

高压设备介质损耗参数 在线测量方法的研究与应用



付家才 郭松林 郭明良 著



科学出版社
www.sciencep.com

高压设备介质损耗参数 在线测量方法的研究与应用

付家才 郭松林 郭明良 著

科学出版社

北 京

内 容 简 介

本书系统地介绍了高压输变电设备在线故障监测与诊断技术的原理和监测技术。主要内容为:①提出了用硬件构成矢量内积法测量高压输变电设备绝缘参数、等值电容和绝缘电阻的方法;②阐述了谐波分析法测量高压输变电设备绝缘参数的方法;③提出了基 2-FFT 变换方法的误差估计方法,对相关函数法测量高压输变电设备绝缘参数进行了系统研究;④提出了用小波变换求电压、电流的自相关函数及互相关函数的方法;⑤根据实际的科研经验,总结了故障诊断软件的数学建模方法,并对编程的软件方法进行了叙述。

本书可作为高压电器绝缘测量领域的工程技术人员和相关专业的高校研究人员的参考书。

图书在版编目(CIP)数据

高压设备介质损耗参数在线测量方法的研究与应用/付家才,郭松林,郭明良著.——北京:科学出版社,2010

ISBN 978-7-03-029331-2

I. ①高… II. ①付…②郭…③郭… III. ①高电压-介质损耗-参数测量-测量方法 IV. ①TM835.4

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2010)第 208977 号

责任编辑:余 江 潘继敏/责任校对:何晨琛

责任印制:张克忠/封面设计:耕者设计工作室

科学出版社出版

北京东黄城根北街16号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

双青印刷厂印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

2010年11月第 一 版 开本:B5(720×1000)

2010年11月第一次印刷 印张:10

印数:1—2 200 字数:202 000

定价:35.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

前 言

高压输变电设备的安全运行是影响电力系统安全、稳定与运行的重要因素,高压设备发生绝缘事故,不仅会造成设备本身损坏,而且还会造成多方面的损失。所以实现高压输变电设备在线故障监测与诊断技术,及时、准确地掌握运行设备的绝缘状况,根据设备自身特点及变化趋势确定检修时间和检修策略,对电力设备进行维护,进而提高设备运行的可靠性,确保较高的供电可靠率,是近十几年来国内外相关学者正在进行深入探讨的研究课题。

本书是以付家才教授为首的课题组成员在近几年中完成的 2006 年黑龙江省教育厅资助的重点科技项目“电容性高电压设备绝缘在线故障检测与诊断技术”科研成果的总结。特别要感谢北京化工大学王学伟教授、哈尔滨理工大学梁原华教授对本书的指导;感谢课题组成员沈显庆副教授在项目完成过程中所做的工作,他以此课题完成了博士毕业论文;还要感谢付家才教授的硕士生王向琴及桑林同志为本书所做的大量工作。

本书总结了作者多年来高压输变电设备在线故障监测与诊断技术的科研成果,并消化吸收了其他行业在线监测技术的内容,其特点如下:

(1) 对实际的科研成果 JYC61 型高压输变电设备在线故障监测与诊断技术系统的理论研究方法及系统设计,进行了详细叙述(项目于 2010 年获得了黑龙江省高等教育科学进步一等奖)。

(2) 首次提出了将硬件实现的矢量内积法应用于高压输变电设备绝缘参数、等值电容和绝缘电阻的测量方法,并进行了测量方法误差分析及数字仿真。

(3) 对谐波分析法测量高压输变电设备绝缘参数进行了系统研究,并提出了基 2-FFT 变换方法求设备绝缘参数的测量方法的误差估计方法。

(4) 对相关函数法测量高压输变电设备绝缘参数进行了系统研究,总结了各种采样方式求自相关函数及互相关函数的数值积分算法;提出了用小波变换求电压、电流的自相关函数及互相关函数的方法,并进行了测量方法误差分析及数字仿真。

