

[电弧故障]

基于罗氏线圈检测电弧高频分量的电弧故障检测方法

文/宣姝 毛茜 杨晓薇 程小明
国网重庆市电力公司

介绍了利用罗氏线圈 di/dt 传感器对低压交流电路中的串联电弧故障进行检测。通过模拟不同负载和电流等级下的串联电弧故障，了解电弧信号的模式和等级特征。罗氏线圈设计用于检测电弧信号的高频 di/dt 分量。实验结果清楚地表明，通过检测 di/dt 的高频分量，可以可靠地检测串联电弧故障情况。

电弧故障是住宅火灾的主要原因之一，其主要原因是可燃物暴露在电弧的热量下。支路电弧可分为并联电弧和串联电弧。图1显示了交流电路中的串联电弧和并联电弧模型。当电流通过导体之间的间隙时，就会产生电弧。中性线和接地线之间的平行电弧由于电弧阻抗的存在，可能产生故障电流小于分支断路器的工作电平。在串联电弧的情况下，电流的幅值等于典型分支电路的电流。

很明显，断路器采用过电流保护方案不能检测电弧故障。串联电弧故障的检测比并联电弧故障的检测更加困难，因为即使在很低的电流下也能发生串联电弧，而且一些电器如电刷电动机在正常使用下，电刷与导线之间始终存在电弧。交流电弧在交流电压过零点附近自动熄灭。这将导致每半个周期出现一次当前中断。交流充电器中的调光器和整流器等电气设备也有类似的电流中断。因此，利用支路工频波形进行电弧故障检测是无效的。电阻性负载串弧电流波形如图2a所示。在过零点附近可以观察到电流中断。无串联电弧的调光器电流波形正常和故障对比如图2b所示。

在电弧过程中，电流通过电极之间的间隙（断开的导体）进行。气体（空气）被电离成等离子体，因此电弧电流的高频成分是预期的。在以往的

研究中，电弧故障电流的频率范围可超过10 kHz~1 GHz。一些电子负载可以发射超过100 kHz的高频电流。因此，在较高的频率下检测电弧故障是比较可取的。通常在支路中，电弧故障检测位于配电板上，而配电板可能离电弧位置较远。高频电流信号从电弧点传播到检测点时会被分支电路阻抗衰减。研究了罗氏线圈在电弧故障检测中的应用。它测量的是电流的变化率而不是电流，因此适用于测量高频电流信号。它没有磁芯，因此不会被过电流饱和，也可以在很小的负载电流下拾取高频信号。它可以做得非常小，所以可以集成到小外壳中。本文利用罗氏线圈对分支电路的高频 di/dt 信号进行串联电弧故障检测。该信号受到窗口比较器电弧故障指示。

