

在线监测电容型设备的介质损耗因数

狄剑光 高胜友 李福祺

清华大学 电机工程及应用电子技术系

摘要: 介绍了一种基于谐波分析法的电容型设备绝缘介质损耗因数的数字化测量方法, 设计了以 80C196 和 80C32 单片机为核心的电容性设备介质损耗因数测量仪, 详细描述了其硬件组成和软件设计, 给出了该仪器在变电站的实验结果。

关键词: 介质损耗因数; 同步采样; 谐波分析法

On-line Monitoring Dielectric Loss Factor of Capacitive Type Equipment

DI Jianguang, GAO Shengyou, LI Fuqi
Tsinghua University

Abstract: The paper describes a digital measurement method, the scheme of spectrum analysis with FFT as the measurement of dielectric loss factor of capacitive type equipment. And based on it a dielectric loss factor of capacitive type equipment monitoring instrument was developed with 80C196 and 80C32 as the main part. The paper also describes its hardware circuit and software arithmetic. The experiment results of this instrument in substation are presented too.

Key words: dielectric loss factor; synchronous sampling; spectrum analysis with FFT

1. 引言

绝缘介质损耗因数 $\tan \delta$ (简称介损) 是反映高压电容型设备绝缘性能的一个重要指标。通过对介损的测量可以早期检测出高压电器的一些绝缘缺陷, 如绝缘受潮、绝缘劣化、气隙放电等。但是因为高压电器设备的介质损耗角一般都比较小, 而且高压电器周围的电磁环境复杂, 存在很强的电磁干扰, 因此要准确、稳定地在现场测量电气设备的介质损耗因数有比较大的难度^[1]。笔者根据谐波分析法测量原理研制了介质损耗因数测量仪, 它由单片机 80C196 和 80C32、模数转换器 MAX197、显示器件等硬件和相应的软件组成。

2. 测量原理

设流经试品的电流是 $i = I_1 \sin(\omega t + \varphi_{i1})$, 两端的电压是 $u = U_1 \sin(\omega t + \varphi_{u1})$, 由此可知介质损耗角的正切值是 $\tan \delta = \tan\left(\frac{\pi}{2} - (\varphi_i - \varphi_u)\right)$ 。实际电压和电流信号中含有高次谐波分量, 要实现高精度测量, 必须消除高次谐波影响, 同时把基波相位信息分离出来。谐波分析法采用数字频谱分析的方法求出电压和电流信号的基波, 进而通过相位比较求出 $\tan \delta$ ^[2, 3]。对离散的周期信

号 $u(n), i(n)$ 进行频谱分析可得:

$$U(k) = A_u(k) + jB_u(k) = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} u(n) e^{-j\frac{2\pi}{N}nk}, k = 0, 1, 2, \dots$$

$$I(k) = A_i(k) + jB_i(k) = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} i(n) e^{-j\frac{2\pi}{N}nk}, k = 0, 1, 2, \dots$$

当 $k = 1$ 时的 $U(1), I(1)$ 反映的就是 $u(n), i(n)$ 基波的信息。电压和电流的幅度和相位分

别是: $|U(1)| = [A_u^2(1) + B_u^2(1)]^{\frac{1}{2}}, |I(1)| = [A_i^2(1) + B_i^2(1)]^{\frac{1}{2}}$

$$\varphi_u = \arctan \frac{B_u(1)}{A_u(1)}, \varphi_i = \arctan \frac{B_i(1)}{A_i(1)}$$

$$\text{所以: } \tan \delta = \tan\left(\frac{\pi}{2} - (\varphi_i - \varphi_u)\right) = \tan\left(\frac{\pi}{2} - \left(\arctan \frac{B_i(1)}{A_i(1)} - \arctan \frac{B_u(1)}{A_u(1)}\right)\right)$$

