

基于 Matlab 的绝缘材料电气性能测试系统设计

雷 霆¹, 闫国兵², 钟力强¹, 王流火², 王 柯¹

(1. 广东电科院能源技术有限责任公司, 广州 510080;

2. 广东电网有限责任公司, 广州 510080)

摘要: 针对传统的绝缘性能测试仪存在功能单一和无法兼容频域介电响应等新方法的问题, 通过选用常见设备, 设计了一套基于 Matlab 绝缘材料电气性能测试系统; 该系统利用前置滤波器消除了频率响应函数对系统输出的不利影响, 使系统不仅拥有常规的直流跟工频检测功能, 也具备在 50 Hz~1 kHz 频率范围内进行电压试验的能力, 测试时的最高电压能够达到 10 kV; 通过测量试验中流过介质的漏电流, 该系统适用于对被测物的绝缘性能进行综合的评估; 试验结果表明该系统达到了设计指标, 并且能够满足日常工作中的测试需要。

关键词: 绝缘材料; 频率响应; 前置滤波器; 频域介电响应。

A Matlab Based Electrical Property Testing System Design For Insulating Materials

Lei Ting¹, Yan Guobing², Zhong Liqiang¹, Wang Liuhuo², Wang Ke¹

(1. Guangdong Diankeyuan Energy Technology Co., Ltd, Guangzhou 510080, China;

2. Guangdong Power Grid Co., Ltd, Guangzhou 510080, China)

Abstract: A Matlab based electrical property testing system for insulating materials has been developed by selecting common equipment found in the lab in order to tackle the questions found in traditional insulation testers whose function is simple and is incompatibility with new methods such as frequency domain dielectric response. The negative effect of frequency response function bring by the system has been removed by the pre-filter in the signal generation process. Therefore, the system has not only the ability to run the normal DC and fundamental frequency test, but also to carry out the experiment under frequencies range from 50 Hz to 1 kHz. The maximum testing voltage for this system is 10 kV. Together with the measurement of the leakage current, the system is able to evaluate the insulating property of the material under test in a comprehensive way. The test results show that the system has reached the design target and can meet the testing needs of daily work, and achieve the purpose of developing the system.

Keywords: insulation material; frequency response; pre-filter; frequency domain dielectric response

0 引言

绝缘材料一般指的是电阻率特别高的物质, 他能够将物体中的不同电位的带电体分隔开来, 从而起到保护和隔离的作用, 因此在我们日常生活的应用特别广泛^[1]。对于电气设备而言, 绝缘材料不仅是产品先进性的保证, 更是保障其能够安全地、可靠地和稳定地运行的决定性因素。比如常见的配电用干式变压器中, 一次和二次线圈使用了绝缘纸等材料来实现高低电位的隔离。当纸受到了过高的电压时, 部分材料可能会因为周围强电场的影响而析出游

离态的电子, 这类电子如果逐渐聚集起来之后就有可能引发局部放电现象, 严重时可能会导致材料被击穿甚至出现短路现象造成更大的危害^[2-3]。因此, 电气设备的绝缘性能的好坏也决定着电网是否能长期稳定的运行, 任何设备在投入运行前必须要对其的绝缘性能进行必要的检测^[4-8]。通常情况下, 我们会使用绝缘耐压测试仪等专门的仪器来对材料进行绝缘性能试验。不过, 这种专用设备的功能比较单一, 试验只能按照厂家提供的方式进行, 可调节和可更改的参数较少造成扩展性也较差, 特别是该设备无法兼容新兴的绝缘性能评价方法, 比如频域介电响应方法: 在被测材料上施加不同频率的交变电场, 测量试验电压与流过介质的电流产生相位差来对被测物的绝缘性能进行评估^[9-10]。本文通过选用一些在电力试验所常见的仪器与设备, 设计了一套简单易行且操作方便的绝缘材料测试系统。该系统不仅具备对绝缘材料在直流跟工频电压下的常规检测能力, 而且由于添加了能够消除频率响应函数影响的前置滤波器, 系统能够实现对被测物体在不同频率的电压条