(5) 根据实际的科研经验,总结了故障诊断软件的数学建模方法,并对系统软件编程方法进行了叙述。

作者在研究与开发高电压输变电设备故障诊断过程中,有些问题尚未遇到,敬请读者批评指正。

作 者

2010 年 10 月

目 录

前言

第 1 章 绪论	1
1.1 高压电力设备绝缘在线监测与诊断技术的意义	1
1.2 目前国内外研究状况、水平和发展趋势	1
第 2 章 JYC61 型高压电力设备绝缘在线监测与诊断系统	3
2.1 高压电力设备绝缘在线监测与诊断系统	3
2.2 系统测量指标	3
第 3 章 JYC61 型绝缘参数测试仪	6
3.1 电容性电器设备末屏接地电流信号 I_x 的提取	6
3.2 JYC61 型绝缘参数测试仪的测量原理	6
3.3 数字低通滤波器的主要技术指标	11
3.4 IIR 数字低通滤波器的类型	12
3.5 数字低通滤波器截止频率的选择	13
3.6 数字低通 IIR 滤波器阶数 N 的选择	14
3.7 IIR 数字低通滤波器的结构	14
3.8 IIR 数字低通滤波器的传递函数	16
3.9 IIR 数字低通滤波器的实现	17
3.10 JYC61 型绝缘参数测试仪的系统硬件电路设计	20
3.11 系统误差分析	31
第 4 章 JYC61A 型数据采集器设计	51
4.1 主要硬件单元电路设计	51
4.2 系统 CAN 总线通信规约	59
4.3 CAN 总线通信类型定义	62
4.4 程序设计	65
第 5 章 JYC61 型绝缘参数诊断系统通信计算机程序设计	69
5.1 通信计算机与数据采集器的通信规约	69
5.2 通信计算机与数据采集器的通信程序设计	71
5.3 专家系统软件的设计	74
第 6 章 谐波分析法的介质损耗角测量研究	84
6.1 谐波分析法的测量原理	84
6.2 介质损耗角测量方法比较	92

6.3	加汉明窗插值的谐波算法分析	93
第7章	相关函数法的介质损耗角采样测量方法	96
7.1	母线基波电压与漏电流为基波的介质损耗角测量原理	96
7.2	同步测量电压和电流的自相关与互相关函数的采样算法	98
7.3	电压和电流的自相关与互相关函数的同步采样算法误差分析	102
7.4	准同步采样测量电压和电流的自相关与互相关函数算法	104
7.5	非同步采样测量技术	108
7.6	小波变换求电流、电压自相关与互相关函数的算法	113
第8章	绝缘故障诊断软件的算法理论	118
8.1	BP神经网络的介损值预测方法	118
8.2	基于BP神经网络介损值的预测应用	124
8.3	灰关联分析法应用	125
第9章	电容型设备绝缘在线监测与诊断系统设计	129
9.1	系统设计	129
9.2	PCI总线简介	138
9.3	公共网络通信模块	142
9.4	绝缘在线监测系统的软件设计与开发	143
参考文献		152

第 1 章 绪 论

1.1 高压电力设备绝缘在线监测与诊断技术的意义

高压输变电设备的安全运行是影响电力系统安全、稳定和经济运行的重要因素,高压设备发生绝缘事故,不仅会造成设备本身损坏,而且还会造成多方面的损失。据统计,“八五”期间,我国主要电网中由设备故障而直接影响系统安全运行的电网事故约占事故总量的 26.3%。电压等级越来越高、设备容量越来越大,使得每次检修的时间较长,不仅检修费用高,而且也影响供电的可靠性。在电力市场环境下,用户对供电可靠性要求将越来越高,而由设备故障或检修所造成的停电损失有时是相当可观的。因此既要提高设备的运行可靠性,又要确保较高的供电可靠率,这就对电力设备的维护提出了更高要求。

传统的定期检修存在试验周期长、强度大和有效性差等缺点,难以满足电力系统对可靠性的要求,以状态检修逐步代替定期检修已成为电力系统设备检修的必然趋势。实现状态检修的前提条件是实现在线监测,只有通过各种手段及时、准确地掌握运行设备的绝缘状况,才能根据设备自身特点及变化趋势等来确定检修时间和检修策略。

电容型设备是重要的输变电设备,主要包括电流互感器(TA)、套管、耦合电容器(OY)、和电容式电压互感器(CTV)等,这些设备约占变电站设备总量的 40%~50%,在变电站中具有举足轻重的地位。这些设备的绝缘故障不仅影响整个变电站的安全运行,同时还危及其他设备和人身安全,因此,对其绝缘状况进行在线监测与诊断对电网安全可靠运行具有重要意义和重大经济价值。

1.2 目前国内外研究状况、水平和发展趋势

我国大约在 20 世纪 80 年代开始研究并生产“高压电力设备绝缘在线监测系统”,现在有 100 多个变电站安装了此类设备,但由于受到环境温度、湿度及交流电压、频率变化的影响,尤其是近年来随着电力电子器件(大功率、开关器件)的大规模使用,电磁干扰急剧增加等造成大部分设备已无法运行,其中正常或基本正常的不到 30%,37%左右的已经坏了,33%左右的使用单位反映存在以下问题:

