

高等学校教材

电气绝缘在线检测技术

西安交通大学 严璋 编



高等学校教材

电气绝缘在线检测技术

西安交通大学 严璋 编

中国电力出版社

内 容 提 要

本书介绍对电力设备绝缘状况进行在线检测的原理及方法。全书共分9章,主要叙述了对电容套管、避雷器、绝缘子、变压器、GIS、电力电缆、高压电机绝缘等进行在线检测的技术,并介绍了在线监测系统。

本书注意吸收国内外近年来在线检测的新成果,主要是作为各高等学校的高电压技术、电力系统及其自动化等专业的选修课教材,并可供各电力部门或其他行业的动力部门从事电力基建、运行、维修及试验人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

电气绝缘在线检测技术/严璋编.-北京:中国电力出版社,1995.11(1998重印)
高等学校教材
ISBN 7-80125-332-9

I. 电… II. 严… III. 电气设备-绝缘性能-检测, 在线-高等学校-教材 IV. TM507

中国版本图书馆CIP数据核字(97)第04564号

中国电力出版社出版

(北京三里河路6号 100044 <http://www.cepp.com.cn>)

冶金联合印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行·各地新华书店经售

*

1995年11月第一版 2002年7月北京第四次印刷

787毫米×1092毫米 16开本 8.25印张 181千字

印数6211—8210册 定价:7.80元

版 权 专 有 翻 印 必 究

(本书如有印装质量问题,我社发行部负责退换)

前 言

我国电力工业发展很快，特别是最近几年，无论是装机容量还是年发电量都已进入世界前列；但以平均每人占有量而言，还排在许多国家之后。从迅速发展的工农业用电或生活用电来看，同样也能感到电力供应的不足。为此努力加快电力建设，维护使用好已有的电力设备，以确保国民经济的发展以及人民生活水平的提高，就显得十分必要。

几十年来所沿用的定期进行预防性试验的方法与制度，经过我国广大技术人员的不断改进，已为我国电力设备的安全运行发挥了重要作用。但随着我国电力设备额定电压的提高、单台容量的增大、结构品种的多样化，原有的主要依靠定期停电后进行绝缘预防性试验的方法就显得很不适应。不但试验时需要停电，更重要的是原有的停电后的试验内容及方法，不少已难以真实地反映出被试设备在运行条件下的绝缘状况。

近20年来，国内也有一些单位开始研究及试用在线监测的方法，但苦于没有较先进的检测技术及相应的仪器，以致难以实用化。近年来，传感器、计算机技术、光纤及新的测量技术的迅速发展，为实现在线监测创造了良好的条件；不少新的在线检测的方法及仪器已先后研制出来，它丰富了原有的绝缘预防性试验方法；有的已在投运后及时检测出设备缺陷，因而深受各地电力部门的欢迎。

本书是在西安交通大学多次讲授的“高压绝缘在线检测技术”讲义的基础上，将其改写成本书；拟重点介绍国内外比较成熟的在线监测方法的基本原理。而有关高电压绝缘的基本知识及试验方法等请参阅清华大学及西安交通大学合编的《高电压绝缘》教材。本书是在此基础上分章介绍有关电容型试品、避雷器、绝缘子、变压器、GIS、电力电缆、高压电机绝缘等的在线检测技术，并对绝缘在线监测系统也作了扼要介绍。为便于阅读，在介绍该设备的在线检测技术之前，先扼要回顾国内外采用的停电试验项目、问题及其进展概况，然后介绍相应的带电检测方法、仪器及技术等。因为离线及在线试验，都是绝缘试验中的重要内容，只有因地制宜、取长补短、密切配合并切实做好综合分析判断，才能发挥出更好的作用。