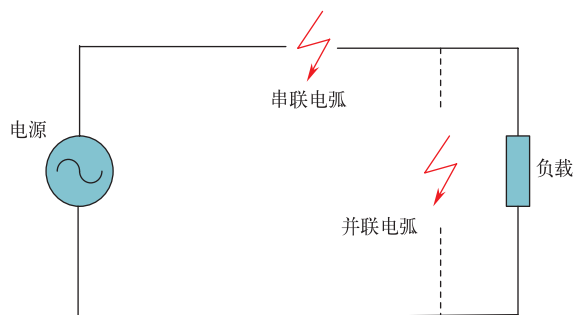


图1 交流电路中的串联电弧和并联电弧模型

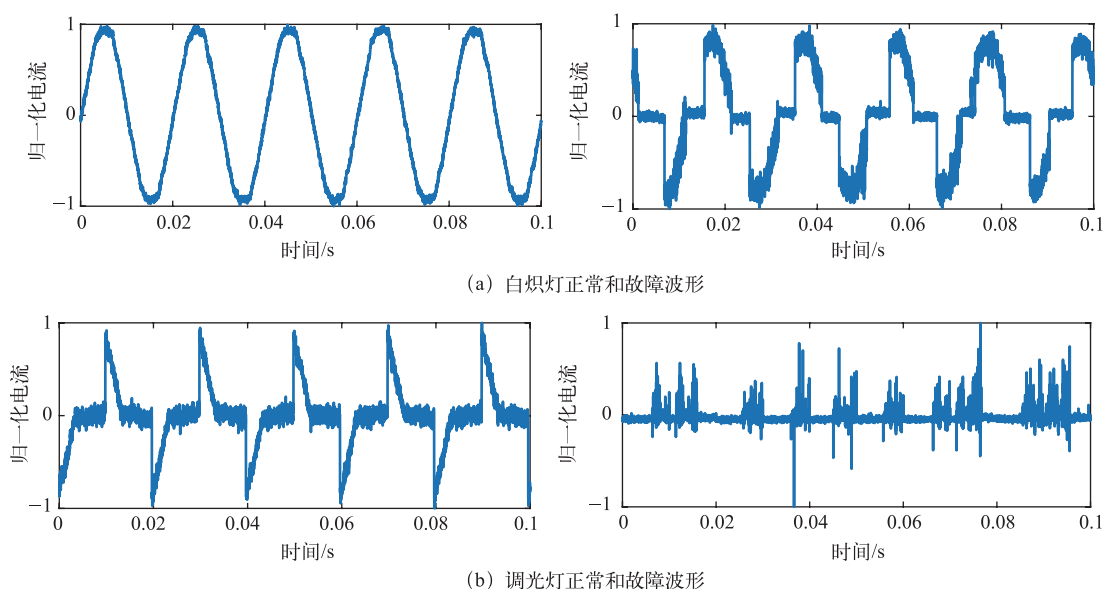


图2 负载正常和故障电弧比较

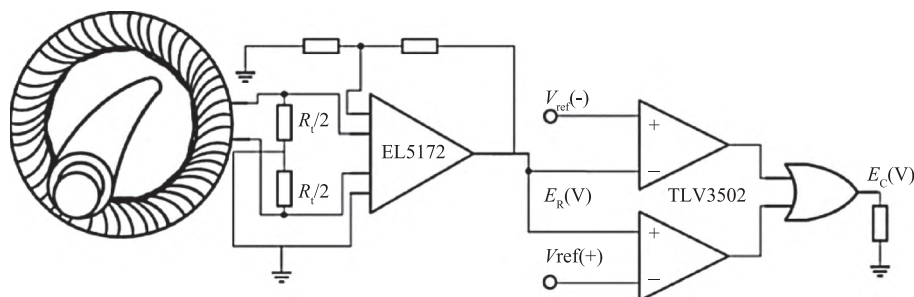
检测方法与实验设置

实验装置包括串联电弧发生器，使用两个电极和各种类型的负载，电路电流监测采用高带宽电流探头作为参考，罗氏线圈用于高频 di/dt 信号检测，如图3所示。

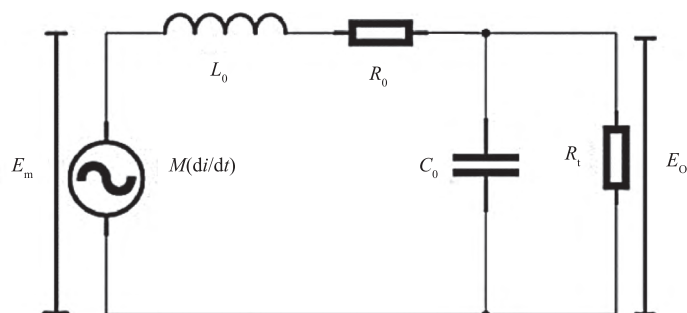
罗氏线圈是用100转AGW32搪瓷铜线。集总参

数等效电路如图3b所示。参数 $R_0 = 1.667 \Omega$ ， $L_0 = 9.1 \mu\text{H}$ ，在1 MHz下用LCR计测量， $C_0 = 11 \text{ pF}$ 。

R_t 是终端电阻，它的值可以设计以满足所需的频率响应。绝缘外层缠绕在面层漆包线的外面，罗氏线圈截面的形状为空心的环形，可以直接套在被测量的导体上，导体中流过的交流电流会在导体周围



(a) 罗氏线圈及相关电路



(b) 罗氏线圈等效电路

图3 电弧感应电路

产生一个交替变化的磁场，从而在线圈中感应出一个与电流变比成比例的交流电压信号。在本研究中，优选具有过阻尼特性的低通滤波器，并确定了线圈的终端电阻660 Ω。由此产生的频率带宽约为16 MHz。图4为由集总模型计算和测量得到的线圈传输特性。在60 MHz频率范围内，集总模型与实验结果吻合较好。罗氏线圈的输出受到差分放大器的降噪和放大。窗口比较器用于将电弧电平转换为逻辑信号。

$$i_2(t) = C_0 \frac{di(t)}{dt} + \frac{u(t)}{R_i} \quad (1)$$

$$e(t) = L_0 \frac{di_2(t)}{dt} + R_0 i_2(t) + u(t) \quad (2)$$

式中， i 为电流； u 为电压； C 为电容， R 为电阻， L 为线圈自感； M 为罗氏线圈的等效互感。

假设罗氏线圈的初始条件为零， s 为拉普拉斯算子，则罗氏线圈集总参数等效模型的传递函数可表示为

$$G(s) = \frac{U(s)}{I(s)} = -\frac{Ms}{L_0 C_0 s^2 + \left(\frac{L_0}{R_i} + R_0 C_0 \right) s + \frac{R_0 + R_i}{R_i}} \quad (3)$$

$$= -\frac{\frac{M}{L_0 C_0} s}{s^2 + \frac{(L_0 + R_0 R_i C_0)}{L_0 C_0 R_i} s + \frac{R_i + R_0}{L_0 C_0 R_i}}$$