收稿日期: 2019-08-06; **修回日期:** 2019-12-13。

基金项目: 线路行走式机器人小型化、轻量化及实用化技术及其在电网维护中的应用研究(GDKJXM2017303)。

作者简介: 雷 霆(1989-), 工程师, 博士, 主要从事绝缘材料检定与测试方向的研究。

闫国兵(1970-), 男, 河南信阳人, 高级工程师, 硕士, 主要从事输变电工程基建管理工作方向的研究。

件下的试验功能。试验结果表明该系统达到了设计指标, 并且能够满足我们在日常工作中的测试需要, 实现了研发该系统的目的。

1 绝缘性能测试方法

1.1 常规绝缘性能测试方法

常规绝缘材料的电气性能测试方法是被测物体处于特定测试条件下, 通过相应的电气试验进行分析, 方便迅速地判别绝缘材料的性能, 可用于类似于品质控制或者类似目的。这项测试主要是用于检测因工艺变更、材料老化或者其他由环境情况引起的绝缘性能相较于正常值的变化或偏离^[4-6]。

一般来说, 绝缘材料的电气性能会随着温度和水分含量而变化, 为提高试验的准确性, 在实验前需要对被测物体进行预处理, 通常的做法是将试样放置在温度为 23 (±2) °C、相对湿度为 50 (±5)% 的标准大气环境中静置不少于 24 小时。

绝缘性能测试时需要注意的试验条件主要有环境条件、试验电极和试验电压信号。

试验的环境条件指的是试验时的温度、气压和湿度等, 选取的试验环境则不应与被测物体发生显著的相互作用为宜。例如电压等级较低的试验, 就可以直接在空气中进行, 而电压等级较高的试验则需要专门的环境中进行 (变压器油), 防止在电极边缘的放电现象对测试的准确性造成比较大的影响。

试验电极应随着被测物体的形状、大小等物理特性而改变, 选取的准则为电极不应改变被测物体周围的电场分布为宜。例如, 对板状或者片状的材料进行试验时, 电极应垂直于材料表面且接触面应光滑和清洁。

试验电压信号是测试时重要的试验条件之一。测试时需选择适当的升压方式, 常见的有快速升压、慢速升压、非常慢速升压以及逐级 (梯形) 升压方式。

1.2 频域介电响应测试方法

频域介电响应 (frequency domain spectroscopy, FDS) 是一种新兴的绝缘状态评估方法。频域介电响应方法是通过对被测物体施加一定频率范围 (通常为 1 mHz~5 kHz 之间频率信号) 内的电压并测量流过介质的电流, 然后计算在不同频率下的复介电常数、介损等参量, 最后得到相应的频谱图, 利用图中的谱线提取出某些特征参数来对被测物体的绝缘状态评估^[9-10]。在 FDS 的试验频率范围以内, 受到外部电场的影响, 介质中会出现如偶极子的极化 (极化过程耗时 $10^{-10} \sim 10^{-2}$ 秒)、空间电荷极化 (极化过程耗时 $10^{-1} \sim 10^1$ 秒) 以及界面极化 (极化过程耗时 $10^{-1} \sim 10^1$ 秒) 等松弛型极化, 被测材料如发生过类似老化降解等现象, 其弛豫特性会产生变化, 相较于正常时会存在一定的偏差。相关研究表明, 复介电常数与电介质的损耗联系紧密。通常, 电介质损耗可根据损耗的特性划分为电导损耗和极化损耗。当介质上所施加的电压频率较高时, 极化损耗会相对增加更多而表现的占优势。在低频区域, 因为介质两

端电极因电场分布而出现累积电荷的现象, 这种现象可称为电极极化, 通常会造成介电常数量值异常高的现象。同时, 低频电压下, 电介质更多的表现为电阻特性, 故电介质的损耗主要是电导损耗。因此, 在低频区域, 考虑在电极极化和电导损耗造成介电常数升高的情况下, 极化损耗不太明显则很容易被噪声所掩盖。综上, 电介质的频域介电响应的测量需要选择合适的频率区间。