- (1) 测量结果不准,稳定性和重复性差。
- (2) 信号检测采集部分经常出故障。
- (3) 抗干扰能力差,抗温度、湿度变化的能力差,经常丢数据,严重时连操作软件

都被冲掉,需经常重装系统软件。

总之,这些装置很难满足现场监测的要求(来自北京供电局,清华大学电机系的调查结果)。产生上述问题的主要原因是:

(1) 电磁兼容问题。现有的产品基本上没有进行专门的电磁兼容设计,而随着电力电子器件的大量使用,电磁环境日趋严重,使得这些设备难以正常工作,尤其是数据的可靠性大幅降低。

(2) 在测量方法上因处于研制开发阶段,每家的产品各有所长,模拟、数字、DSP 都有,但其共同的局限性是抗谐波干扰和抗电网工频强电磁场(同频干扰)的能力较差。

特别是当外界同频干扰对电压和电流两个取样通道的干扰不平衡时,表现较为明显,导致其环境适应性很差。很多设备在这个变电站正常,而用在另一个变电站就无法运行。总之,国内电容型设备的绝缘在线测量技术还处于起步阶段,有很多问题,需在进一步研究开发中解决。

高压电力设备绝缘在线监测与诊断的关键技术是绝缘介质损耗角的测量,国内外对高压电力设备绝缘参数常用的检测方法是预防性试验,即采用西林高电压电桥法,虽然测量准确度高,但是由于高压标准电容器成本高、不易运输,所以不易现场在线测量;目前国外的一些公司(如美国的 AVO 公司、德国的 LDIC 公司)在线测量采用在被测设备的地线或末屏直接串入监测电容,利用监测电容电压与 TV 电压之间的相位关系求取被测设备的 $\tan\delta$ 。电容具有电压不突变的特性,通过选择合适的电容,可使输出电压保持在 30~40V,这样可降低外界干扰的影响和减少模拟信号传输的衰减,测量结果具有较高的稳定性。但是,由于电容采用串接电阻接入主回路的连接方式,电容容易被击穿,且电阻一般为烧断,会造成末屏开路,即主回路停电;在线测量产品的发展趋势是采用数字化测量技术,但当前的产品广泛应用有源或无源的穿心电流互感器提取高压电力设备绝缘的漏电流,在互感器的次级用 A/D 转换器对漏电流进行采样,用软件(如快速傅里叶变换、相关函数的算法和矢量内积算法)对漏电流进行正交分解以求得介质损耗角。

第 2 章 JYC61 型高压电力设备绝缘 在线监测与诊断系统

2.1 高压电力设备绝缘在线监测与诊断系统

如图 2-1 所示,整个高压电力设备绝缘在线监测与诊断系统采用分层式分布式计算机通信方式,第 1 级是在线监测部件(JYC61 型绝缘参数测试仪)负责对现场的各个高压设备的绝缘参数进行在线检测,然后把绝缘参数检测信息通过现场 CAN 总线传入数据采集器(JYC61A 型)中,数据采集器再将数据通过 CAN 总线网络与通信计算机(安装在现场)通信,信息被传到专家系统;通信计算机通过路由器接入 Internet 网络,接入供电局信息系统。

在图 2-1 中 JYC61 型绝缘参数测试仪对电气设备的介质损耗角 $\tan\delta$ 、流过介质的电流 I_x 、介质电容量 C 、设备接地电阻 R ,以及接入电气设备的三相交流电的 ABC 三相电压、三相电流、功率因素进行在线测量,并存储于测量装置的 RAM 中。当通信计算机有数据请求时,测量装置将根据数据采集器请求进行数据应答,并通过 CAN 总线数据链路层协议进行回应。通信计算机将每隔一定的时间实时进行数据请求,如果接收到电气设备的介质损耗角 $\tan\delta$ 、流过介质的电流 I_x 和介质电容量 C 三个参数中有一个参数超过了设定的临界值,那么通信计算机将对应的电气设备号以及对应的参数值通过 TCP/IP 数据链路发送到主控计算机。

2.2 系统测量指标

1. JYC61 型绝缘参数测试仪技术指标

介质损耗角 $\tan\delta$ 测量准确度: $\pm 0.5\%$;
高压电力设备接地漏电流测量准确度: $\pm 0.2\%$;
介质电容量 C 测量准确度: $\pm 1\%$;
漏电流测量准确度: $\pm 0.1\%$;
接地电阻测量准确度: $\pm 0.1\%$;
整机额定功耗: $\leq 1.5W, 5V \cdot A$;
参比频率: $(50 \pm 2.5)Hz$;
整机显示: 5 位液晶显示;
工作温度: $-40 \sim +55^\circ C$;
平均使用寿命: > 10 年;

