

电力设备 $\tan\delta$ 在线监测技术

陈天翔 鲁华祥 张保会 马晓燕 李 彪 著



中国电力出版社
www.cepp.com.cn

TM711/49

2008

电力设备 $\tan\delta$ 在线监测技术

陈天翔 鲁华祥 张保会 马晓燕 李 彪 著



中国电力出版社

www.cepp.com.cn

内 容 提 要

电力设备介质损耗因数 $\tan\delta$ 的准确稳定测量一直是绝缘在线监测技术的一个难点与重点。本书在综述国内外对电力设备 $\tan\delta$ 测量技术研究状况的基础上,以 $\tan\delta$ 在线监测的高稳定性及精确性为目标,介绍了电力设备 $\tan\delta$ 在线监测信号处理分析技术、 $\tan\delta$ 新的测量方法、测量系统硬件设计及选择的基本方法、采用独立元分析方法在线校正处理电力设备 $\tan\delta$ 测量传感器特征参数等研究和技术成果,这些成果对促进电力设备绝缘在线监测技术研究、拓宽研究视野、进一步推动 $\tan\delta$ 在线监测技术的实用化具有积极意义。

本书适合电力企业、工矿企业和科研机构的高层领导、有关专家,从事电力设备绝缘在线监测技术研究和应用的管理和技术人员阅读、参考,也可供高等院校电气工程相关专业本科生或研究生参考使用。

图书在版编目 (CIP) 数据

电力设备 $\tan\delta$ 在线监测技术/陈天翔等著. —北京:
中国电力出版社, 2008
ISBN 978-7-5083-6051-5

I. 电… II. 陈… III. 电力系统-电气设备-故障监测 IV. TM7

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2007) 第 138857 号

中国电力出版社出版、发行
(北京三里河路 6 号 100044 <http://www.cepp.com.cn>)
北京博图彩色印刷有限公司印刷
各地新华书店经售

*

2008 年 5 月第一版 2008 年 5 月北京第一次印刷
850 毫米×1168 毫米 32 开本 5.625 印张 145 千字
印数 0001—3000 册 定价 15.00 元

敬 告 读 者

本书封面贴有防伪标签,加热后中心图案消失
本书如有印装质量问题,我社发行部负责退换

版 权 专 有 翻 印 必 究

前 言 PREFACE

随着国家经济社会的发展和人民生活水平的提高,对供电能力、供电可靠性、供电的技术经济性的要求越来越高。当前,我国城乡电网已经过大规模建设改造并在继续建设改造中,特高压、超高压、大容量电力设备将陆续投入运行,西电东送、南北互济、全国联网将陆续实现。随着电网的迅速发展和电力设备的迅速增多,日益走向市场重视效益和效率的电力企业为避免传统的周期性预防性试验和周期性检修带来的电网、设备、人身安全压力及巨额的经济投入,非常迫切需要开展以输变电设备状态在线监测与诊断技术为基础的状态检修。状态检修是以电力设备的状态监测和设备状态信息的综合分析判断来进行的检修方式。状态检修可以节约大量人力、物力,技术上更加先进、经济上更加合理地保证电网安全运行。中国工程院院士孙才新认为:“输变电设备状态在线监测与诊断技术是提高电网安全运行的第一道防御系统的关键技术之一,具有良好的应用前景。”

对于一个电力生产和运行企业,把每年的常规预防性试验与周期性检修的人力、物力、交通等费用,常规预防性试验与周期性检修过程中发生的误操作、误检修及相关人员、交通事故等损失,常规预防性试验与周期性检修过程引起的对客户停电损失、电量损失及供电可靠性下降的损失等所有损失费用,与常规预防性试验与周期性检修发现和处理的事故或缺陷可能引起的最大社会效益损失做一个比较,就会知道一年的无效投资非常之多!