2 系统设计

为了满足能够测试绝缘材料的这个目的, 我们所设计的测试系统不仅应具备产生高电压的能力, 而且也能够对试验中的各项参数进行监测以满足不同的测试需求^[11-12]。因为高电压会对设备及其操作人员而言存在比较大的风险, 所以该系统又必须充分考虑针对人员与设备的保护措施。整体的系统设计框图如图 1 所示。

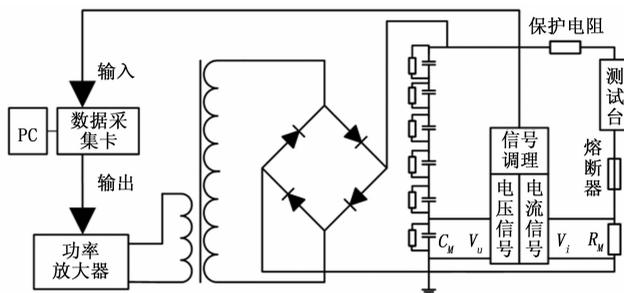


图 1 系统框图

本文所设计的测试系统的主要指标由表 1 所示。

表 1 测试系统

测试信号	电压	频率
≤10 kV	直流, 50 Hz~5 kHz	试验设置
时间	升压方式	0~300 秒
线性, 梯形	测量精度	电压
电流	≤5%	≤0.1 mA

2.1 高电压发生模块

绝缘材料的测试通常是需要对被测物体施加一个较高的电压, 有时也需要将电压维持一段时间来检测该绝缘材料是否能够满足相应的标准^[4-6]。通常, 用于此类试验的电压是直流或工频交流电压, 而常用的升压方式有线性升压与梯度升压等。本文设计的高电压发生模块, 如图 2 所示, 由 Matlab 软件、数据采集输出卡 (DAQ)、功率放大器、升压变压器、整流电路构成。测试信号首先通过 Matlab 软件生成并使用该软件内的工具箱与外置的数据采集卡 (DAQ 板卡) 相连。数字化的测试信号通过 DAQ 完成数模转换后作为模拟输入信号进入功率放大器。随后, 测试信号经过功率放大器进行功率的放大, 再经由升压变压器进行二次升压形成满足试验条件的高压电压。因为绝缘材料的试验电流都是毫安级别, 试验时所需的功率较小, 故一般电压互感器就可以作为升压变压器直接使用。直流高压的生成只需要在互感器后端添加桥式整流电路即可; 互

传感器输出的交流电压在经过桥式整流后输出为脉动的直流电压，只有经过了电容器组的滤波，才能最后得到测试所需要的直流高电压。

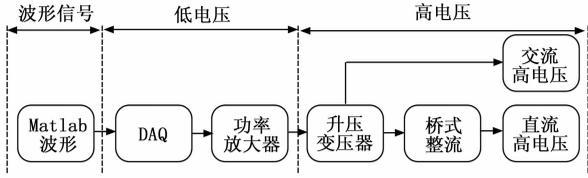


图 2 电压发生模块

以输出直流高电压为例，我们需要使用 Matlab 软件对波形信号进行设置，如式 (1) 所示：

$$y(t) = A_{\max} \sin(\omega t) \cdot f(t) \quad (1)$$

其中： A_{\max} 为输出幅值，取值范围为 0 到 10 kV。正弦波是调用 Matlab 的库函数来实现的，默认频率为工频 50 Hz。 $f(t)$ 为的升压模式的选择：比如线性升压时，该函数为线性函数，使得输出 y 的值按照设置的斜率线性上升；而当选择梯形升压时，该函数可看成分段函数，在各段函数内， y 的值会首先按照斜率线性上升，之后保持稳定，最终实现阶梯式上升的输出电压。

除了在工频电压下的测试之外，利用不同频率的高电压对被测材料的绝缘性能进行评估也有着很重要的意义^[8-10]。不过，随着频率的升高，由于变压器铁芯的励磁电流的不断增加，即使输入的信号的幅值保持不变，系统输出的电压也会不断下降。特别是在信号频率较高时，系统实际输出电压与预想的输出电压会存在比较大的偏差。在不考虑非线性等复杂原因的情况下，这种偏差可以用系统的频率响应函数 (frequency response function, FRF) 来进行解释与消除，如式 (2) 所示：

$$G(j\omega) = \frac{V_{\text{out}}(j\omega)}{V_{\text{signal}}(j\omega)} \quad (2)$$

