

高灵敏度电弧电流检测装置研究

刘运杰 闫晓兵 陈春梅 李 敬

(泰山科技学院, 山东 泰安 271038)

摘要: 电弧电流具有幅值低、频率分布范围广的特点。目前的电流探测手段很难将直流耦合的电弧电流信号进行提取测量。本文提出并设计了一种基于电磁感应定律的电流-电压变换设备, 自动对高频电流信号的幅值进行补偿, 弥补了自然环境中高频信号衰减较快不易测量的缺陷。通过合理选择磁芯和初次级变比参数, 实验证明, 设计电流-电压变换装置能够灵敏的检测电弧电流, 达到了设计预期。

关键词: 高灵敏度; 电弧电流; 电磁感应

根据我国能源应用需求和国家能源发展规划, 光伏及储能系统拥有很大的发展空间。相比传统的发电方式, 光伏和储能系统具有较多的直流连接器件, 更容易产生电弧及由电弧导致的老化、起火等灾害, 给人民的生命和财产安全带来较大的安全隐患。

目前主流的电弧检测算法都是基于检测分析线路的正常电流信号和发生电弧故障时电流信号的不同特征来实现的。电弧故障检测方法主要有基于时域的方法, 基于频域的方法, 基于时频域的方法, 基于电弧的声、光、电磁辐射等物理现象的方法和基于人工智能的方法等。鉴于对检测准确度和实现成本的考虑, 实际应用时基于时域、频域或时域与频域结合的方法应用较多。

目前研究的论文文献中, 不管是基于时域的、频域的还是时频域的方法, 其信号的采样频率都不是很高, 普遍认为电弧特征信号基本在 1kHz 至 200kHz 范围, 而且不同文献结果不一样。比如文献通过实验测定电弧特征频率在 100kHz 以内, 所以采用 2MSPS 的采样率进行 0.5 秒时间长度数据采样; 文献通过对比测试发现 126kHz 至 250kHz 范围内的电弧特征最明显; 文献使用 1kHz-15kHz 频率范围内的数据进行电弧检测, 文献使用 50KSPS 的采样频率, 即认为电弧明显特征的最高频率为 25kHz。可以看出, 不同的作者使用不同的环境最终得出了电弧具有不同频率特征的结论。

本研究根据电弧电流频谱分布范围广的特点, 结合电磁感应定律设计了一款高带宽高灵敏度的电流检测装置, 用于采集 1MHz-10MHz 范围的电弧电流信号, 实际测试探测灵敏度达到 10uA。

一、频率随动的电流变压器

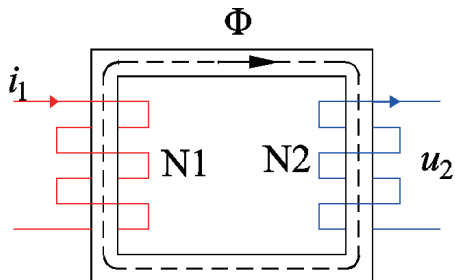


图1 电流-电压变换器示意图

如图1所示的电流-电压变换器, 假定空气磁导率为 μ_0 , 磁芯的相对磁导率为 μ_r , 磁芯的磁路长度为 MPL , 磁芯的有效截面积为 S 。

当初级输入电流为 $i_1 = A \sin(\omega t)$, 初级电流圈数为 N_1 , 次级电流圈数为 N_2 时, 根据电磁感应定律, 可以算的感应电压 μ_2 为:

$$\mu_2 = \frac{\mu_0 \mu_r \omega N_1 N_2}{MPL} A \sin(\omega t + 90^\circ) \quad (1)$$

公式(1)中, 电流-电压变换器的次级输出电压 μ_2 的幅度会随着初级电流 i_1 频率 ω 的增大而增大, 具有频率随动特性。该特性正好弥补了电弧电流中频率分量越高其幅值越低的特点, 提高高频信号的信号强度。同时从公式(1)中我们看到电压 μ_2 的相位会超前初级电流信号 90° 。

