

非线性电阻交流参数测试系统的研制

孙 伟, 姚学玲, 陈景亮, 徐传骧

(西安交通大学电气学院, 西安 710049)

Development of AC Parameters Measurement System for Nonlinear Resistance

SUN Wei, YAO Xueling, CHEN Jing-liang, XU Chuan-xiang

(School of Electrical Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

摘要: 基于函数发生器 MAX038、通用乘法器 AD734、具有 A/D 和 D/A 端口的数据采集卡及计算机, 实现了交流高压电源可自动调节的非线性电阻交流参数测试系统, 可自动测试非线性电阻给定电流条件下的交流 U_{1mA} , $U_{100\mu A}$, $U_{10\mu A}$ 等参数, 以及给定交流电压条件下的全电流 I_o 、阻性电流 I_r 。用于测试系统中的交流高压电源, 输出的正弦波电压范围为 0~15 kV, 谐波分量小于 1.5%。采用谐波分次补偿法求取非线性电阻的阻性电流, 测试精度和 Heithley191 高精度数字万用表相比较, 偏差小于 1%。测试系统可用于非线性电阻的交流参数自动化测试, 具有较高的测试效率和测量精度。

关键词: 自动调节; 交流高压电源; 非线性电阻;
交流参数测试

中图分类号: TM83 文献标识码: A

Abstract: AC parameters measuring system of nonlinear resistances, which can adjust AC power source automatically, is developed, based on function generator MAX038, general multiplication AD734, data collecting card and computer with A/D and D/A port. The system can be used to measure AC parameters of nonlinear resistances, i.e. U_{1mA} , $U_{100\mu A}$, $U_{10\mu A}$ and I_o (total leak current), I_r (resistive current). The AC voltage output range from 0 V to 15 kV, and the harmonic value is less than 1.5%. Adopting the harmonic compensative technique, I_r can be measured, and compared with Heithley191 of high accuracy (0.1%), the measuring deviation is less than 1%. Therefore, this measuring system has higher efficiency and precision.

Key words: auto adjusting; AC high voltage source;
nonlinear resistance; AC parameters measurement

0 引言

氧化锌电阻片是高、低压防雷器的主要非线性

器件, 对其性能的测试项目包括浪涌冲击、交流参数和直流参数等, 在进行交流参数测试时, 主要测试方法有两种: ①给定交流电流下的电压参数 U_{1mA} , $U_{100\mu A}$, $U_{10\mu A}$ 的测试; ②给定交流电压下全电流 I_o 、阻性电流 I_r 的测试^[1]。目前对于非线性电阻的交流参数测试方法主要采用手动升压法, 效率与准确度低, 而且不能满足大规模生产中自动测试的需要。

文[2]介绍了一种非线性电阻交流参数测试系统, 其中采用了脉宽调制器 TL494 进行输出电压的自动调压。受 TL494 本身器件特性的影响, 输出的交流电压幅值变化范围和线性度受到一定限制。对于额定电压较低而 U_{1mA} 较大的非线性电阻, 这种电源的缺陷比较明显。笔者采用高精度函数发生器 MAX038 和通用乘法器 AD734 实现测试系统中交流高压电源的输出电压调节。采用这种方法设计的交流高压电源, 输出的电压调节范围宽, 电压幅度变化具有良好的线性度, 输出电压波形的谐波分量小, 为提高非线性电阻交流参数测量精度提供了条件。它和计算机及其它单元组成的非线性电阻交流参数测试系统, 提高了交流参数测试效率与精度, 可以满足大规模生产需要。

1 交流高压电源

1.1 交流高压电源的组成结构

交流高压电源为非线性电阻的交流参数测试提供测试信号, 它的精度对参数测试精度起到关键作用。自动调节交流高压电源组成结构框图见图 1。

以 MAX038 为核心的正弦波发生器, 用来产生 50Hz 工频正弦波信号; 控制信号由计算机给出, 经过数据采集卡输出, 作为信号处理电路的电压调整信号, 通过改变控制信号的大小, 可以改变信号处理