由于在线检测技术发展相当快，其中仅有一部分内容有第一手的体会；再加上时间仓促，难免有不妥之处，衷心欢迎指正。

本书由清华大学朱德恒教授主审。并在编写过程中得到国内外友人盛昌达、王乃庆、松浦虔士、池田易行、G.Gela等的大力支持；王绍禹、张古银、万达、陈化钢、李天云、刘俊、付宾兰、刘奕路、李建明、王健斌、吕志民等热情地提供了他们的不少研究心得，在此一并致以深切的谢意。

编 者

1995年1月

目 录

前 言

第1章 概论	1
§ 1.1 绝缘预防性试验的重要性	1
§ 1.2 现行预防性试验项目的回顾	2
§ 1.3 现行绝缘预防性试验的不足	3
§ 1.4 绝缘在线检测的发展概况	5
第2章 电容型试品的在线检测	7
§ 2.1 较常规的在线检测方法	7
一、电容电流的在线检测 二、用电桥法进行 $\tan\delta$ 在线检测	
§ 2.2 三相电容型试品不平衡信号的在线检测	11
一、几个绝缘特性参数分析 二、三相电流之和的在线检测 三、中性点不平衡电压的在线检测	
§ 2.3 $\tan\delta$ 及 C 的在线检测	16
一、应用硬件的方法 二、应用软件的方法	
第3章 避雷器的在线检测	21
§ 3.1 常规的预试项目	21
§ 3.2 FS型避雷器的在线检测	22
一、用兆欧表带电测绝缘电阻 R_i 二、泄漏电流的在线检测 三、工频放电电压的带电试验	
§ 3.3 FZ型避雷器的在线检测	24
一、电导电流的在线检测 二、电压分布的在线检测	
§ 3.4 FCZ型避雷器的在线检测	27
§ 3.5 金属氧化物避雷器的在线检测	28
一、基本方法 二、全电流的在线检测 三、高次谐波法 四、零序电流法 五、阻性电流在线检测	
六、在线检测时相间干扰的影响	
第4章 绝缘子的在线检测	37
§ 4.1 带电测量绝缘电阻及电压分布	37
§ 4.2 不良绝缘子的遥测方法	39
第5章 变压器绝缘的在线检测	42
§ 5.1 常规绝缘试验的内容	42
§ 5.2 油中溶解气体的在线检测	43
一、油中溶解气体色谱分析的基本原理 二、油中气体的现场脱气方法 三、油中气体的现场测量方法	
§ 5.3 变压器油中微量水分的在线检测	55
§ 5.4 变压器局部放电的在线检测	56
一、基本电路 二、局部放电的现场检测	
§ 5.5 变压器绝缘老化程度的在线检测	65
第6章 GIS绝缘在线监测	66
§ 6.1 GIS在线监测的重要性	66

§ 6.2	监测GIS局部放电的电气方法	68
	一、测量通过接地线的电流 二、在绝缘子里预埋电极 三、箱壳内专用电极 四、在容器壁外检测	
§ 6.3	监测GIS局部放电的非电方法	71
	一、加速度传感器 二、光学方法 三、分解气体检出法	
第 7 章	电力电缆绝缘的在线检测	76
§ 7.1	引言	76
§ 7.2	绝缘试验的项目	77
	一、直流耐压及泄漏电流法 二、其他试验方法	
§ 7.3	电缆绝缘的在线检测方法	83
	一、直流叠加法 二、直流成分法 三、电缆绝缘 $\tan\delta$ 的在线检测 四、局部放电在线检测	
	五、接地线电流法 六、低频叠加法	
第 8 章	高压旋转电机绝缘的在线检测	96
§ 8.1	概述	96
§ 8.2	电机绝缘试验的特点	96
§ 8.3	发电机过热的在线检测	101
§ 8.4	用气相色谱法在线检测	103
§ 8.5	用中性点射频法在线检测	104
§ 8.6	局部放电的在线检测	106
第 9 章	绝缘在线监测系统	110
§ 9.1	设备及变电所的监测系统	110
§ 9.2	专家系统的应用	114
参考文献		124