二、磁芯选择

磁芯是电流-电压变换器的核心器件。目前市面上存在着多种材料的磁芯, 考虑到电弧电流的频率分布范围较广(0Hz- ∞ Hz), 且信号较弱, 不能损耗太多, 所以需要选择镍锌铁氧体作为电流-电压变换的磁性介质。

三、电路设计

根据公式(1)及磁性材料特性, 设计电路如图2所示。

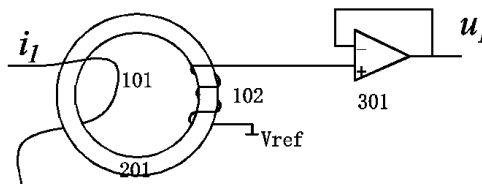


图2 电弧电流采样电路示意图

图中的201部件为磁芯, 101为单匝的初级线圈, 102为圈数为 N 的次级线圈。其中次级线圈一端接在运放, 另一端接在基准电位上, 比如1.65V、2.5V等。设计并制作完成PCBA如图3所示。

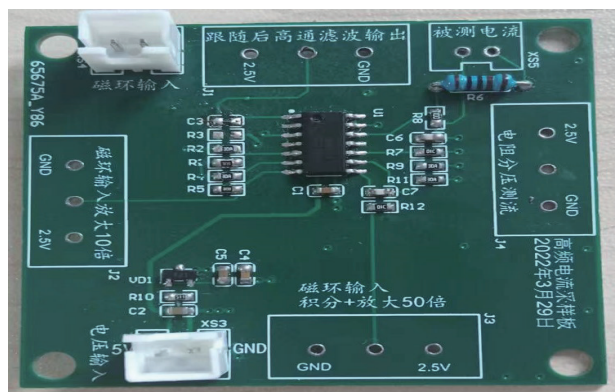


图3 PCBA示意图

四、实验测试

为探究在磁导率、频率、线圈匝数等条件下对直流电弧测量精度的影响,以确定最终的电流-电压变换器的参数,实验选择使用信号源头输出峰值为8V正弦电压信号,并经过1K Ω 电阻限流后作为图1中的 i_i ,分别进行无直流偏置和5A直流偏置的对比实验。测试环境如图4所示。

经过对比分析发现,磁导率为80的镍锌铁氧体磁环,在加入直流电情况下,所测峰值与未加直流电所测数据基本保持一致,认为未发生衰减和增幅;磁导率为1000、2000和10K的磁环在增加直流电后认为都发生一定程度的偏置。最终选择磁导率为80的磁环进行电弧电流信号的采集。