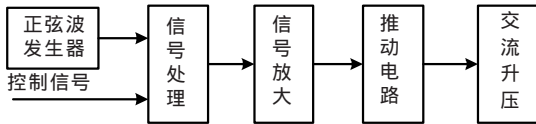


图 1 自动调节交流高压电源原理框图

电路的输出电压幅度;由 AD734 组成的信号处理电路,将正弦波信号和来自计算机的控制信号进行算术乘法运算,使正弦波信号的幅度与控制信号量成线性比例关系;信号放大电路将信号处理电路给出的小电压信号进行放大,使信号电压达到一定的幅值。经过信号放大电路输出的交流信号,在电压幅值和带负载能力上还不能满足非线性电阻交流参数测试的需要,推动电路将信号进行功率放大,提高电路驱动能力;经功率放大后的信号经过工频升压变压器升压,得到可以满足非线性电阻交流参数测试需要的交流高压电源。

1.2 工频正弦波信号的产生

工频正弦波信号由 MAX038 为核心组成的信号发生器产生。MAX038 是一种通用函数发生器芯片,可广泛应用于波形的产生、压控振荡器、脉宽调制器、频率合成器、及 FSK 发生器等^[3-4]。MAX038 具有工作频率范围宽(0.1 Hz~20 MHz)、正弦波失真度小(0.75%)、输出阻抗低(0.1 Ω)以及频率温度漂移小(200 ppm/°C)等特点^[5],利用它可以产生精度较高的 50 Hz 的工频交流信号,而且具有很小的谐波分量。由 MAX038 组成的 50 Hz 正弦波信号发生器基本电路原理图见图 2。

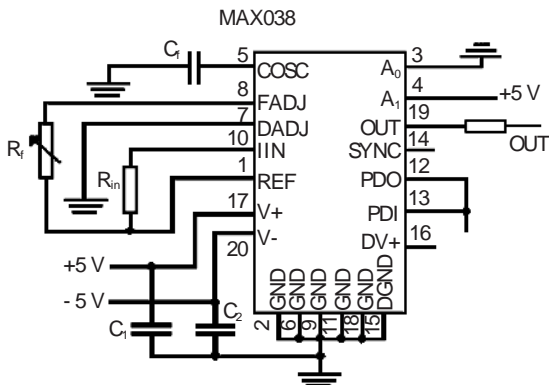


图 2 正弦波发生电路

MAX038 内部具有松弛型振荡器,通过恒流源对电容 C_f 进行周期性的充电、放电,产生所需频率的波形。充电、放电电流大小主要由 IIN 端输入电流控制,同时受到 FADJ 端电压影响。注入 IIN 引脚的电流大小可以在 2~750 μA 之间变化,由此引起的输出信号频率变化在 20 倍左右,可以作为频率粗调。加在 FADJ 引脚的电压可以在 $\pm 2.4\text{V}$ 之间变化,产生偏移中心频率 $\pm 70\%$ 左右的变动,起到频率微调作用。MAX038 具有内部参考电压源,可以产生稳定的 2.5 V 参考电压。因此,一旦 C_f 确定,只需改

变电阻 R_f, R_{in} 的大小,就可以精确得到所需频率。

当 FADJ=0 时,输出频率由下式给出^[5]:

$$f_o = I_{in} / C_f \quad (1)$$

$$I_{in} = V_{REF} / R_{in} \quad (2)$$

其中: f_o 单位为 MHz; I_{in} 单位为 μA ; C_f 单位为 pF; V_{REF} 单位为 V; R_{in} 单位为 Ω 。一旦中心频率由 I_{in}, C_f 设定之后,精确的频率可以通过调整 R_f 来实现。

对于固定频率的使用(本文使用固定频率 $f=50\text{Hz}$),应当将 I_{in} 的数值设置在 100 μA 左右。在这种情况下,MAX038 内部的振荡电路将具有最小的温度系数和最小的温度漂移。因此,在 $I_{in}=100\mu\text{A}, f=50\text{Hz}$ 情况下,根据式(1)得:

$$C_f = I_{in} / f_o = 2 \times 10^6 \text{ pF}$$

根据公式(2)得:

$$R_{in} = V_{REF} / I_{in} = 25 \text{ k}\Omega$$

MAX038 是一种多波形发生器,可以产生 3 种波形:正弦波、矩形波、三角波。通过它的地址输入端 A_0, A_1 来选择需要的输出波形。具体选择方法见表 1。对于系统要求的正弦波信号波形,只需将 A_0 接地、 A_1 接数字+5 V 电源即可。

