温湿度测量系统设计研究[J]. 电子测量与仪器学报,2013,27(3):211-216.
- [12] 方立德,张计科,王农,等. K型热电偶动态响应特性研究[J]. 电子测量技术,2010,33(11):18-20.

作者简介

王震(通讯作者),1992年出生,在读硕士研究生,研究方向为电力电子与电力传动。

E-mail: absunt19920424@163.com

董健年,1959年出生,研究员,主要研究方向为脉冲功率源技术。

E-mail: njustdong801@163.com

张军,1969年出生,副研究员,主要研究方向为智能建筑、监测监控和分布式控制系统。

E-mail: zhtell800@163.com