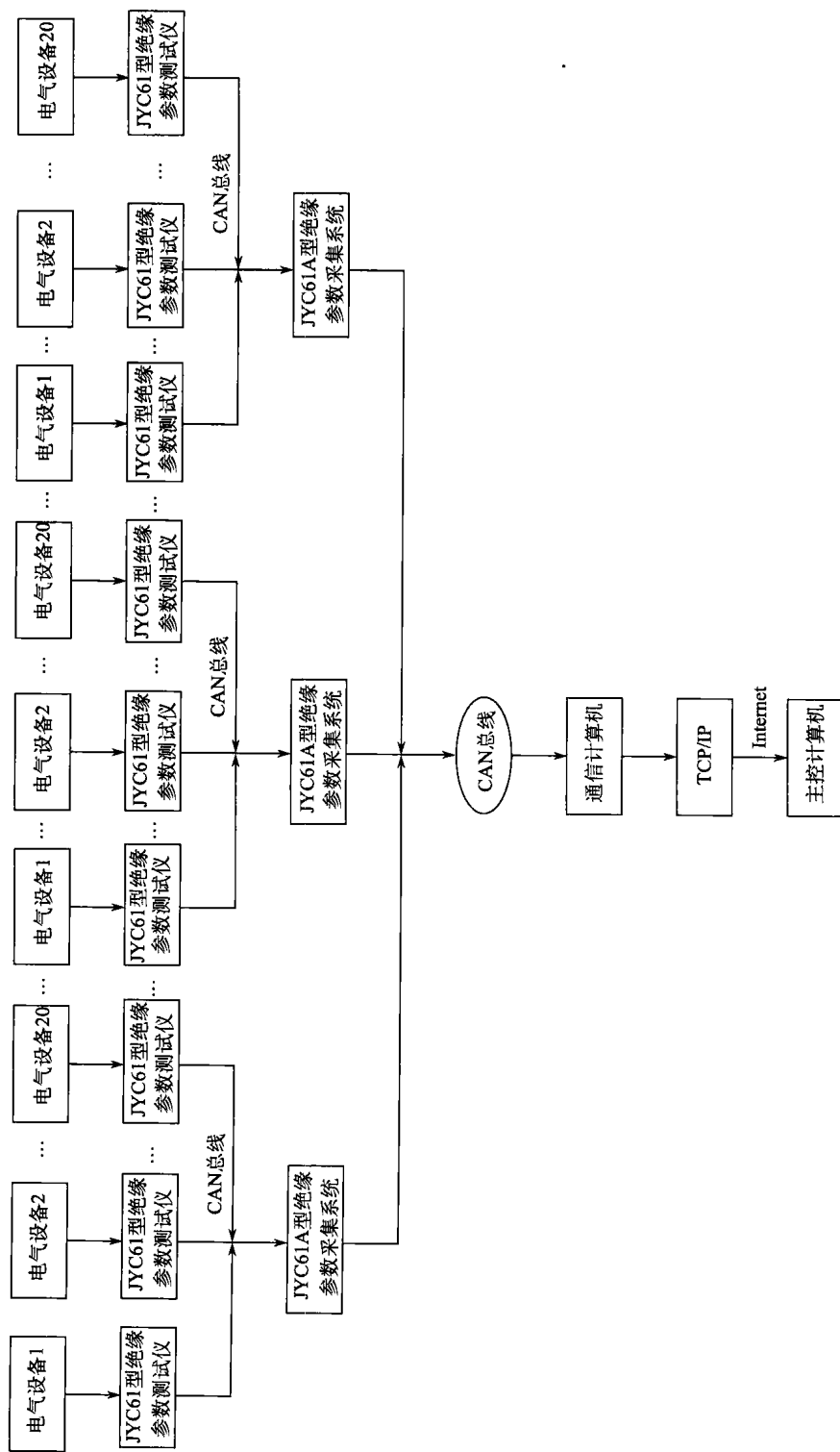


图 2-1 高压电力设备绝缘在线监测与诊断系统

通信接口:

① 电气隔离的 CAN 通信接口:波特率 1200b/s,通信距离 $\geq 1200\text{m}$,有失效保护功能。

② 调制型双向红外通信接口:载波中心频率 38kHz,有效角度 $\geq \pm 15^\circ$,通信距离 $\geq 4\text{m}$ 。

2. JYC61A 型绝缘参数数据采集器技术指标

对各 JYC61 型绝缘参数测试仪进行本地编程。

可以对网络中的 JYC61 型绝缘参数测试仪进行定时与即时抄表。

存储网络中各 JYC61 型绝缘参数测试仪的各类参变量数据。

直接将网络中各测试仪的各类参变量数据远传到通信计算机的抄表软件系统中,即时监测测试仪的运行状况。

通过电话或手抄器对网络中各测试仪实现远地编程。

仪器内带有电池监测,以便于当电池耗完电时,提醒用户。

具有温度监测,以用于时钟计时精度的修正。

整机额定功耗: $\leq 1.5\text{W}$, $5\text{V} \cdot \text{A}$;