表 1 输出波形选择

A_0	A_1	波形
X	1	正弦波
0	0	矩形波
1	0	三角波

1.3 交流高压电源的产生

图 1 所示交流高压电源结构图中,控制信号用来控制输出交流高压的幅度。为了使输出交流高压电源的输出电压 U_o 随控制信号电压大小线性变化,在信号处理电路中使用了通用乘法放大器 AD734,电路原理图见图 3。

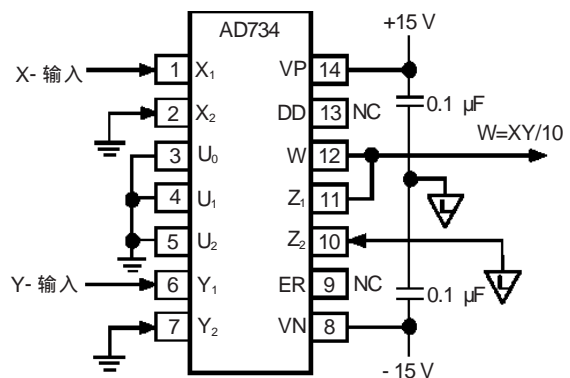


图 3 AD734 电路原理图

AD734 的输入信号有两个:一个是正弦波信号 X,来自 MAX038 组成的正弦波信号发生器,根据 MAX038 芯片特性,它的最大输出电压幅值为 $2V_{pp}$;另一个是输出电压控制信号 Y(6 脚),由计算机给出。根据 AD734 的工作特性,信号处理电路的输出信号 W 为:

$$W=(X \times Y)/10 \quad (3)$$

式(3)中, 设定正弦波电压 X 为定值, AD734 的输出电压 W 将随控制电压 Y 线性变化。受数据采集卡 D/A 输出电压范围限制, 控制电压 Y 的变化范围为 $0 \sim 10 \text{ V}$, 由式(3)可知, 电压 W 最大值受 X 值限制, 当 X 设定在 $2 V_{pp}$ 时, W 的变化范围在 $0 \sim 1 \text{ V}$ 。信号放大电路选用 CA3140, 它具有很好的频率响应, 电路的电压放大倍数设定为 10 倍, 因此, 输出电压范围达到 $0 \sim 10 \text{ V}$ 。采用功率运放 OPA544 作为升压变压器的功率推动, 设定其电压放大倍数为 3 倍, 功率推动级的输出电压范围达到 $0 \sim 30 \text{ V}$, 最大输出电流 3 A。OPA544 在 3 倍放大倍数下, 频率可达 100 kHz。因此, 如果采用不同频率规格的输出升压变压器, 利用笔者的电路设计, 就可以得到不同频率下的自动调节高压电源。笔者选用 1 500 的工频交流升压变压器, 交流高压电源输出电压可以达到 15 kV, 完全满足非线性电阻交流参数测试的需要。

对交流高压电源的输出信号进行采样, 并进行频谱分析, 表 2 为频谱分析结果。

表 2 交流高压电源输出电压信号的频谱分析

谐波次数	谐波比例关系
1	1
3	0.012 8
5	0.002 0
7	0.001 6

频谱分析表明, 交流高压电源输出的正弦波信号中 3 次以上的谐波分量所占的比例很小, 这对于提高交流参数的测试精度十分有益。

2 测试系统组成

在计算机控制下, 交流高压电源输出电压可以按照要求自动调节, 结合测试信号的数据采集, 构成非线性电阻交流参数自动测试系统, 其组成结构框图见图 4。

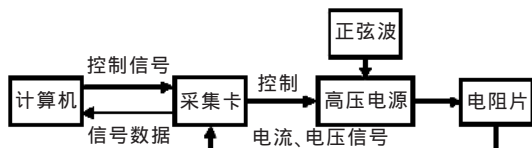


图 4 测试系统组成结构框图

由计算机给出的数字量控制信号, 经过数据采集卡中的 D/A 转变为模拟控制量, 用来控制交流高压电源输出电压的大小; 同时, 数据采集卡将反馈回来的电压、电流测量信号经过 A/D 变换后, 由计算机进行数据处理和数据管理。测试系统的运行过程由计算机控制, 实现参数测试过程的自动化。