第1章 概 论

§ 1.1 绝缘预防性试验的重要性

高压电气设备主要是由两类不同材料构成：一类为金属材料，包括铜、铝等导电材料，硅钢片等导磁材料，铸铁、钢板等外壳或结构材料；另一类为绝缘材料，如绝缘纸（及纸筒、纸板）、塑料薄膜、层压板（及筒）、电瓷、绝缘油等。相对于金属材料而言，绝缘材料容易损坏，特别是有机绝缘材料，如绝缘纸、塑料、绝缘漆或胶等，很容易老化变质而使机电强度显著降低。因而绝缘结构的机电性能的好坏往往成为决定整个电气设备寿命的关键所在。例如，对110kV及以上的电力变压器的93次事故原因分析，其中由于匝绝缘、引线及对地绝缘、套管绝缘所引起的各事故约占43%、23%、15%；而铁芯、分接开关等非绝缘事故仅占20%以下。

因此，高压电气设备不仅在出厂前，应按有关标准进行严格而又合理的试验（型式试验及例行试验）；而且在投运前要进行交接试验，在运行过程中要定期进行预防性试验，这样才能较好地保证该设备的安全运行。

关于预防性试验的项目，我国已经积累了一套比较成熟的试验内容。对于各类设备，现行的预防性试验内容可大致归纳为表1-1所列。

表 1-1 我国现行的绝缘预防性试验项目的主要内容

设备名称 是否试验 试验项目	电力变压器	电力电缆	高压套管	断 路 器		发电机
				充SF ₆	充 油	
1. 测定绝缘电阻 R_i	✓	✓	✓	✓	✓	✓
2. 测量直流泄漏电流 I_1	✓	✓	—	✓	✓	✓
3. 直流耐压试验	—	✓	—	—	—	✓
4. 测量介质损耗角正切值 $\tan \delta$	✓	✓	✓	○	✓	○
5. 绝缘油试验	✓	✓	✗	—	✓	✓
6. 微量水分测定	✗	—	✗	✓	—	—
7. 油中溶解气体色谱分析	✗	—	✗	—	—	—
8. 局部放电试验	—	—	✗	—	—	—
9. 交流耐压试验	○	—	○	○	✓	○

注 “✓” 进行；“—” 不进行；“✗” 仅电压高或容量大时进行；“✗” 必要时进行；“○” 大修后进行。

可见那些非破坏性试验项目，如测量绝缘电阻 R_i 、测量介质损耗因数 $\text{tg}\delta$ 、测量直流高压下的泄漏电流 I_i 等，几乎被广泛用作各种高压电气设备的预防性试验项目；而象交流耐压那样的可能引起残余破坏的破坏性试验项目，仅仅在必要时、大修后等情况下才进行，而且在非破坏性试验项目通过后才可进行。

§ 1.2 现行预防性试验项目的回顾

根据过去长期的运行经验及试验研究中已逐步确立起来的这些预防性试验项目，为确保电气设备的安全运行曾发挥过很大作用；而且当时确实考虑了如何采用简便而较有效的方法来估计设备的绝缘状况。

例如当绝缘总体受潮或严重损坏时，往往引起绝缘电阻 R_i 的下降或直流泄漏电流 I_i 的上升。而采用兆欧表是一种最简便的测量高电阻的方法，兆欧表常采用流比计原理——电流及电压线圈安装在同一转轴上，当通电流后两者产生的转矩正好反向。这样巧妙的布置减少了由于电压波动等引起的电阻测值的波动，方便易行，深受用户欢迎。

如果感到兆欧表的直流电压太低（一般为1 kV 或2.5 kV），还可采用加以直流高压来测量泄漏电流 I_i 。这时还便于观察随着外施电压的上升， I_i 是否也基本上按比例上升。因为当存在有某些缺陷时，高压直流下的绝缘电阻（由泄漏电流换算而得） R_i 往往比低压下用兆欧表测得的小得多。