作者对一个年售电量在 400 亿 kWh 左右的电力企业做过分析,平均每年的无效投资在 2 亿元以上。上述分析中还未考虑由

于无法准确掌握设备绝缘状态盲目更换更新未到设计使用年限的设备投资及为防止预防性检修和试验过程中发生误操作确保人员安全而增加的“五防”闭锁等装置投资。

目前，我国年用电量已达 3 万亿 kWh 以上，而且在今后许多年仍将高速增长，初步估算无效检修投资在 100 亿元以上。不考虑巨大的无效维修投资，全国每年由于停电检修或事故原因减少用电量按最保守的 1% 估计，损失电量就是 300 亿 kWh，销售电价按 0.4 元/kWh 计算，直接损失是 120 亿元。按我国权威部门指出的直接损失、间接损失和社会损失 1 : 4 : 6 的比例来计算，间接损失是 480 亿元，社会损失是 720 亿元。2003 年 8 月，由于绝缘问题（线路对树木放电）和计算机失效引发的“美加大停电”事故波及美国 8 个州和加拿大 1 个省，使美国损失了 40 亿~100 亿美元，使加拿大 8 月份的国内总产值下降了 0.7%。在线监测技术的重大社会经济效益及开发在线监测技术的迫切性由此可见。

在线监测技术实用化的关键是提高在线监测系统的稳定性、精确性、智能化、产品化水平。电力设备介质损耗因数 $\tan\delta$ 的准确稳定测量一直是绝缘在线监测技术的一个难点与重点。本书在综述国内外对电力设备 $\tan\delta$ 测量技术研究状况的基础上，以 $\tan\delta$ 在线监测的高稳定性及精确性为目标，介绍了电力设备 $\tan\delta$ 在线监测信号处理分析技术、 $\tan\delta$ 新的测量方法、投影寻踪方法、独立元分析方法在线校正处理电力设备 $\tan\delta$ 测量传感器特征参数、测量系统硬件设计及选择的基本方法等最新研究和研究成果。这些成果对拓宽电力设备绝缘在线监测技术研究视野和交流研究技术成果，进一步促进和推动 $\tan\delta$ 在线监测系统的实用化有积极意义。

当然，在新技术未成熟应用以前，我们不敢轻言放弃旧的传统技术，也不宜全盘否定或马上否定传统的预防性试验检修方法。还是那句话：“新技术的应用离不开老技术的积累。”

本书作者之一鲁华祥研究员是微电子学和人工神经网络专

家，34岁就成为中国科学院最年轻的博士生导师之一。他的学生说他是“工作在祖国科技一线的青年科学家”。他不仅是一位具有扎实雄厚的理论基础及创新能力，具有严谨细致科学作风承担国家重要科技攻关项目的科学家，而且还是一位热爱《红楼梦》和沈从文文章的、富有人文情怀和修养的谦逊学者。本书测量系统中关于信号测量和处理的硬件都是由他设计、制作完成的。在合作研究在线监测技术期间，我最佩服的不仅是他处理解决问题的深厚理论根底，还有他不同于一般研究人员的解决实际技术问题的突出能力。

张保会教授是我的博士生导师，本书大部分内容及关键技术就是在他的精心指导下完成的，书中的许多章节都包含老师的心血。作为一位继电保护专家，张老师一直致力于暂态量超高速保护新原理研究，他特别希望成熟的绝缘在线监测技术与继电保护技术结合，使传统继电保护从事故后才动作的“马后炮”保护方式转变为事故前就跳闸的更加科学经济的预知性预防性保护方式，实现电力技术的重大创新。

马晓燕是鲁华祥研究员的硕士研究生，是一位对投影寻踪、独立元分析有研究并将其应用于电力设备绝缘在线监测的优秀学生，她成功地解决了独立元分析方法信号分离结果的可靠性评价问题。

李彪硕士负责本书测量系统中有关软件的编制。我最怀念的是1997~1998年，我和李彪硕士有近一年的周末时间全部花在了兰州远郊110kV宣家沟变电站——一个20世纪70年代为备战而建在大山沟和山洞里的变电站。深夜，在山洞里的变电站控制室里调试最早研制的绝缘在线测量系统时，当我困倦地在值班室睡去时，他还在电脑前调试软件。周一清晨当我们从大山沟里踏雪走出，去山沟外的公路边搭乘便车时，两边大山上的皑皑白雪、路上的积冰、寒冷清新的空气使我们清醒。虽然身体疲惫，但我们有一种不断发现解决问题的快乐感和一种献身技术创新的自豪感。由于李彪硕士在软件编制应用方面的造诣，现在他在一