假设罗氏线圈的初始条件为零， s 为拉普拉斯算子，则罗氏线圈集总参数等效模型的传递函数可表示为

$$H(s) = G(s) \frac{1}{s}$$

$$= -\frac{\frac{M}{L_0 C_0}}{s^2 + \frac{(L_0 + R_0 R_i C_0)}{L_0 C_0 R_i} s + \frac{R_i + R_0}{L_0 C_0 R_i}} = -\frac{\frac{M}{L_0 C_0}}{(s - s_1)(s - s_2)} \quad (4)$$

系统传输特性如图4所示。

所以选取罗氏线圈结构参数时，不仅要使罗氏线圈输出满足与被测电流成微分关系，而且要考虑反应速度、频带、灵敏度和稳态误差等指标，对于微分系统，其暂态性能因阻尼比取值不同而表现为欠阻尼、临界阻尼或过阻尼。当二阶微分系统表现为欠阻尼状态，从传输特性可以看出本文罗氏线圈电路对高频部分极为敏感。

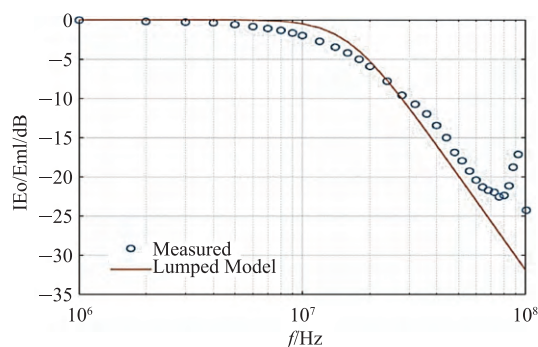


图4 罗高斯基线圈的传输特性

实验测试

实验装置如图5所示。交流电源、电弧发生器和负载串联，该故障电弧发生装置主要包括两个直径6 mm的电极，其中固定电极由石墨制成，接触面平整，移动电极由铜棒制成，接触面被打磨成圆锥形尖端。为了使故障电弧发生装置能够更有效地工作，两个电极的中轴线应固定在同一水平线上，且状态稳定不能晃动。电弧发生器与负载之间的距离约为10 m。实验采用4 mm²导线电弧发生器等效电路如图6所示。数据采集由Pico示波器进行，具有500 MHz带宽和高达5 gs/s的能力。参考电流探头是Yokogawa 701930，带宽为1 MHz。串联电弧发生器由固定碳电极和可调铜棒电极组成，通过横向调节旋钮进行间隙调节，根据间隙大小随机产生电弧，负载位置由插座安装。负载的四种一般类型为白炽灯、电池充电器、带调光器的白炽灯和电钻。

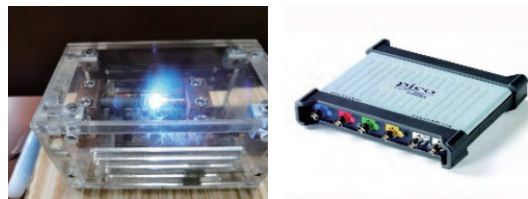


图5 电弧发生器和Pico示波器

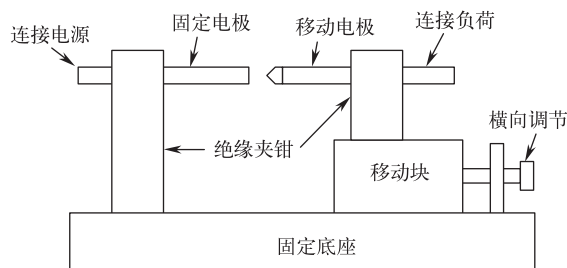


图6 电弧发生器等效电路

图7显示了从电阻性负载实验中获得的波形。在串联电弧条件下，可以清晰地观察到电阻负载的罗高斯基线圈的高频分量。其中正常情况下（如图7b所示）高频分量较少，且高频分量的值也较少，而故障波形（如图7a所示）高频分量较多，值也较大。