由于测到的绝缘电阻 R_i 或泄漏电流 I_i 与被试品的绝缘尺寸（电极间的绝缘距离、截面等）紧密相关，因此在绝缘试验时应对这些数据进行“纵比”——与同一设备过去的测量数据作比较，或“横比”——与同类被试品进行互相对比（例如求取三相不平衡系数等），才能作出比较正确的分析。在预防性试验时，对绝缘电阻测量时要求测其吸收比（ $R_{60''}/R_{15''}$ ）或弱点比（ $R_{10'}/R_1'$ ），也正是为了消除因绝缘尺寸不同带来的影响，而改以观察同一被试品在吸收过程中的相对变化。采用这些简便易行的方法在确定被试品是否存在普遍受潮等缺陷方面已起了很好的作用。

然而，当前大量使用的是交流高压电气设备，在测绝缘电阻 R_i 或泄漏电流 I_i 时所加的是直流电压，其等效性如何？以串联介质组成的绝缘结构为例，一般情况下加交流时其电位分布是按该串联层的电容大小呈反比分布，而在稳态直流时，是按电阻大小呈正比分布，显然两者会有很大差异；而且施加同样幅值的直流高压或交流高压，绝缘中的损耗、局部放电过程，在交流下都比直流下严重得多。因此在交流高压下运行的设备最好仍测量其交流下的参数变化，这显然更真实些。当然如进行提高电压的交流耐压试验，会更加严格，但对由油纸绝缘材料构成的绝缘结构所带来的残余损伤也将比直流高压试验时严重得多。

在被试品的电容量很大的情况下，如电力电缆、发电机绝缘，当用直流耐压试验时试验设备容量可以小得多；而且外施直流试验时又易于发现高压旋转电机端部的缺陷，因此过去在预防性试验中直流耐压的方法仍相当广泛地被采用（见表1-1中项目3）。

用西林电桥法来测量交流下的介质损耗因数 $\text{tg}\delta$ ，是一种很有价值的试验方法。首先，测到的真正是反映交流下损耗大小的特征参数，即它与绝缘的几何尺寸无关，便于直接由

此来判断绝缘的介质损耗（上述测到的 R_i 及 I_i 均与绝缘尺寸有关）。其次，对于高压电气设备的结构而言，总的介质损耗功率相对于此绝缘的无功功率总是只占一个很小的比例，如仍用瓦特计往往难以得到准确的测值，采用电桥原理，就可方便地由调节电桥上的电阻、电容而使电桥平衡，从而读得较准确的 C_x 及 $\text{tg}\delta$ （见图2-3）。

现场中大量的高压电气设备的外壳都已固定接地，因而改“正接法”为“反接法”；试验人员通过绝缘杆来调节处于高电位处的 C_4 、 R_3 ，好在此绝缘杆以及配套的标准电容器的耐压均大于额定试验电压（如10kV），因此按规定加10kV来“带电”操作绝缘杆还是足够安全的。

对于油浸电力设备，测量绝缘油的击穿场强、水分、酸值等也是相当有意义的。因为在油-纸（或塑料）组合绝缘中，如仅仅是油质受潮，那一般在经过换油或干燥处理后，绝缘性能很快可以恢复。例如久置不用的油浸电力变压器有可能受潮，如要重新启用时，不宜马上经耐压试验，而是先做非破坏性试验；若只是受潮，干燥后性能就可恢复。

气相色谱分析方法的引入，在发现油浸设备潜伏性故障的灵敏度方面往往比测量绝缘电阻及 $\text{tg}\delta$ 等高得多，因此正在修订中的预防性试验规程中准备将它列为对电力变压器绝缘预试项目中的首位。虽然各国在油中溶解气体的判断标准上有些差异，但都在实践中发挥了很好的作用。实际上，我国地域辽阔、各地运行条件不同，各制造厂所用的材料、工艺也有差异，色谱等的判断标准也宜因地制宜。前几年，通过调查研究，国内对色谱判断标准提出了相应的“注意值”。与其他的预防性试验的判据一样，今后仍然需要进一步积累运行经验，特别是事故前各次预防性试验的数据及其发展过程，都极有实用价值。