其中： $V_{\text{out}}(j\omega)$ 为系统输出频谱， $V_{\text{signal}}(j\omega)$ 为输入信号频谱。

由 (2) 式可知，系统输出跟输入信号和频率响应函数有关。因为系统输出的电压会随着频率升高而不断下降，在输入信号幅值不变的情况下，可以得到 $G(j\omega)$ 的幅值在随着频率逐渐下降。但当频率继续升高时，由于变压器的励磁电感可能会与电路中的寄生电容发生谐振，这会导致系统在该频率附近输出幅值很大的电压，即 $G(j\omega)$ 在谐振频率处取得极大值。因此，为了减小系统输出电压所存在的偏差，我们需要利用系统的频率响应函数对 Matlab 信号进行前置滤波处理，如式 (3)^[13]。

$$V_{\text{signal-filtered}}(j\omega) = V_{\text{out}}(j\omega) \cdot G^{-1}(j\omega) \quad (3)$$

其中： $V_{\text{signal-filtered}}(j\omega)$ 为经过前置滤波之后的信号频谱。根据傅里叶变换理论，波形信号对其频谱进行反变换即可，如式 (4) 所示：

$$y(t) = F^{-1}(V_{\text{signal-filtered}}(j\omega)) \cdot f(t) \quad (4)$$

最后，还需要对波形信号的幅值大小进行检查，保证

信号幅值不会超过 DAQ 设备的输出最大值 $V_{\text{DAQ-peak}}$ ，避免产生削顶的情况产生。信号波形需满足的条件如 (5) 所示：

$$\text{MAX} |y(t)| \leq V_{\text{DAQ-peak}} \quad (5)$$

可见，跟直流电压的生成方式不同，交流信号的生成首先要在频域里设计测试信号的幅值与相位等频域信息，然后经过前置滤波器滤波，最后利用傅里叶反变换获得了信号的时域波形数据。对于交流电压信号，采用频域的方式能够较方便的生成各种频率信号，特别是当一个信号含有多种频率成分时，只需要在频域内设置好不同的频率分量的幅值与相位即可。系统最高的输出频率为 5 kHz。

2.2 监测与保护模块

如上文所述，对于试验系统来说，需要测量的物理量为施加在被测物体上的电压以及回路电流。如图 1 所示，对电压和电流的测量分别是采用电容分压器利用电容分压原理获得的低电压信号 V_v 以及测量串联在测试回路中的定值电阻上电压降 V_i 来实现的。电压和电流信号在经过信号调理模块处理之后，传递给 DAQ 设备完成模数转换，最后输入到 Matlab 软件并进行实时地展示与保存。由于试验中被测物体存在随时被高电压击穿的可能性，而击穿后形成的短路电流会对设备，甚至是操作人员带来很大的风险，所以良好的保护功能也在系统设计中占有重要地位。本文主要是通过硬件上和软件上来解决这个问题。首先我们在测量电路中串联了限流电阻，作用就是抑制可能出现的短路电流大小。其次，回路中增加了熔断器，当流过的电流超过熔断器的定值时，熔断器会熔断使电路断路。同时，为了防止绝缘材料在被击穿之后的短路电流对信号采集卡造成危害，系统采用了 AD215 宽频隔离放大器以及信号调理电路来对信号源和 DAQ 设备进行了隔离，如图 3 所示，其中 AD215 采用了同相放大器的连接方式，输出由式 (6) 给出：