非线性电阻的交流参数测试分为两种情况:

- ①规定交流电压下的交流电流参数, 包括全电流 I_0 、阻性电流 I_r 等;
- ②规定电流下的电压参数, 包括 $U_{10 \text{ mA}}$, $U_{100 \text{ }\mu\text{A}}$, $U_{10 \text{ }\mu\text{A}}$ 等。非线性电阻交流参数自动测试流程见图 5。

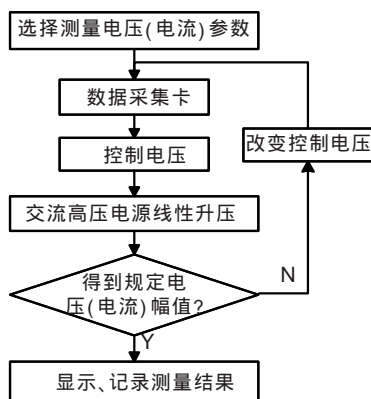


图 5 非线性电阻交流参数自动测试流程图

3 交流参数测试

3.1 阻性电流测量方法

对非线性电阻施加一定幅值的交流电压, 此时流经非线性电阻的泄漏电流称为全电流。全电流有两个分量: 容性电流分量和阻性电流分量。对于非线性电阻交流参数中阻性电流的测试方法较多, 有谐波法、变系数补偿法和多元补偿法等^[6-8]。笔者在变系数补偿法的基础上, 采用谐波分次补偿法求取非线性电阻的阻性电流。谐波分次补偿法的原理是: 有功损耗由同施加电压同方向的阻性电流产生。因此, 可以将施加电压和全电流信号进行 DFT (离散傅里叶分解) 变换, 然后将全电流分解为垂直于电压的分量和与电压平行的分量, 垂直于电压的电流分量不作功, 将其完全补偿得到的便是与电压同相位的作有功损耗的阻性电流分量。图 6 为三次谐波电流补偿矢量图。

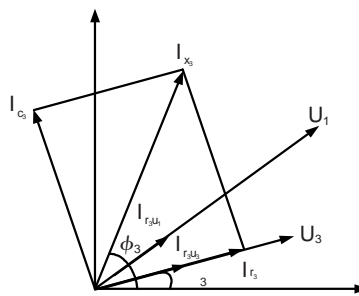


图 6 三次谐波电流补偿矢量图

图 6 中, U_1 为施加电压的基波分量, U_3 为施加电压的三次谐波; I_{03} 为全电流的三次谐波; I_r 为实际的阻性电流三次谐波; I_{r3u1} 为基波电压产生的阻性电

流三次谐波; I_{r3} 为施加电压三次谐波产生的阻性电流三次谐波; I_{c3} 为实际应补偿的三次容性电流; ϕ_3 , ϕ_3 分别为全电流和施加电压三次谐波的幅角。

由于垂直于三次谐波电压的容性电流 I_{c3} 不作功, 将其补偿后, 便可得到与施加电压三次谐波同相位的阻性电流分量 I_{r3} 。

具体求法如下:

$$A_k = I_{xk} \sin(\phi_k - \phi_k) / U_k, \quad k=1, 3, 5, \dots \quad (4)$$

$$i_{c_k} = A_k + U_k \sin(k t + \phi_k + \pi/2) \quad k=1, 3, 5, \dots \quad (5)$$

由式(4)和式(5), 可得阻性电流计算公式:

$$i_r = i_x - i_{c_k} \quad (k=1, 3, 5, \dots) \quad (6)$$

3.2 交流参数测试对比实验

为了考核非线性电阻交流参数测试系统, 构建了图 7 所示的试验电路, 图中: R, C, R_1 组成非线性电阻等效电路, 试验时, 取 R, C 均为线性电阻和线性电容, 取样电阻 R_1, R_2 为精度 0.1% 的精密电阻(其阻值远远小于 R 和 C 的阻抗), R_1 为阻性电流取样电阻; R_2 为全电流取样电阻; PT 为变比精度为 0.5% 的电压互感器, 对施加在试品两端的电压信号进行取样。