另外，当前运行的高压电气设备中大量采用了油-纸（塑料）组合绝缘。这些有机绝缘材料的寿命曲线相当陡峭：即它在短暂的高场强下绝缘强度极高；而在交流电压的长期作用下，材料逐渐劣化，其长时击穿场强仅为其短时的百分之几。在这里，因局部放电所伴随而来的电、热、机械、化学方面的作用，对有机绝缘的老化（不可逆变化）起了决定性作用。但其表现形式是多样化的：如油浸变压器中的围屏放电、电力电容器的膨胀破裂、塑料挤压成形的电缆中的树枝状放电等。因而对高压电气设备进行局部放电试验不仅要在制造厂里进行，而且逐渐发展到也在运行现场进行。但在变电所，外界干扰强，要从中分辨出被试品中较微弱的局部放电信号相当困难。

我国现行的绝缘预防性试验方法的主要项目如表1-1所示：在停电以后，主要是测量直流下的绝缘电阻 R_i 或泄漏电流 I_i 、测量交流下的介质损耗因数 $\text{tg}\delta$ 等。对于油浸电气设备要取油样进行绝缘油试验，容量大或电压等级高的电气设备还要进行油中气体的色谱分析等，然后对该设备的绝缘状况作出综合判断。今后必将陆续有新的、有效的方法补充进去。

§ 1.3 现行绝缘预防性试验的不足

人们最关心的是绝缘结构的残余电气强度，但至今还未找到它与绝缘电阻 R_i 、泄漏电流 I_i 及介质损耗因数 $\text{tg}\delta$ 等非破坏性试验参数之间的直接函数关系。

过去进行的预防性试验的方法及经验是前人多年工作的总结,它已经发挥过不少积极作用;但近年来愈来愈多的电力工作者从实践中意识到,过去的试验项目如今怎么不大灵了呢?例如一台220kV油纸电容式电流互感器,在停电预试时,按规程加10kV电压,测出 $\text{tg}\delta$ 为1.4%,小于规程规定的指标1.5%,但投运后就爆炸了。

这是因为所测得的绝缘参数往往是反映整体绝缘性能的宏观参数,而在多少条并联通道中只要有一条贯穿通道的绝缘强度下降,就足以导致整个电气设备的故障。

例如当缺陷只占某设备绝缘尺寸的很小一部分,如图1-1中的 $C_d, \text{tg}\delta_d$ 区域,而在两电极间测得的是其总体的介质损耗,原来无此缺陷时的损耗为

极间测得的是其总体的介质损耗,原来无此缺陷时的损耗为

$$P = U^2 \omega (C_1 + C_d) \text{tg}\delta \quad (1-1)$$

缺陷发展以后的损耗为

$$P' = U^2 \omega (C_1 \text{tg}\delta + C_d \text{tg}\delta_d) \quad (1-2)$$

其中 $C_1, \text{tg}\delta$ 指绝缘仍良好的那部分的参数。

这时,即使该缺陷区域的介质损耗因数已很大,

如 $\text{tg}\delta_d = 100\text{tg}\delta$,但假定它只是很窄一细条,如 $C_d = 0.001C_1$,则由式(1-1)及式(1-2)得 $P'/P =$

1.1。如原来测得的整体 $\text{tg}\delta$ 为0.9%,现虽有一细条的 $\text{tg}\delta_d$ 已经增为90%,但由上述可见,测得的整体介质损耗因数 $\text{tg}\delta'$ 仅增至0.99%,即难以觉察。

近年来,在可能的情况下尽量进行“分解试验”:例如将有小套管引出的电容式套管与变压器本体分开来测试,对断路器进行大修时将灭弧室等一一分开来试验等。对难以分解的,采用多端测量的方法,例如对三绕组变压器,就宜用几种不同的接线方式测量后,分辨出缺陷在哪一部分。