家商业银行担任总工程师。

感谢西安交通大学严璋、李彦明、刘君华、索南加乐教授，他们对本书内容进行了多次指导，提出了许多中肯的修改意见。

感谢甘肃省电力公司、西安森宝电气工程有限公司，感谢兰州供电局的王贇中、海世杰等同志，他们对作者们研发系统的完善和在现场的安装调试应用提供了极大的帮助。

保证电力系统的安全既要有很好的管理体制和管理方法，也要依靠技术进步和人员素质提高来支撑和保证，二者缺一不可。我们特别希望电力企业、科研机构的高层领导和有关专家能阅读本书，能够高度重视电力设备绝缘在线监测技术的研究应用工作，这是一个值得我们国家和特大型企业投入最优秀的科技资源去做的大课题，需要电力企业、学校、研究所等多学科多专业多方面协作以尽快攻克技术难题，这个大课题需要尽快以大投入、大合作来实现大产出。

陈天翔 博士

2008年4月于北京

目 录 CONTENTS

前言	1
第一章 绪论	1
1.1 电力设备实施绝缘在线监测的意义	1
1.2 $\tan\delta$ 在线测量技术研究的现状及意义	4
1.3 本书的研究思路	11
1.4 本书的主要内容	13
参考文献	14
第二章 基于系统模拟优化的微电流传感器研制	23
2.1 引言	23
2.2 微电流传感器的测量误差分析	23
2.3 微电流传感器的系统模拟优化	25
2.4 微电流传感器的试验	27
2.5 微电流传感器的屏蔽及抗干扰	29
2.6 本章小结	30
参考文献	31
第三章 基于平衡测量原理的 $\tan\delta$ 在线测量方法	32
3.1 引言	32
3.2 QSI 电桥 $\tan\delta$ 测量原理	32
3.3 传统 QSI 电桥测量 $\tan\delta$ 的优点及应用于 $\tan\delta$ 在线测量的难点	35
3.4 基于现有技术适于 MCU 实现的 $\tan\delta$ 在线测量方法	36

3.5	系统测量精度分析	38
3.6	基准电压信号 u_s 的获取	40
3.7	$\tan\delta$ 校核电路及实验室测量结果	40
3.8	本章小结	43
	参考文献	43
第四章	用 FFT 测量 $\tan\delta$ 的软件同步算法	44
4.1	引言	44
4.2	离散傅立叶变换计算 $\tan\delta$ 的泄漏栅栏效应 及改进算法	45
4.3	采样频率对离散傅立叶变换计算 $\tan\delta$ 的误差分析	51
4.4	修正离散傅立叶变换 $\tan\delta$ 测量计算方法	52
4.5	算法实现	54
4.6	算法计算机模拟和实测数据验证	55
4.7	本章小结	57
	参考文献	58
第五章	投影寻踪方法	59
5.1	概述	59
5.2	独立元分析原理及算法	66
5.3	实验模型及分析——源分量分离	73
5.4	本章小结	78
	参考文献	79
第六章	ICA 分离结果的性能评价	81
6.1	引言	81
6.2	最大似然估计	81
6.3	实验结果及分析	85
6.4	本章小结	93
	参考文献	94

第七章	BP神经网络对评价指标的改进	96
7.1	引言.....	96
7.2	BP网络的基本原理.....	97
7.3	分离结果评价量的BP网络建立.....	101
7.4	实验结果.....	103
7.5	本章小结.....	106
	参考文献.....	106
第八章	独立元分析方法在 $\tan\delta$ 在线测量中的应用研究 ...	108
8.1	引言.....	108
8.2	研究方法.....	108
8.3	数据分析中的数据表达和独立元分析技术.....	110
8.4	“盲元分离”技术.....	112
8.5	基于独立性的源分离.....	115
8.6	独立元分析原理.....	117
8.7	绝缘在线测量中的独立元分析.....	120
8.8	本章小结.....	134
	参考文献.....	134
第九章	绝缘在线监测系统硬件设计	137
9.1	引言.....	137
9.2	放大电路的设计和器件选择.....	137
9.3	模拟前端放大设计中的问题和对策.....	145
9.4	全分布式现场总线和智能测量单元技术研究.....	148
9.5	本章小结.....	154
	参考文献.....	154
第十章	系统集成及实际运行	156
10.1	引言.....	156
10.2	系统的组成及功能.....	156