参比频率: $(50 \pm 2.5)\text{Hz}$;

平均使用寿命: > 10 年;

通信接口:

① 电气隔离的 CAN 通信接口:波特率 1200b/s,通信距离 $\geq 1200\text{m}$,有失效保护功能,节点数 ≤ 20 。

② 调制型双向红外通信接口:载波中心频率 38kHz,有效角度 $\geq \pm 15^\circ$,通信距离 $\geq 4\text{m}$ 。

第 3 章 JYC61 型绝缘参数测试仪

3.1 电容性电器设备末屏接地电流信号 I_x 的提取

为了不改变被测设备的原有接线方式,电流互感器采用穿心式电流互感器,将电流互感器 TA 直接套在被测设备的接地线或末屏回路中。在电流互感器 TA 的次级通过连接互感器负载 Z_L 把次级电流 I_t 转变为与 I_x 同相的电压信号 U_x ,来实现在线测量电容性电器设备介质损耗角 $\tan\delta$ 、流过介质的电流 I_x 和介质电容量 C 。在线测量系统如图 3-1 所示。

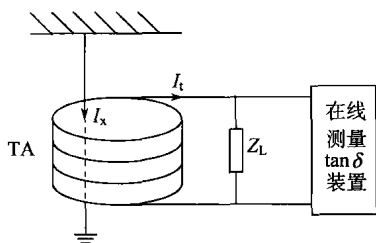


图 3-1 在线测量介质损耗角装置的接线方式

图 3-1 中,TA 是采用高导磁材料(玻莫合金)为铁心绕制的无源单匝穿心小电流互感器,它可灵敏地检测出 $5\mu\text{A}$ 的小电流。 Z_L 采用双线绕制精密交流电阻,减少电感量,以尽量使 I_x 与 U_x 同相位。

3.2 JYC61 型绝缘参数测试仪的测量原理

如图 3-2 所示,设与电流互感器同一母线的电压为

$$u_x(t) = U_M \sin \omega t \quad (3-1)$$

则通过电流互感器的漏电流为

$$i_x(t) = I_M \sin(\omega t - \phi) \quad (3-2)$$

式中, ϕ 为漏电流与电容型设备母线电压的相位。

3.2.1 漏电流 $i_x(t)$ 转换成电压 $u_A(t)$ 的原理

$i_x(t)$ 经过电流互感器 TA 转换后,次级输出电流 I_t 经负载电阻 R 转变为与 I_x 同相的电压信号 U_x :

$$u_x(t) = RI_M \sin(\omega t - \phi)$$

电压信号 U_x 经信号调理器的放大后,再通过低通滤波器;低通滤波器通 50Hz 的工频信号,滤掉高频干扰信号和电网中的高次谐波,使被测电压 U_x 接近于 50Hz 工频电压信号,从而达到断电时测量电介质绝缘参数的效果,设放大倍数为 K ,则