另外,由于停电后进行非破坏性的预防性试验时,按现行规程规定,所加的交流试验电压一般不超过10kV;如再要加高试验电压来测 $\text{tg}\delta$,所用的标准电容器以及当用反接法测量时所用的电桥的绝缘必须另行加强。现行的变电设备中有很大部分的运行相电压为 $110/\sqrt{3} \sim 500/\sqrt{3}$ kV,即工作电压已远高于其预防性试验电压(10kV),以致即使在绝缘中的气隙甚至油隙于工作电压下发生放电,但在这样低的试验电压下试验仍被通过了。因此,对高压、超高压电气设备中的这些缺陷,再加很低的试验电压意义不大。如安徽某电业局一台OY110/ $\sqrt{3}$ -0.0066耦合电容器,停电试验全合格,但运行不到三个月发生爆炸。

如能利用运行电压来对高压设备绝缘状况进行试验,则可大大提高试验的真实性与灵敏度,这是在线检测的主要着眼点。此外,这样的带电监测就不必再安排停电计划了,这显然给电力系统的运行带来方便。过去一般是1年左右进行一次停电试验,现在完全可以根据设备的绝缘状况的好坏来选择不同的在线检测周期,使试验的有效程度明显提高。而且由于试验数据将远比1年一次为多,从而便于对数据进行统计分析等而减小由于仅仅一次试验所带来的误差。

在线检测将成为预防性试验中的一个重要组成部分,它将在很多方面弥补仅靠定

期停电预试的不足之处。但不能认为,如将原有的停电预试项目全改为在线检测就可万无一失了。如前所述,过去所用的非破坏性试验所得的结果还往往难以全面、真实地反映绝缘状况,特别是其电气强度。近年来,色谱分析、局部放电等试验的引入,对发现某些缺陷相当有效,但对另外一些缺陷仍难以在早期发现;因此,继续研究新的预防性试验参数及方法是势在必行的。

另外,对被试设备的当前试验数据(包括停电及带电监测),结合过去的的数据及经验,用先进的方法及时而全面地进行综合分析判断,也将为捕捉早期缺陷、确保安全运行带来好处。现正在修订中的预防性试验规程中也比过去更加强了对试验数据的对比分析。

从国外情况来看也这样,在线检测的推广还有利于从定期维修制(计划维修制)过渡到更合理的状态维修制(预知维修制)。我国目前执行的大多是定期维修制,一般都要求“到期必修”,没有充分考虑设备实际状态如何,以致超量维修的不少,造成了人力及物力的大量消费。

各国在早期都曾采用的是事后维修(Breakdown Maintenance)。美国在40年代、日本在50年代曾经改用定期维修,即按事先制订的检修周期按期进行停机检修,因而也称“时间基准维修”(Time Based Maintenance)。它虽对提高设备可靠性起了一定作用,但由于未考虑设备的具体状况,而且制订的周期往往比较保守,以致出现了过多不必要的停机及维修,甚至因拆卸、组装等过多而出现过早损坏。

50年代,美国通用电气公司等已提出要从以时间为基准的维修方式发展到以状态为基准的维修方式,即状态维修(Condition Based Maintenance),日本等在70年代左右也转向采用状态维修。

状态维修的基础就在于绝缘检测及诊断技术,既要通过各种检测手段来正确诊断被试设备的目前状况,又要根据其本身特点及变化趋势等来确定能否继续运行或检修周期。国内有些电业部门已迈出了这一步,如大连电业局在1992年起就试行了从定期检修转向状态维修,并已初见成效。为实现状态维修,在线监测的重要性也就更加突出。