$$V_O = (1 + R_F/R_G) \times V_{\text{current}} \quad (6)$$

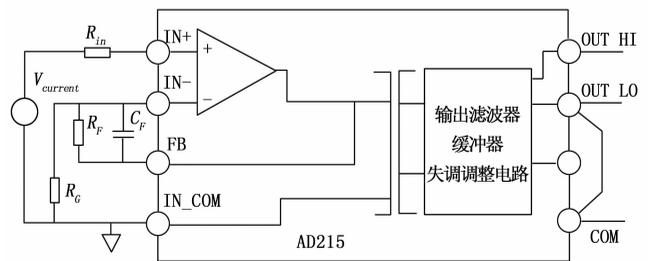


图 3 AD215 隔离放大器电路图

关于测试时的保护功能，该测试系统也通过在软件层面上予以实现。该功能的实现主要就是通过试验时，对电压电流数据进行不间断的实时采集，并对所采集到的数据进行分析，实现测试过程的实时监控。一旦发现有异常情况出现，软件能够自动判断出存在异常并立刻停止测试且保存相关的数据。比如当电流读数上升过快，电流的导数值超过了一定的阈值，测试系统马上抛出异常并立刻停

止测试。

2.3 测试系统的软件设计

测量软件是系统的重要组成部分之一, 它不仅能为用户提供简洁的交互界面, 也对系统的各个功能进行有效的控制, 使整个系统能够安全、高效和稳定地运行。测试系统软件是基于 Matlab 2016B 版本中的 GUI 模块开发, 该模块能够通过添加不同的控件, 并编写相应的响应函数来实现所设计的功能。通过添加 GUI 的显示模块, 软件界面能够在系统运行时, 实时地显示通过硬件采集系统所测量到的电压与电流值, 如图 4 所示。

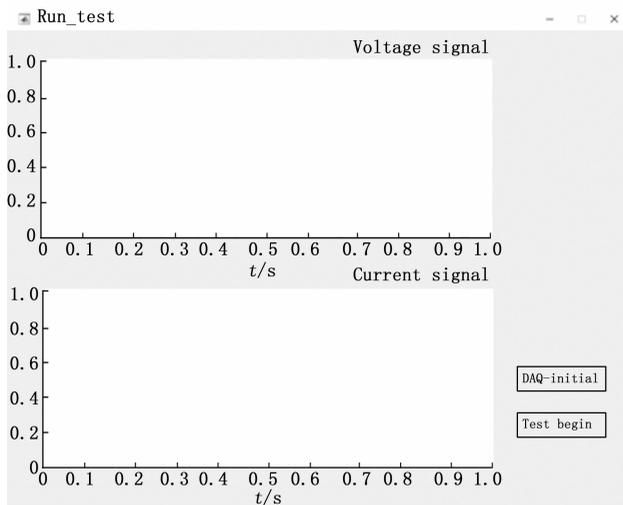


图 4 系统界面

图 5 为配置测试信号的界面, 主要包含输入、输出信号、安全阈值和分压器等参数设置, 能够很方便的让试验人员配置试验时所用的诸如电压等级、测试时长以及电压的频率等测试信号的参数。当在系统软件界面上设置好所有的测试信号参数之后, 启动, 系统就能够按照所设置的测试方案自动进行测试。



图 5 系统设置界面

图 6 为系统运行流程图。可见当程序启动以后, 系统首先会读取设置文档, 并根据该文档信息生成信号的原始频谱。然后, 该信号的原始频谱需要通过表征系统频率响应函数的前置滤波器来进行滤波, 并最终通过傅里叶反变

换得到测试用的 $V_{\text{signal-filtered}}$ 时域信号。测试信号在经过阈值判别成功后开始测试, 否则系统会报错并停止测试。系统会在测试时不断地采集相关的电压和电流数据并实时判断时候是否存在异常直至测试结束。当数据采集完毕后, 系统会对采集的数据进行滤波、分析并最终在界面和弹窗中展示出来。