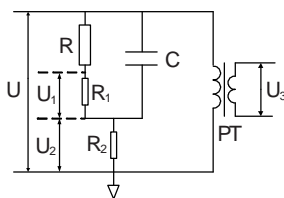


图 7 试验电路

采用精度为 0.1% 的 Heithley191 高精度数字万用表与笔者研制的测试系统进行对比测量; 万用表直接测量取样信号, 测量结果作为电压和电流有效值的真值, 施加电压和阻性电流有效值的乘积作为功率损耗的真值。对比测量结果见表 3。所有试验数据均为连续测量 3 次结果的平均值。

表 3 中, I_x 为全电流; I_r 为阻性电流, I_{max} 为阻性电流峰值; U 为施加的交流电压有效值; P 为非线性电阻的功率损耗。

表 3 的测量数据表明: 所研制的交流参数测量系统可以用于非线性电阻交流参数测试, 其中施加电压、全电流、阻性电流的测试结果和 Heithley191 高精度数字万用表的测量结果相比, 偏差小于 1%。

4 结语

由 MAX038, AD734 和升压变压器组成的工频高压电源, 具有良好频率稳定性, 输出电压的升压、

表 3 非线性电阻交流参数测量结果

序号	参数	真值	测量值	误差/%	实验条件
1	U/V	1 021.98	1 014.19	0.76	I_{max} 0.1 mA R=15.203 M C=127.3 pF
	I_x /mA	0.078 7	0.078 5	0.25	
	I_r /mA	0.0669	0.066 6	0.44	
	P/mW	68.33	67.84	0.72	
2	U/V	3 169.06	3 158.51	0.33	I_{max} 0.3 mA R=15.203 M C=127.3 pF
	I_x /mA	0.246 6	0.247 2	0.24	
	I_r /mA	0.208 1	0.209 5	0.72	
	P/mW	659.48	661.68	0.33	
3	U/V	2297.52	2304.98	0.32	I_{max} 1 mA R=3.225 M C=127.3 pF
	I_x /mA	0.7155	0.7139	0.22	
	I_r /mA	0.7066	0.7050	0.23	
	P/mW	1.623	1.628	0.31	
4	U/V	2200.78	2210.47	0.44	I_{max} 3 mA R=0.992 M C=127.3 pF
	I_x /mA	2.1246	2.1195	0.24	
	I_r /mA	2.1265	2.1174	0.43	
	P/W	4.680	4.637	0.92	

降压具有良好的线性度, 其谐波分量小于 1.5%。在可自动调节的高压交流电源的基础上, 研制出了非线性电阻交流参数测试系统, 该系统可自动测试非线性电阻在给定交流电流下的电压 $U_{1mA}, U_{100\mu A}, U_{10\mu A}$ 和给定交流电压下的全电流 I_x 、阻性电流 I_r 等参数; 还可采用谐波分次补偿法测量非线性电阻的阻性电流。该系统的测试结果和 Heithley191 高精度数字万用表测量结果相比, 偏差小于 1%; 该系统可应用于非线性电阻的大规模生产过程中, 具有较高测试效率和测量精度。

参考文献:

- [1] GB 11032-2000. 交流无间隙金属氧化物避雷器[S].
- [2] 姚学玲, 陈景亮. 自动调节的交流高压电源[J]. 高电压技术, 2003, 29(11): 55-56
- [3] 曾杰, 马渊, 熊小亮, 等. 单片高频信号发生器 MAX038 及其应用[J]. 电子与自动化, 1996(6): 30-33.
- [4] 张吉玲, 张晴. MAX038 及函数信号发生器[J]. 南昌大学学报, 2000, 24(4): 350-355.
- [5] 美国 MAXIM 公司. MAX038 产品使用手册[K]. 2001.
- [6] 周龙, 文远芳, 詹琼华, 等. 金属氧化物避雷器运行状态监测中的变系数补偿法和电阻片性能诊断方法的研究[J]. 电工技术学报, 1998, 13(6): 21-25.
- [7] 唐炬, 张新强, 孙才新, 等. 金属氧化物避雷器阻性电流检测的多元补偿法研究[J]. 高电压技术, 1999, 25(1): 36-41.
- [8] 周龙, 陈继东, 文远芳. 氧化锌避雷器阻性电流的谐波分析[J]. 华东电力, 1997(7): 44-45.

欢迎投稿! 欢迎订阅! 欢迎评刊! 欢迎刊登广告!