§ 1.4 绝缘在线检测的发展概况

我国对在线检测的重要性也早有认识,60年代时就提出过不少带电试验的方法,但行之有效的却不多。如有的要在沉重的外壳下面垫进绝缘板;有的需配以带电作业的工具或设备,而测量的结果分散性很大,因此就缺乏推广的价值。这也说明,在运行高压下进行在线检测会比停电后加较低的试验电压更加真实、及时,然而要实现起来困难是不少的。

近年来,随着传感器、计算机、光纤技术等的发展与引用,在线绝缘检测也开发出了新的篇章。图1-2绘出在线检测中一些基本流程的方框图:由各种传感器所采集的信号,经过必要的转换或处理后,统一送进数据处理系统进行分析。为采集及处理不同的信号就需要相应的硬件或软件支撑。综合分析判断后输出结果:可以屏幕显示或打印,也可存盘待用;有的如发现异常,根据不同的设计可发警报或进行相应的操作;也可以与上一级检测中心相连,即形成多级的监控系统SCADA(Supervisory Control and Data Acquisition)

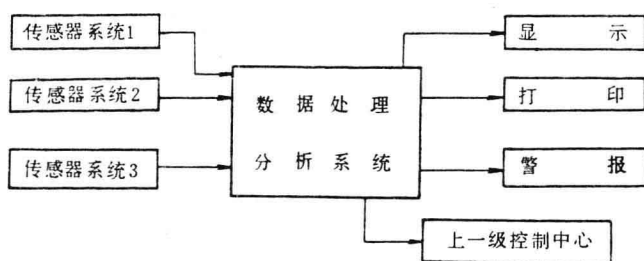


图 1-2 在线检测基本流程框图

中的一部分。例如，在设备旁边的传感器及预处理系统可用单片机，而在变电所及电业局里有微机对各设备的参数进行统一储存、管理、分析、诊断等功能。这样的设想在国内有些变电所已开始实现了。

因此，首先是如何选用或研制各种需用的传感器，以便从被监测的设备上获取信息，有时还需从其他设备上同时取得作为对比或基准的信息；然后是如何无畸变地送到数据处理系统去进行分析、存储。因为这些工作很多是在现场进行，在设备带有高电压下进行；所以要设法准确地获得并传输这些相当微弱的信号，使之少受或不受干扰。这时就需采用一系列的屏蔽抗干扰措施，例如有的采用光纤及电-光、光-电变换，即E/O—光纤—O/E系统。要准确地在地线侧获取电流信号，又不改变原有的一次接线，现多采用穿心式互感器（或称I/U传感器），但此时常难以保持一、二次之间电流的角差、比差很小且恒定。

值得注意的是：在图1-2中各传感器所采集的信号，既可能是电气参量，也可能是温度、压力、振动、超声等非电参量。正如色谱分析原先主要广泛用于环境监测等方面，但引用来对油浸电力设备潜伏性故障监测后，发现它对监测出局部过热、电弧放电的灵敏度远高于已采用的电气方法，各国都乐于采用。近年来，陆续有将机械、化学、物理等方法用于在线监测的报导，也就是利用多种有效手段来对绝缘状况进行监测，然后再进行综合分析判断。

表1-2列出目前国外对主要电气设备较常用的一些方法，以供参考。

表 1 2 国外常用的绝缘在线监测方法举例

设备名称	电 气 法	机 械 法	化 学 法	物 理 法	综合方法
发电机、电动机	局部放电(电荷量、地线电流法)	自振荡频率	红外光谱、色谱分析	微粒离子化法、电磁波法	局部放电及微粒离子化法
变压器、电抗器	局部放电(电荷量、地线电流法)	超声波、振动加速度	色谱分析(单成分或多成分)		地线电流法及超声波法
金属氧化物避雷器(MOA)	阻性电流(基波、谐波)、功耗			湿度	湿度及阻性电流
GIS(SF ₆ 及支撑绝缘子)	局部放电(电荷量、地线电流法)	超声波、振动加速度	气体色谱分析、变色法	电磁场、光测法、测气压	局部放电及测气压
交链聚乙烯电力电缆	直流泄漏、直流成分、局部放电量、tgδ法	超声波		温度	直流成分法及tgδ法