$$u_A(t) = u_B(t) = KRI_M(\sin \omega t - \phi)$$

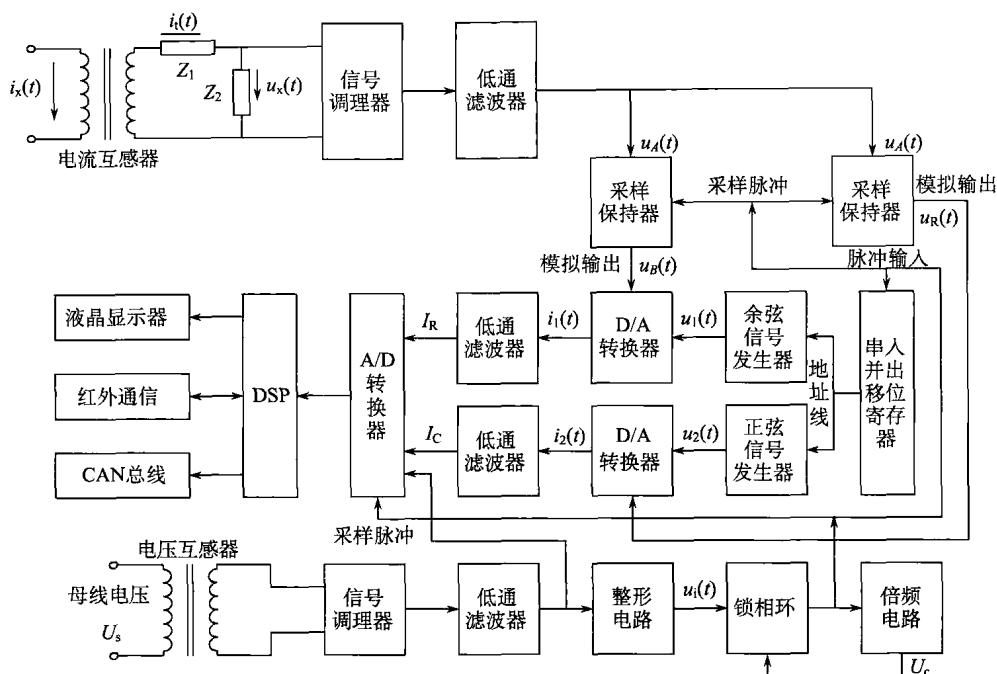


图 3-2 JYC61 型绝缘参数测试仪的测量原理

3.2.2 求母线电压 $u_s(t)$ 方法

母线电压经电压互感器变换后,经过信号调理器、整形电路、锁相环、倍频电路后,转换成与母线电压同步的倍频脉冲,作为信号发生器的地址触发脉冲与采样保持器的采样时钟。2 个信号发生器的函数分别进行一个周期 20ms 内 128 点的等时间间隔等分,信号发生器的输出电压分别为

$$u_1(k) = 0.5 \sin 100\pi \frac{k}{128} T + 0.5, \quad 0 \leq k \leq 127, \quad T = 20\text{ms} \quad (3-3)$$

$$u_2(k) = 0.5 \cos 100\pi \frac{k}{128} T + 0.5, \quad 0 \leq k \leq 127, \quad T = 20\text{ms} \quad (3-4)$$

采样保持器的采样脉冲为工频 50Hz 的 128 倍频信号,采样保持器的瞬时输出值为

$$u_B(t) = u_A(t) = \sin\left(100\pi \frac{k}{128} T - \phi\right), \quad 0 \leq k \leq 127 \quad (3-5)$$

3.2.3 二象限乘法器原理

模拟数字乘法器采用乘法型的数/模转换器 DAC1218,如图 3-3 所示是 D/A 转换器的典型连接方式, D 是输入数字码,反馈集成电阻 R_{fb} 集成在片内, V_{ref} 是参考电压输入端; A_1 为外接输出放大器,它将输出的电流信号转换为电压信号。

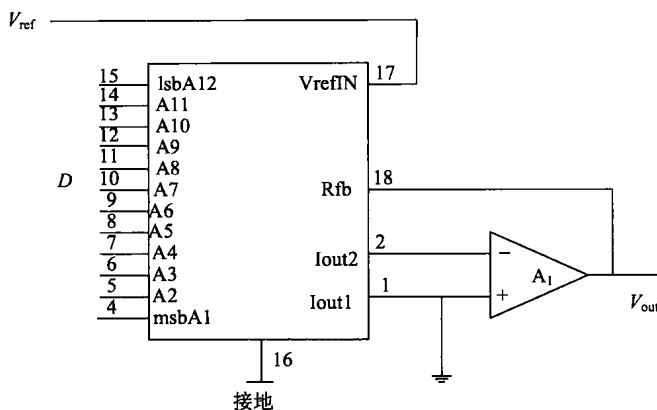


图 3-3 D/A 转换器构成的二象限乘法器原理图

若参考 V_{ref} 接采样保持器的输出电压, 则其参考电压既有正值, 又有负值。信号发生器的数字输出端接 D/A 转换器的输入端 D , 信号发生器的数字输出为正值电压, 所以图 3-3 构成了二象限乘法器, D/A 转换器的输出电压

$$V_{\text{out}} = V_{\text{ref}} \frac{D}{D_M} \quad (3-6)$$

式中, D_M 为 D/A 转换器的最大数字输入量。

3.2.4 硬件正交信号分解器

正弦、余弦信号发生器数字输出分别作为 D/A 转换器数字输入, 采样保持器的模拟输出连接 D/A 转换器的模拟参考电压输入端, 构成了模拟和数字乘法器, 将式(3-3)和式(3-5)代入式(3-6), 经三角函数公式化简得两个模拟和数字乘法器的输出电流分别为

$$i_1(t) = \frac{1}{D_M} \left[0.5 \cos \phi - 0.5 \cos \left(200\pi \frac{k}{128} T - \phi \right) + 0.5 \sin \left(200\pi \frac{k}{128} T - \phi \right) \right] \quad (3-7)$$