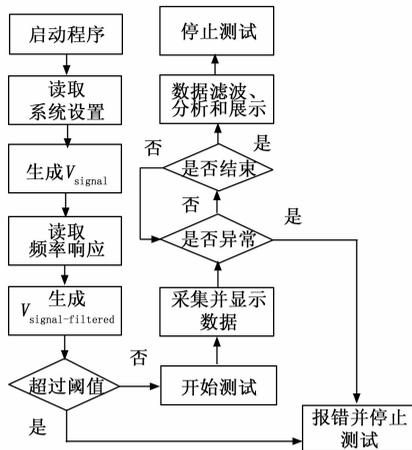


图 6 系统流程图

3 系统测试

为验证本文所搭建的系统性能, 我们使用该系统进行了直流与交流电压的测试。

3.1 直流电压测试

图 7 和图 8 分别为系统对某绝缘材料进行直流电压测试的电压与电流信号波形图。

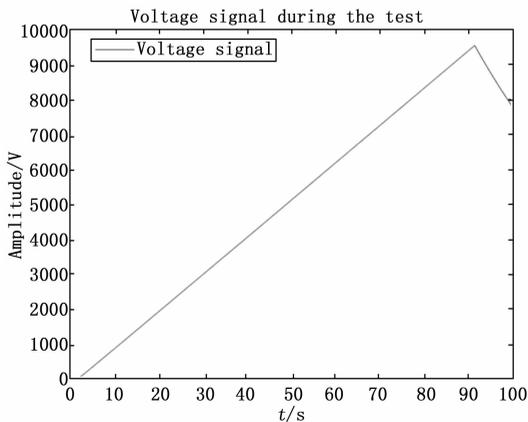


图 7 直流电压测试的电压波形图 (绝缘材料)

由直流电压测试的波形图可知, 系统输出的直流电压能够随着时间而线性的进行升压, 其中输出电压的峰值为 9.5 kV 左右。如图 8 所示, 随着电压的增加, 检测到的泄露电流的幅值也逐渐上升。当系统在 90 s 附近停止电压信号输出时, 由于电容器的作用, 检测到的电压会缓慢下降而不是立刻降低。同时, 由并联电流分流原理, 此时流过绝缘材料的电流几乎为零。

图 9~11 分别为系统对某干式变压器器用绝缘纸进行

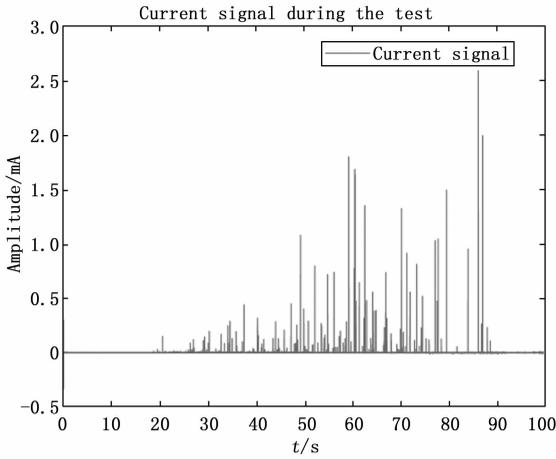


图 8 直流电压测试的电流波形图 (绝缘材料)

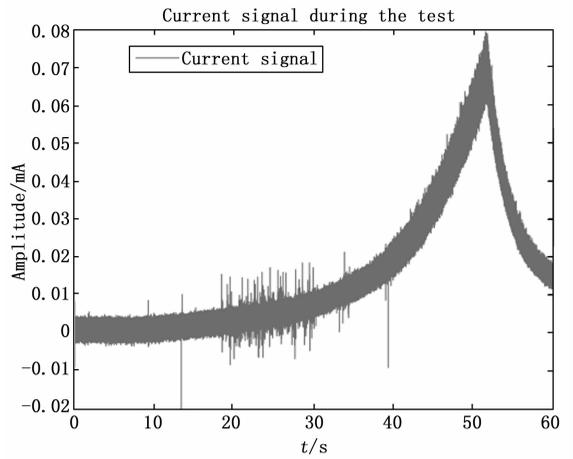


图 10 直流电压测试的电流波形图 (绝缘纸)