10.3	现场实际运行情况	157
10.4	现场运行情况分析与总结	164
10.5	本章小结	165
第十一章	研究结论与展望	166
11.1	结论	166
11.2	需进一步研究的问题	168

绪 论

1.1 电力设备实施绝缘在线监测的意义

1.1.1 预防性试验的不足

随着电力系统向超（特）高压、大容量、大系统的发展，电力系统的安全运行对国民经济及人民生活的影响越来越大。随着经济与社会的发展，人们对供电可靠性的要求也越来越高。据统计，电力系统中 110kV 及以上变压器 80% 的事故是由电力设备的绝缘击穿事故引起的。运行中的电力设备的绝缘状态对电力系统的安全运行至关重要。长期以来，电力系统一直沿用传统的周期性的预防性试验来监测电力设备的绝缘，无论电力设备是否健康，均采用周期性的预防性检修方式进行检修。

实践证明：对电力设备定期进行绝缘预防性试验，可以发现许多绝缘缺陷，避免许多设备事故，保证电力设备安全运行。但是随着电力系统高压电力设备的大容量化和设备结构的多样化，以及对电力系统越来越高的安全可靠性的要求，使得这种传统的诊断方法显得越来越不适应。主要表现在以下几个方面：

(1) 试验时需要停电。停电不仅使运行人员需要进行大量的倒闸操作，还给用电客户的生产、生活带来影响。超高压大容量电力设备的停电越来越困难，并且往往造成漏试或超周期试验。

(2) 试验周期长，试验时间集中，耗费大量的人力、物力。绝缘预防性试验的试验周期一般为 1~3 年 1 次，一些发展较快的缺陷在两次试验之间的时间内可能发展成事故。试验往往集中在一段时间完成，在较短时间内需要完成大量设备的试验任务，难以对每台设备都进行十分仔细的检测和诊断。

(3) 试验方法的有效性、灵敏性较差。传统试验方法一般采用的试验电压均在 10kV 及以下，对于 110kV 及以上设备，这

种偏低的试验电压再加上现场的电磁场干扰等因素，难以灵敏有效地诊断出设备的初期缺陷。在现场经常发生预防性试验合格的设备投入运行后不久就发生事故的情况。

1.1.2 绝缘在线监测的定义与优点

为了适应电力设备向超（特）高压、大容量方向发展，确保电力设备的安全运行，迫切需要寻求新的更加行之有效的绝缘监测方法。经过长期的研究，人们已经发现：在运行状态下对高压电力设备的绝缘状态进行监测是反映设备绝缘状态的有效而又灵敏的方法，这就是在线监测。“在线”即被测设备处于正常运行状态而不需停电，试验在运行电压下进行，最能反映设备的实际绝缘状况。又由于试验无须改变设备的运行条件而可随时进行，因此不需要停电就可以随时掌握设备绝缘状况。在线监测是绝缘监测技术的发展方向。电力设备在线监测与诊断技术被称为是提高电网安全运行的第一道防御系统的关键技术之一，具有良好的应用前景。

电力设备的绝缘在线监测具有以下优点：

(1) 不需要电力设备停电就可以了解运行设备的绝缘状况，减少了停电对用电客户及供电可靠性的影响，减少了倒闸操作工作量，降低了安全风险及人员工作量，如能逐渐替代预防性试验，则可节省大量的人力、物力，社会效益及经济效益均十分明显。

(2) 预防性试验时，一般所加电压不超过 10kV，而运行状态下的监测是在设备的运行电压下，较预防性试验能更灵敏地发现绝缘缺陷，并可以随时实时监测，克服预防性试验周期性长的不足，提高监测的有效性。

(3) 绝缘在线监测测得的大量数据及对数据的判断分析可以为电力设备实施状态检修提供依据，实现应修则修，克服传统周期性的预防性检修这种盲目的检修方式的不足，为电力企业节约生产资金。

(4) 绝缘在线监测系统与电力系统管理信息网络结合，并采

用适用的专家诊断系统，可以大大提高绝缘监督的水平，为企业减人增效服务。

大量报道表明：在电力系统中，国内外主要是对发电厂锅炉、汽轮机、发电机三大设备开展状态维修，到 1998 年，全球电力企业中只有 4.3% 的输变电设备及 0.4% 的配电变压器装备了在线监测装置，这说明在现场强电磁场干扰环境中要使输变电设备的在线监测与诊断系统达到工程应用的水平还有一定的技术难度，还需要进一步深入研究及开发。本书的研究就是以对输变电设备的在线监测与诊断系统的关键参数绝缘介质损耗因数 $\tan\delta$ 的在线测量技术为方向的。