同理

$$i_2(t) = \frac{1}{D_M} \left[0.5 \sin \phi - 0.5 \sin \left(200\pi \frac{k}{128} T - \phi \right) + 0.5 \sin \left(200\pi \frac{k}{128} T - \phi \right) \right] \quad (3-8)$$

$i_1(t)$ 、 $i_2(t)$ 分别经过低通滤波器后, 低通滤波器输出电流分别为

$$I_R = \frac{1}{T} \int_0^T i_1(t) dt = \frac{0.5}{D_M} \cos \phi \quad (3-9)$$

$$I_C = \frac{1}{T} \int_0^T i_2(t) dt = \frac{0.5}{D_M} \sin \phi \quad (3-10)$$

其中, I_R 为漏电流流过介质等效电阻的电流, I_C 为漏电流流过介质等效电容的电流, 两个矢量如图 3-4 所示。

正弦、余弦信号发生器, 2 个模拟和数字乘法器及 2 个滤波器构成了硬件正交信号分解器, 将漏电流分解成与母线电压平行的电压信号 I_R 和垂直的电压信号 I_C , I_x 的正交分解向量图如图 3-4 所示。

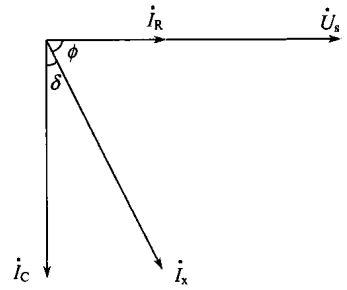


图 3-4 电容性设备末屏接地漏电流信号 I_x 正交分解向量图

3.2.5 求介质损耗角 $\tan\delta$ 及漏电流 I_x 的方法

A/D 转换器分别采集信号 I_C 和 I_R , 并输入 DSP 中。由 DSP 用基于数字低通滤波器采样算法软件求出 I_C 和 I_R 。根据图 3-4, 用软件计算介质损耗角 $\tan\delta$ 。

$$\tan\delta = \frac{I_R}{I_C}$$

漏电流信号 I_x 为

$$I_x = \sqrt{I_R^2 + I_C^2}$$

3.2.6 求等值电容 C 、接地电阻 R_s 的方法

母线电压经电压互感器转换后, 经信号调理电路及低通滤波器后, 设转换系数为 A , 则 A/D 转换器的输入电压为

$$u_s(t) = AU_M \sin\omega t$$

电压在 1 个周期内, 被 A/D 转换器采样 128 次, 电压瞬时值为

$$u(n) = \sin \frac{\pi}{40} k$$

由 DSP 用基于数字低通滤波器采样算法软件, 求出母线电压的有效值 U_{sr} 。由式(3-10)可知, I_C 为漏电流经介质电容 C 移相分量的平均值, 则一个电流周期 T 内介质电容 C 的电荷变化量为

$$\Delta Q = TI_C$$

所以, 等值电容变化量为

$$C = \frac{TI_C}{U_{sr}}$$

$$R_s = \frac{U_{sr}}{I_R}$$

3.2.7 软件求母线电压有效值 U_{sr} 、漏电流 I_x 的正交分解量 I_C 和 I_R 的算法

把电压瞬时值、漏电流 I_x 的正交分解量 I_C 和 I_R 的数字信号送入 DSP 处理器, DSP 内部的硬件乘法器完成电压和电压采样值的乘法运算, 得到电压瞬时值的平

方,即

$$u^2(t) = U_{sr}^2 + U_{sr}^2 \cos 2\omega t \quad (3-11)$$

由于硬件模拟低通滤波器不能将工频交流电压完全衰减掉,因而还有一定的交流分量,经过乘法运算后

$$I_R^2(t) = I_R^2 + mI_R^2 \cos(2\omega t - \phi) \quad (3-12)$$

$$I_C^2(t) = I_C^2 + mI_C^2 \sin(2\omega t - \phi) \quad (3-13)$$

式中, m 为远小于 1 的正数,即硬件模拟低通滤波器的衰减率。为了对测量原理进行说明,用函数 $f(t)$ 表示以上乘法运算结果,则函数 $f(t)$ 为

$$f(t) = F_0 + F_1 \cos 2\omega t \quad (3-14)$$

式中, ω 为工频电压的角频率, F_0 为函数中的直流分量, F_1 为谐波幅值。

因此,可得出漏电流 I_x 的正交分解量 I_C 、 I_R 的平方和电压有效值的平方的测量按式(3-14)进行,可转化为测量函数 $f(t)$ 一个周期内的积分平均值。函数 $f(t)$ 一个周期内积分平均值为