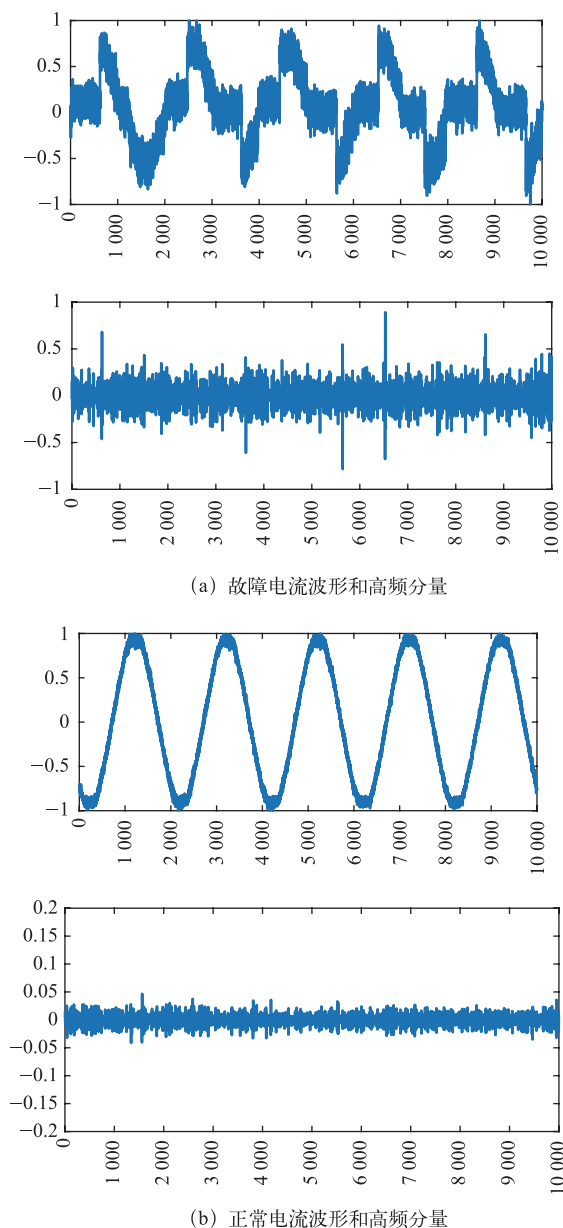


图7 白炽灯

图8显示了用调光器实验从电阻负载获得的波形。在串联电弧条件下，可以清晰地观察到罗高斯基线圈的高频分量。在所有实验中，窗口比较器的检测电平设置为0.05 V，能够对实验中各种负载的正常情况和串联电弧故障情况进行区分。

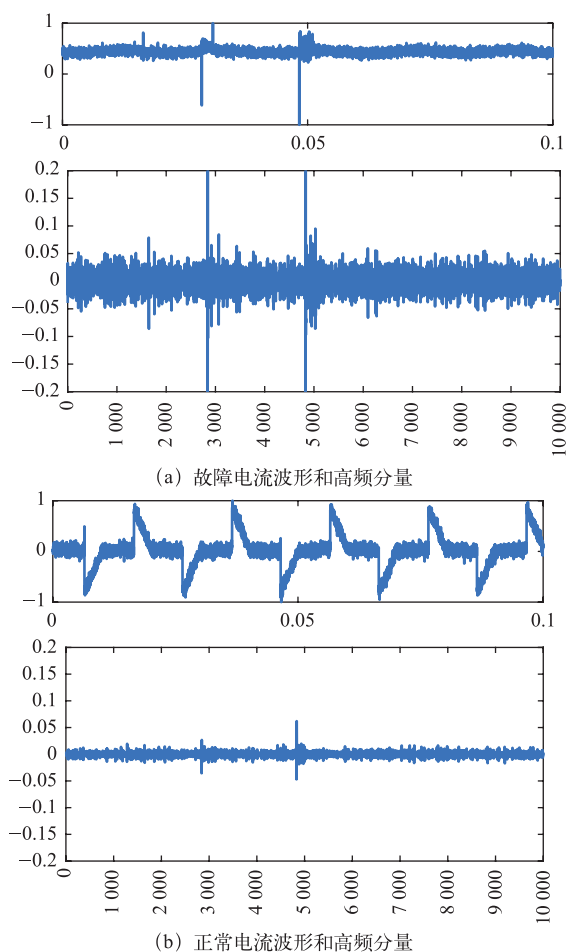


图8 调光灯

结束语

本文结合罗氏线圈设计的检测电路来检测低压交流电路中的串联电弧故障，对于防止住宅火灾具有重要的意义。此外，这种方法还可以用于其他类型的电路，进一步扩大了其应用范围。未来的研究可以进一步优化这种方法，提高其检测准确度和可靠性，从而可靠地检测串联电弧故障。EA

(收稿日期：2023-11-14)

参考文献

- [1] 谭风雷, 陈昊, 丁凯. 基于“电流+弧光”的二次回路故障电弧检测研究[J]. 电力安全技术, 2022, 24(12): 37-40.
- [2] 吴泳恩, 王宾. 基于改进经验模态分解的直流串联电弧故障检测[J]. 济南大学学报(自然科学版), 2024, 38(1): 106-114.