1.1.3 常规绝缘特征参数

从 20 世纪 80 年代开始，国内许多研究机构开始研究输变电设备（主要是变压器、互感器、耦合电容器等）常规绝缘特征参数（运行电压下流过设备绝缘的电流、电容量、介质损耗因数 $\tan\delta$ ）的在线监测，从学习前苏联的单独设备的带电测试逐渐向便携式或集中式的绝缘在线监测系统过渡，取得了许多研究成果，开发出了许多测量装置。И. М. 斯维等分析了电力设备绝缘的结构特点，提出在设备工作电压下测试流经设备绝缘的电流 I 、电容 C 、介质损耗因数 $\tan\delta$ ，能够比较有效地提高设备的运行可靠性。

常规绝缘特征参数主要有以下三种：

(1) 运行电压下流过设备的电流。当电力设备出现绝缘劣化、充油设备渗油或绝缘电容芯有脱焊等不安全情况时，运行电压下流过设备的电流会明显变大或变小。具有正常绝缘水平的设备其电流变化一般不应超过 $\pm 10\%$ 。

(2) 电容型电力设备的电容量及其变化。根据测得的电流信号及施加电压的相关量，可按公式 $C = I/U\omega$ 计算出电容量 C 。电容型电力设备出厂时有铭牌电容值，预防性试验或在线监测时实测的电容量可与铭牌电容值比较，不应有较大差距，一般正常电力设备电容量变化不应超过 $\pm 10\%$ 。

(3) 电力设备的介质损耗因数 $\tan\delta$ 。 $\tan\delta$ 对反映设备早期缺陷比较灵敏有效,对变压器套管、耦合电容器等小体积电容性电力设备尤为重要。《电力设备预防性试验规程》(DL/T 595—1996) 对不同种类的电力设备规定了 $\tan\delta$ 最大容许值标准,在线监测时可以参考。

随着传感器技术、计算机技术的发展与应用,在线监测参数和方法已逐渐扩大,局部放电、红外测温、气相色谱、超声定位等技术也已应用于绝缘在线监测。国内也开发了不少这方面的技术与装置。

1.2 $\tan\delta$ 在线测量技术研究的现状及意义

1.2.1 $\tan\delta$ 在线测量技术研究现状

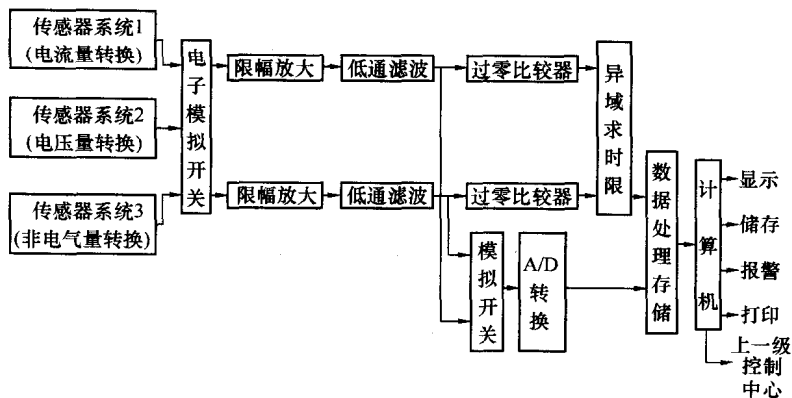
已有许多研究成果及开发出的测量装置在实际中应用,积累了宝贵的经验。实践证明,在变电站强电磁场干扰环境中实施常规绝缘特征参数的在线监测,对流过设备的电流、电容量的测量一般是可以满足要求的,而对 $\tan\delta$ 测量则多数存在稳定性不高、精确度不够的问题, $\tan\delta$ 的准确稳定测量是绝缘在线监测技术的一个难点与重点。影响到输变电设备在线监测与诊断系统的实用化。准确稳定测量 $\tan\delta$ 还有一定的技术难度,需要进一步深入研究与开发。