3. 介损测量仪的硬件实现

根据谐波分析法设计的介损测量仪, 原理如图 1 所示。从电压互感器 (PT) 和电流互感器 (CT) 引入输入信号, 在电压信号过零时启动 MAX197, 利用锁相环技术实现和工频电源同步采样。在一个工频周期内等间隔采样 64 点, 采样得到的信号利用谐波分析法计算出 $\tan \delta$, 计算结果可由显示器件显示结果, 或者通过通讯接口 RS485 送往上位机。

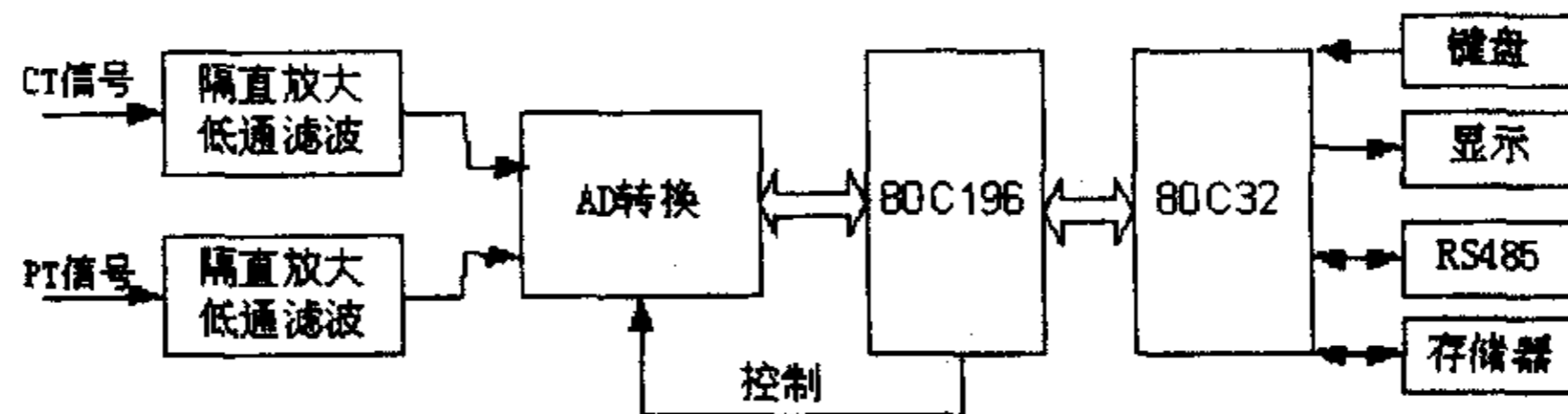


图 1 介损测量仪的硬件原理框图

3.1 信号采样

测量仪采用的是穿心式电流互感器取样电流信号, 这种电流取样方式不改变一次设备的正常接线和运行方式, 保证了现场使用的安全。

电压信号取样方式如图 2 所示: 先把 PT 的电压信号经过跟随器和电阻转化为电流信号 (20mA), 然后通过电流传感器将电压信号送到采集装置采样。

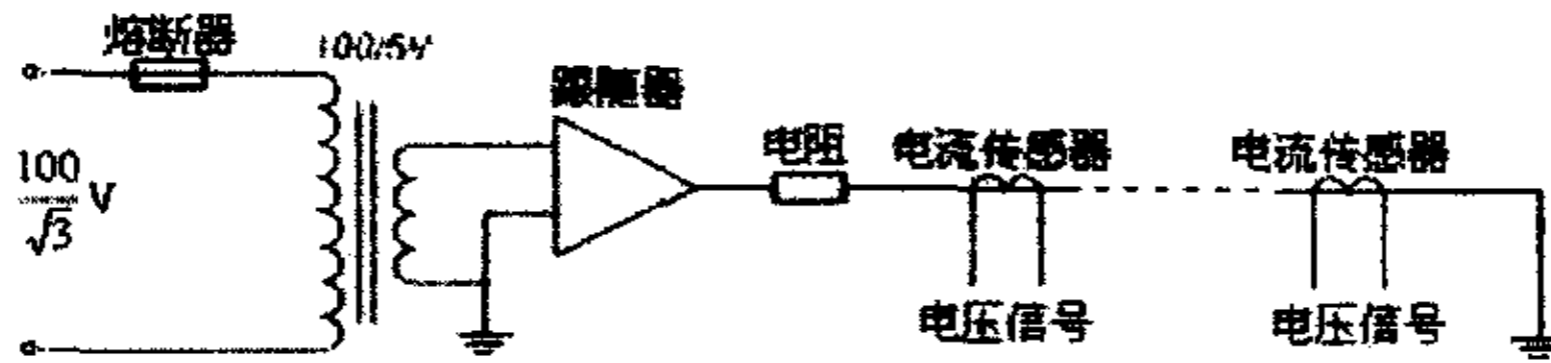


图 2 电压取样回路

电压取样回路的特点是：

- (1) 增加测量单元的数量可以不改变 PT 二次侧的负荷；
- (2) 测量装置不直接接到 PT 的副边，因而不会影响变电站其他设备的安全运行；
- (3) 各测量单元获得的电压信号相位一致性好；

(4) 测量装置的电压和电流信号通道都用特性相近的电流传感器输入，使两个信号通道在硬件上尽可能保持一致，从而可以抵消由于电子器件性能变化而引起的相移变化，使测量装置的性能保持稳定。