现对电压为60V,负载为20 Ω 电阻时的电弧电压电流进行时域采样,如图5。经过FFT变换后得到基于频域的采样特征图,如图6。

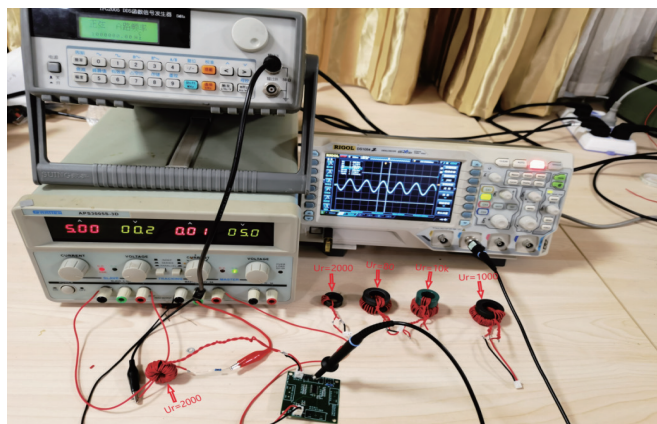


图4 消融实验测试图

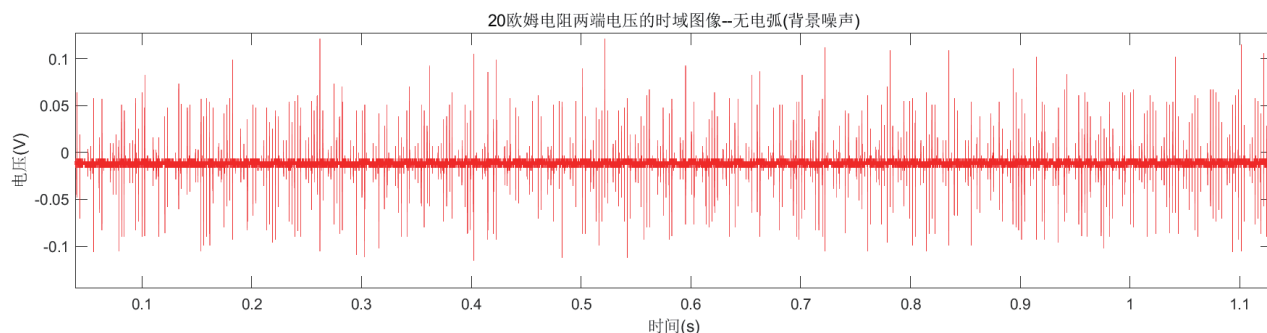


图5 电弧的时域波形图

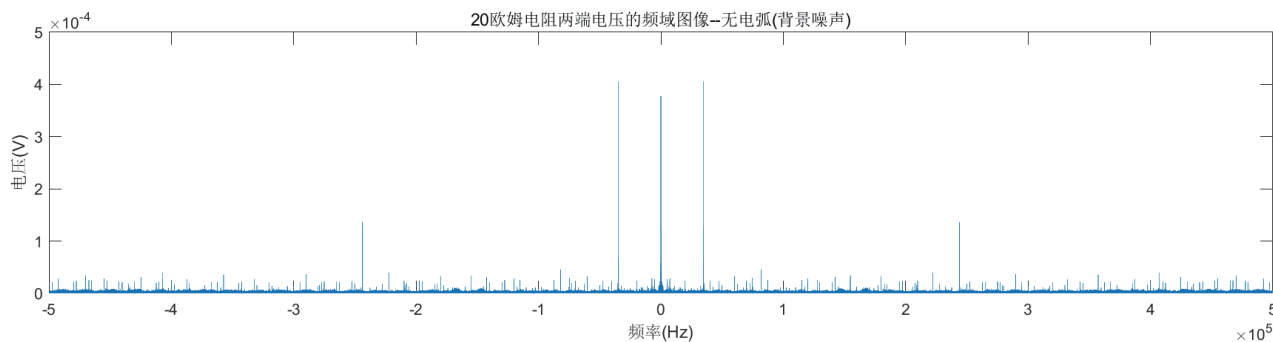


图6 电弧的频域波形图

从图6中可以看出,在电弧发生时42KHz和250KHz附近特征明显,能够很好地反应电弧发生时的特征。

实验证明,采用此高灵敏度电弧电流检测电路装置,能提高电弧电流高频信号的信噪比,进而获得准确的电流信息,用于电弧特征的学习和判断。

参考文献:

[1] 王尧,李阳,葛磊蛟,等.基于滑动离散傅里叶变换的串联直流电弧故障识别[J].电工技术学报,2017,32(19):7.

[2] 李智华,钟杰人,吴春华,等.光伏电站中直流电弧故障的噪声强度分析[J].太阳能学报,2022(005):043

[3] 串联直流电弧特性及其在故障诊断中的应用[J].姚秀:汲胜昌:Luis Herrera:王瑾.高压电器,2012(05).

[4] 李松浓,晏尧,向菲等.光伏直流系统故障电弧检测方法研究综述[J].电测与仪表.2023(03).

[5] 王毅,陈进,李松浓等.基于Stacking模型融合的串联故障电弧检测[J].电子技术应用,2021,47(11):53-57.