直流电压测试的电压、电流信号以及滤波后的电流波形图。在此项试验中，出于安全性考虑，系统的电压输出阈值被设置为 1 kV。由电压波形图可知，刚开始系统输出电压线性上升，当升至 1 kV 的峰值时，系统判断输出电压超过设置的电压输出阈值，故系统立刻停止了测试并保存了相应的数据。试验时泄露电流随着电压的增加而上升，但由于被测的电流信号较小，容易受到周围环境中的噪声的干扰，降低测量结果的准确性，如图 10 所示。图 11 为对电流信号使用移动平均滤波滤波器之后的结果，可见电流波形图的噪声基本被消除，图像清晰度明显提高。

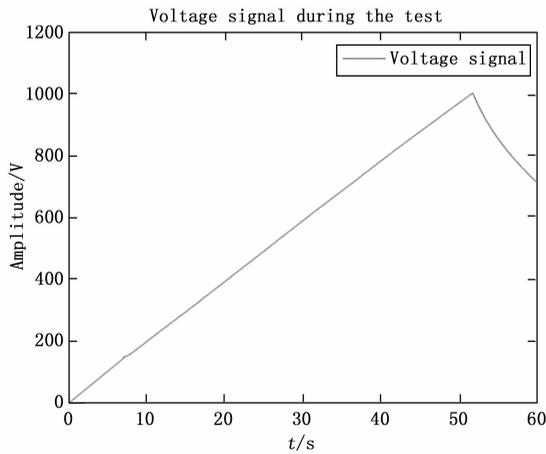


图 9 直流电压测试的电压波形图 (绝缘纸)

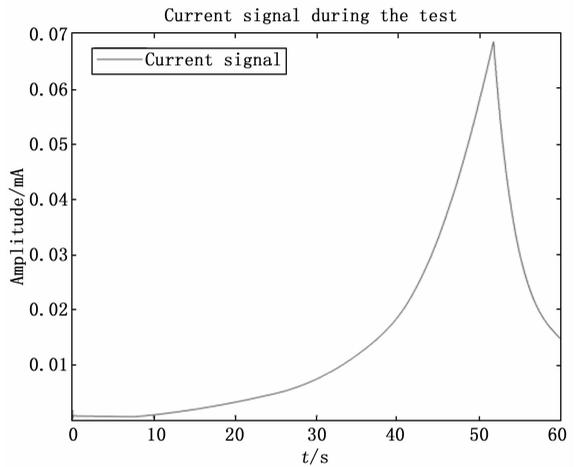


图 11 滤波后的直流电压测试的电流波形图 (绝缘纸)

3.2 交流电压测试

图 12 和图 13 分别为测试系统输出交流电压信号以及交流信号局部放大图。由波形图可知，系统能够实现线性升压模式的交流电压输出，其中输出电压的峰值为 10 kV 左右。局部放大图显示所生成的交流电压的频率为 50 Hz。如上文所述，输出信号的频率可以根据需求在频域中进行配置，比如我们要测量某绝缘材料从 50 Hz 到 2 kHz 的频域中介电响应，只需要在操作界面设置这两种频率并执行即可，测试系统会以 50 Hz 的默认步长自动运行，并保存相应的试验结果方便进行后续的数据分析。

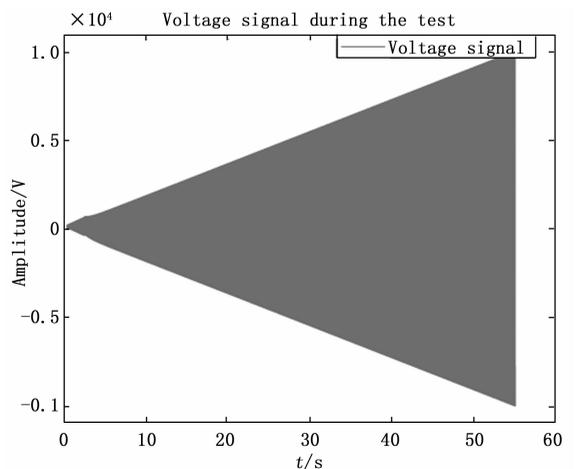


图 12 交流电压输出测试

4 结束语

本文通过选用常见设备，设计了一套基于 Matlab 绝缘材料电气性能测试系统。通过给输入信号添加了前置滤波器

(下转第 85 页)