3.2 信号的滤波

由于电网的信号中有谐波分量存在，现场存在很强的电磁干扰，这样取样得到的电压和电流信号波形畸变明显。同时由于电容性设备本身具有高通的特性，电网中的高频信号（如载波通讯）也会进入测量通道；这对于采用有限采样率的信号进行频谱分析，将会产生频谱混迭现象，从而对测量结果产生影响。因此有必要对电压、电流信号进行低通滤波，本系统采用了 4 阶低通巴特沃斯滤波器。

3.3 同步采样电路

在利用谐波分析法测量介损的过程中，最重要的是要保证信号的同步采样，也就是保证在一个工频周期内正好有均匀的 64 个采样点，这样才能减少频谱泄漏带来的误差影响。在我国电力系统中，电网的频率在 50Hz 附近波动，要在一个工频周期内正好采样到 64 个点，必须进行频率跟踪，以确定实际的采样率。本装置采样锁相环技术实现同步采样。

锁相环的原理如图 3 所示。信号 f_i 与压控振荡器输出的经过 64 分频器分频的信号在鉴相器内进行相位比较。鉴相器输出直流信号的幅度与相位差成比例，鉴相器的输出经低通滤波器后控制压控振荡器的频率，使压控振荡器的输出 f_o 经分频器分频后的频率向被测信号的频率靠拢，直至频差消失，环路锁定。此时压控振荡器输出频率 f_o 正好是被测信号的 64 倍。此时用 f_o 去控制采保电路和 AD 转换器就可以在一个工频周期内正好采样到 64 个点，近似消除了同步误差，实现了同步采样。