近几年来,对输变电设备常规绝缘特征参数的在线监测技术研究多集中于 $\tan\delta$ 在线测量研究。

典型的 $\tan\delta$ 在线监测系统原理框图见图 1-1。

从图 1-1 看出,集中型绝缘在线 $\tan\delta$ 监测装置可看成由信号采样及传输、信号处理、计算机显示和处理分析三大部分组成。

(1) 信号采样及传输部分。这部分主要由各种传感器和信号传输电缆组成。传感器主要用于实现与一次运行设备的隔离,采集需要的信号传输给信号处理部分。其中,传感器系统 1 多采用一匝穿芯式的无源或有源传感器,将所需要的电流量转换成相应

图 1-1 $\tan\delta$ 在线监测系统原理框图

的电压量。要求这些传感器具有良好的线性度、稳定性，波形无畸变，以保证采样信号的准确无误。传感器系统 2 多采用一些高精度隔离变压器，将所需要的较高幅值的电压量（TV 二次电压）转换成较低幅值（5V 以下）的电压量。要求这些隔离变压器具有良好的精度及稳定性，角差、比差应符合要求。传感器系统 3 多为温敏、湿敏传感器，将相应的非电气量转换为电气量输入信号处理部分。要求这些传感器的参量变换满足一定精度和稳定性，满足测量要求。

传输信号根据系统设计结构，多采用同轴电缆或通信电缆，也有为了减小外界干扰采用光电转换装置和光纤传输的，但造价较高。

(2) 信号处理部分。这一部分对采样信号进行处理并输入计算机。如将电流信号经 A/D 转换后输入计算机。这一部分是整个系统的中介和核心，也称硬件部分。

电子模拟开关供选择信号用，根据监测设备的数量可以设计模拟开关的路数。为了保证让基波正弦波信号进入比较器，必须消除输入信号中的直流成分和高频信号，因此要进行低通滤波、过零整形等处理，经过处理的数据根据计算机命令传输给计算机。

(3) 计算机显示处理分析部分。这一部分主要包括计算机(含软件)、打印机等,用来控制信号处理部分的工作方式,分析信号处理部分传输来的数据,根据电力设备绝缘监测的要求显示、储存所测量的各种数据、结果,必要时可打印出来,对超标准的设备提示报警,向上一级控制中心传输信息或接受命令。

近年来,对 $\tan\delta$ 在线监测技术的研究主要集中于对 $\tan\delta$ 在线监测用传感器的研究、对 $\tan\delta$ 在线监测信号处理分析方法的研究、对实际应用系统的研究,以及对 $\tan\delta$ 在线监测的原理方法研究。

$\tan\delta$ 在线监测的原理方法主要有两种:一种是硬件直接测量相位角,主要有过零点相位比较法、电压比较器法等;另一种是能采用软件实现的方法,主要是通过对监测信号 A/D 变换后,用软件对测量信号进行数字化处理以得到 $\tan\delta$ 值,主要是谐波分析法和改进的一些谐波分析法。

过零点相位比较法是国内外采用最多的 $\tan\delta$ 在线测量方法,其测量原理框图如图 1-2 所示。

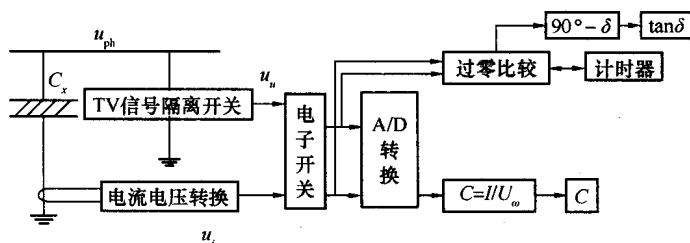


图 1-2 过零点相位比较法测量原理框图

图 1-2 示出了集中在线监测装置采用过零相位比较法及 A/D 转换法测量电容值 C 和 $\tan\delta$ 的原理框图。从电容型被试品 C_x 接地线处用传感器测得其电流信号 u_i , 将电压互感器二次电压按一定变比衰减至可以输入信号处理部分的电压 u_u , 根据测得的电流信号及施加电压的相关量,可按公式 $C=I/U\omega$ 计算出电容值 C 。如果不考虑电压互感器、传感器转换中角差的影响,则