$$\overline{f(t)} = \frac{1}{T} \int_0^T f(t) dt = F_0 \quad (3-15)$$

由式(3-15)可知,如将函数 $f(t)$ 通过一个低通滤波器,即可滤除 $f(t)$ 中的谐波而得到直流分量 F_0 。

由式(3-15)可知,测量方法就是根据测量准确度的要求,设计一个数字低通滤波器的过程。当 $f(t)$ 通过低通滤波器后,为了保证测量准确度, $f(t)$ 中的各次谐波在通带内必须衰减到不影响 F_0 的测量准确度范围内,这就涉及数字低通滤波器的类型、通带截止频率及阶数的选择问题。IIR 数字滤波器是递推型,只需较少的阶数就能达到对 $f(t)$ 中谐波的抑制要求,满足测量动态响应时间的要求,所以本测量方法采用 IIR 数字低通滤波器。由于测量是通过数字信号处理技术实现的,所以 $f(t)$ 用数字序列 $f(n)$ 来表达为

$$f(n) = F_0 + F_1 \cos 2\omega k \quad (3-16)$$

式中, ω 为工频(50Hz)的数字角频率,其他参数的定义与式(3-14)的参数定义一致。

由式(3-16)可见,选择适当截止频率和衰减倍数的数字低通滤波器,可以滤除 $f(n)$ 函数中的谐波,得到的直流分量 F_0 ,即是所测的相关电参数。测量方法误差是由经过数字滤波后 $f(n)$ 中所含的谐波分量所引起的。因此,测量方法误差的研究,就转化为对 IIR 数字低通滤波器稳定性和幅频特性的研究。

3.2.8 通过测量准确度来确定数字低通滤波器通带误差和阻带误差

进行工频电压、电流有效值测量时,测量方法误差为 0.02%,即数字低通滤波器的通带误差为

$$\delta_1 = 0.0002$$

而阻带内的谐波对通带误差的影响,应为通带测量误差的高阶无穷小量,即阻带的谐波衰减至少应为

$$\delta_s \leq 10^{-5} \quad (3-17)$$

为分析方便,定义 $f=50\text{Hz}$ 的工频信号, Ω 为模拟角频率, $\Omega=2\pi f=100\text{rad/s}$; 图 3-2 中所用的转换器为 MAX197, 采样频率为 50Hz 的 128 倍频, 所以数字低通滤波器的采样率

$$f_s = 50 \times 128 = 6400(\text{Hz})$$

设 ω 为数字角频率, 则

$$\omega = \frac{\Omega}{f_s} = \frac{\Omega}{6400} = \frac{2\pi f}{6400} = \frac{\pi f}{3200} = \frac{\pi}{64} \text{ rad/sample} \quad (3-18)$$

其中, Ω 为模拟角频率, f 为频率。

3.3 数字低通滤波器的主要技术指标

本电功率测量方法的主要技术指标取决于数字低通滤波器的性能, 下面根据本测量系统的具体技术要求给出数字低通滤波器的两个性能指标: 数字低通滤波器阻带误差和数字低通滤波器的过渡时间。

1. 数字低通滤波器通带误差和阻带误差

进行工频(50Hz)有功功率测量, 实际上是要求出式(3-16)中的直流分量。为方便测量方法误差分析, 其测量方法误差主要是数字低通滤波器的通带误差, 所以当测量方法误差是 0.02% 时, 其通带内的准确度应为

$$\delta_1 = 0.0002$$

而阻带内的频率对测量精度的影响, 应为通带测量准确度的高阶无穷小量, 即阻带以外的衰减至少应为

$$\delta_s \leq 10^{-5} \quad (3-19)$$

2. 数字低通滤波器的过渡时间

由于工频电功率测量是实时测量, 国家标准对电功率测量的稳定响应时间有着严格的规定, 本测量方法稳定响应时间主要取决于数字低通滤波器的稳定建立时间, 所以根据国标 GB13340 对电功率测量过渡过程时间的要求, 低通数字滤波器的过程时间 t_s 应为

$$t_s \leq 400\text{ms}$$

根据以上给出的指标, 只要确定了数字低通滤波器的类型、通带截止频率 ω_c 、滤波器阶数 n , 就可确定滤波器的传递函数, 再根据一定的方法确定其滤波器的结构, 这样 IIR 数字低通滤波器就可完成设计。下面介绍具体滤波器的设计过程。为了以