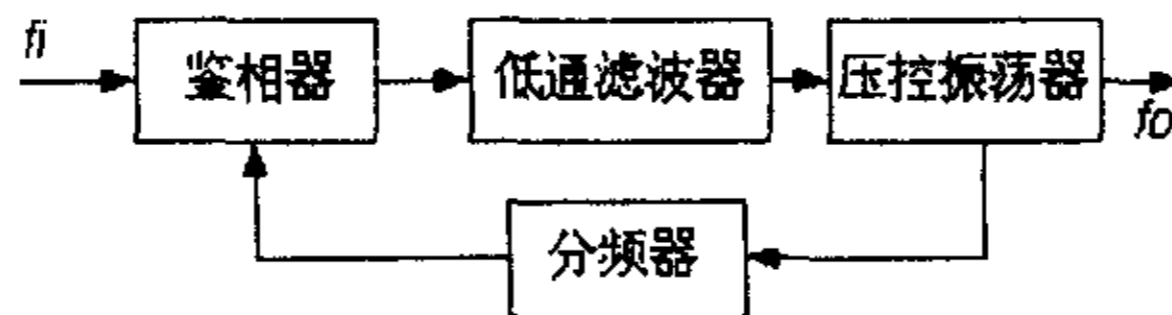


图 3 锁相环原理框图

3.4 采样保持和 A/D 转换电路

仪器采用的是 8 通道 12 位的 A/D 转换芯片 MAX197。由于芯片内部各通道是通过模拟开关轮流转换的，为了实现电压和电流信号的同时采样，信号需要经过采保电路进行采样保持。锁相环提供的信号用于控制采保电路和 A/D 转换。A/D 转换结束的 INT 信号作为单片机的中断信号。

3.5 单片机系统

由于谐波分析法计算 $\tan \delta$ 计算量相对较大，同时为了保证同步采样的同步精度，避免因中断等原因延误 A/D 转换数据的读取，仪器的全部功能由双单片机协同完成。其中主单片机 80C196 完成：①数据采集；②数据处理。辅单片机 80C32 完成：①数据的数码显示；②通过 RS485 接口与上位机通讯，组成一个分布式在线测量系统；③参数设置等。实践证明这种设计可以较好的完成各项预期的功能。

4. 介损测量仪的软件实现

介损测量仪的软件分为 80C196 和 80C32 两部分。其中 80C196 的程序使用了高级语言 C，它具有程序设计快，可读性好，转换质量高等优点。80C32 的程序由于需要用 I/O 口模拟串行口和上位机通讯，所以采用汇编语言，可以精确的控制 CPU 运行的时间。程序采用了模块化设计，便于以后进一步扩展系统功能。图 4 所示为 80C196 的流程图，图 5 所示为 80C32 的程序流程图。

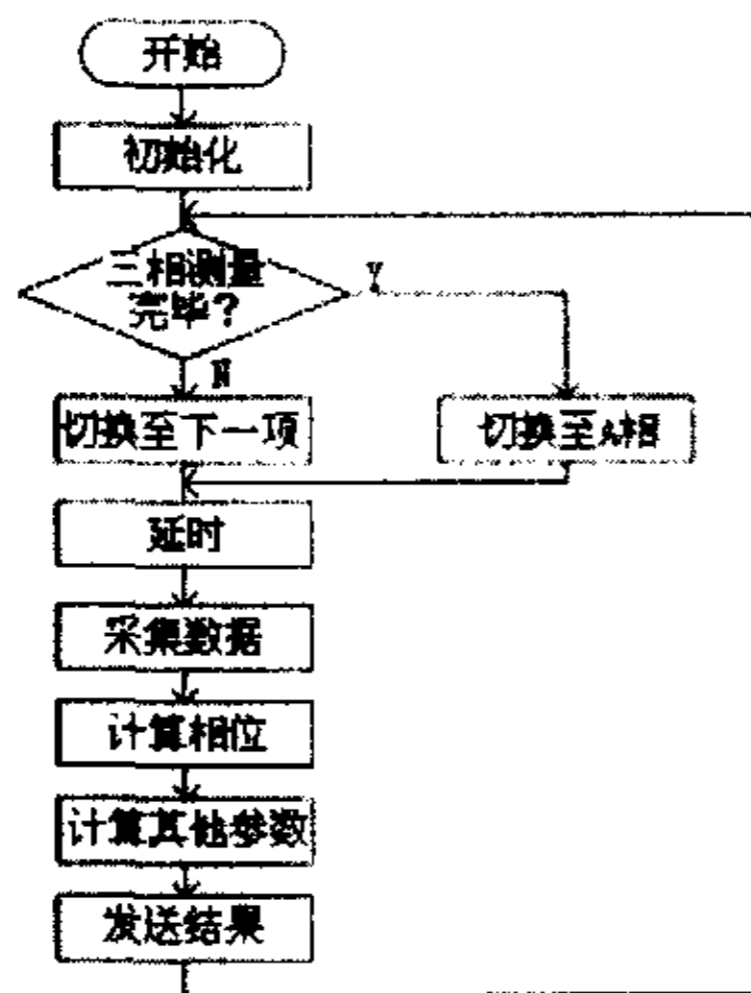


图 4. 80C196 程序流程图

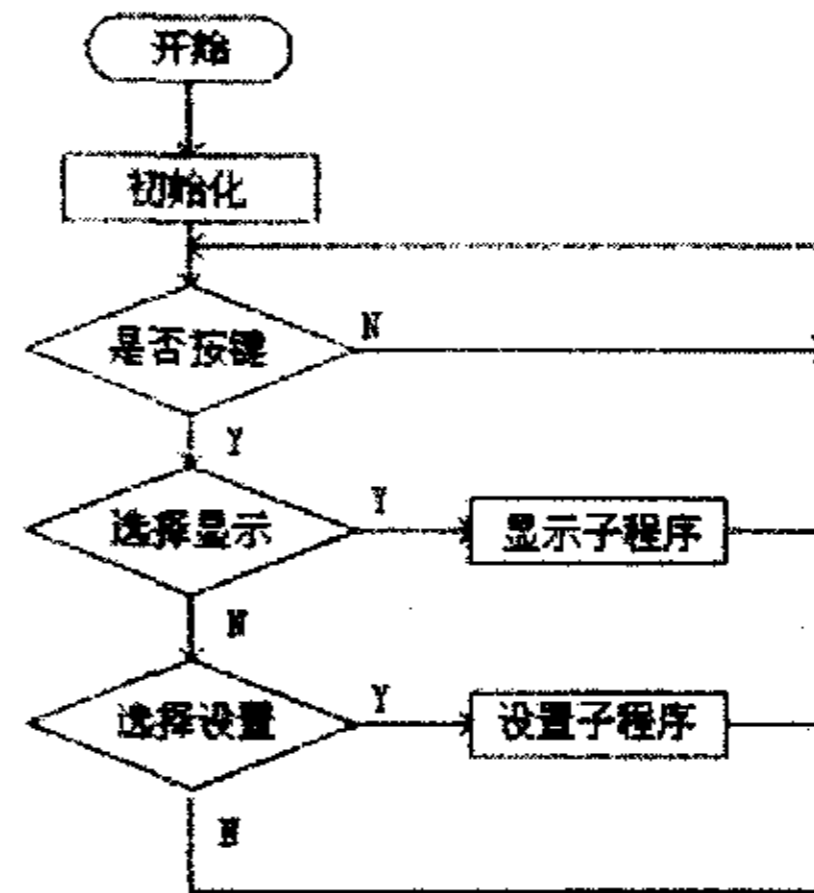


图 5. 80C32 程序流程图

5. 测试结果

测量装置完成后，在 35KV 系统进行了试验。试验主要是考察装置测量数据的稳定性。试验的结果如图 6 所示。

从试验的结果可以看出，测量结果比较稳定，介损值测量值波动范围在 ± 0.0005 以内。

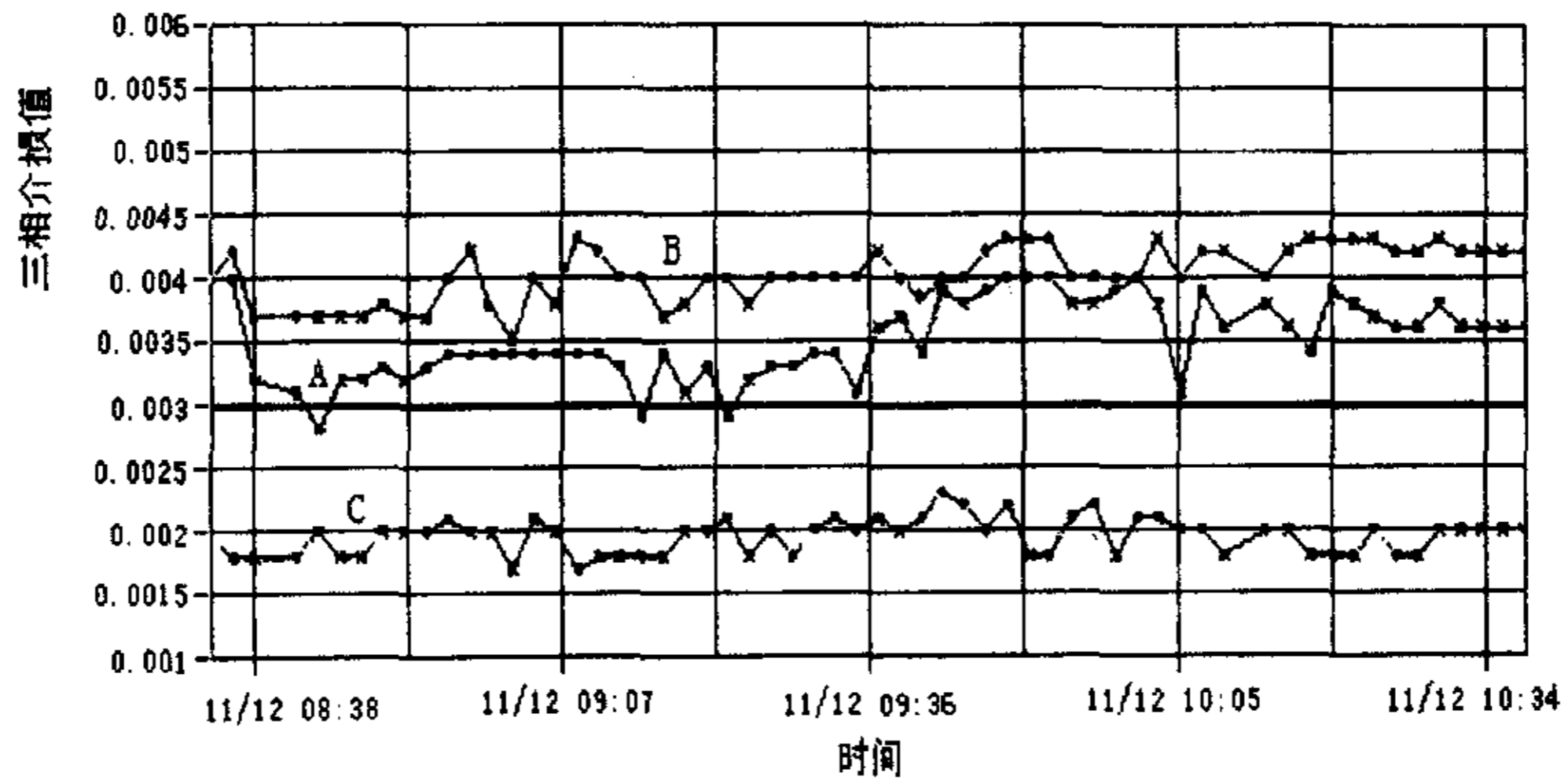


图 6. 35kV 容性设备在线监测结果

6. 结论

- (1) 采用谐波分析法测量介损具有计算速度快、自动消除谐波影响的优点。
- (2) 采用同步锁相采样技术是保证谐波分析法测量介损准确度的关键因素。
- (3) 为保证测量装置性能的长期稳定，除需设计性能优良的硬件电路外，保持电压和电流通道的一致是十分重要的。
- (4) 试验表明本装置监测所得的数据具有较好的稳定性。

参考文献：

- [1] 王川波. 高压电气绝缘及测试. 北京：中国水利水电出版社，1998
- [2] 赵秀山，谈克雄等. 介质损耗角的数字化测量. 清华大学学报（自然科学版），1996，36(9)：51~56
- [3] 邱关源. 电路. 北京：人民教育出版社，1978.