第2章 电容型试品的在线检测

对于象高压电容式套管、耦合电容器、电容式电流互感器等设备，都可以把它们看成是由若干个电容器相串联而成的绝缘结构（电容型试品）。在停电后进行预防性试验时，如前表1-1所示，常对它们定期地进行电容量 C 、介质损耗因数 $\text{tg}\delta$ 等的测量。近年来，在线监测在运行高电压下流过这些电容型试品的 I （电流）、 C 及 $\text{tg}\delta$ ，已发现是一种比较有效的预防性试验方法。

§ 2.1 较常规的在线检测方法

在未引用计算机、光纤等新技术以前，国内外对这些电容型试品也已有了在线检测方法。

一、电容电流的在线检测

其原理如图2-1所示，早期曾用以对耦合电容器等的电容电流进行带电检测。由于接地闸刀 K 左侧还可能接有高频载波通信装置 J ；则在测量前应在合上 K 的情况下，先将原接至载波或保护装置 J 间的连线拆除，然后并以合适量程的0.5级交流毫安表。再用绝缘杆拉开闸刀 K ，读取在运行电压 U 下流过此电容型试品的交流电流 I_c 。根据 U 及 I_c ，计算出实测电容量 C 并与过去的测量值或铭牌值 C_0 作比较。

规程上虽规定耦合电容器的电容量变化与 C_0 的比值 $\Delta C/C_0$ 容许在 $-5\% \sim +10\%$ 范围内，但实践中往往感到 $\Delta C/C_0 > +5\%$ 时就应缩短试验周期，好在采用在线监测时更易办到；而当 $\Delta C/C_0$ 达 -5% 时，常反映缺油严重。至于仅由二节相串所组成时，用此方法也多次发现过有一节有严重事故的实例，如表2-1所示。但若串环节数多时，变化相应就会减小。

表 2-1 对耦合电容器带电监测的实例

型 号	额定电压 (kV)	铭牌电容 C_0 (pF)	实 测 值		计 算 值		备 注
			电压 (kV)	电流 (mA)	C_x (pF)	$\frac{C_x - C_0}{C_0} (\%)$	
OY—110/ $\sqrt{3}$	110/ $\sqrt{3}$	6080	67.9	127	5957	-1.7	合 格
—0.0066	110/ $\sqrt{3}$	6405	66.7	134.6	6424	+0.3	合 格
YDR—220	220/ $\sqrt{3}$	3050	136.2	264	6170	+102	二节中一
2×OY—110/ $\sqrt{3}$	220/ $\sqrt{3}$	5010	130	418.8	10260	+105	节烧坏

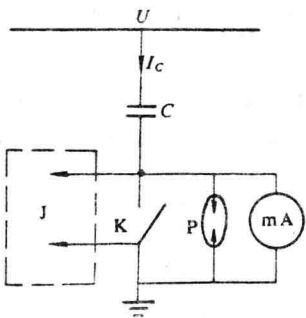


图 2-1 电容电流 I_c 的带电检测原理图

对电容式电流互感器的在线检测方法与图2-1极相似,仅这时无高频载波通信装置J。而220kV 电流互感器的主电容(作为一次绕组的导电芯与末屏之间的电容),一般约500~900pF,在运行电压下的电容电流约为20~40mA,故常选用50mA 量程的交流毫安表。其实例如表2-2所示。

表 2-2 对电容式电流互感器带电监测的实例

序号	型 号	铭牌电容C ₀ (pF)	实 测 值		计 算 值		备 注
			电流 (mA)	电压 (kV)	C _x	$\frac{C_x - C_0}{C_0} (\%)$	
1	LCLWD3—220	812	34.8	132	835	+2.8	正 常
2	LCLWD3—220	801	43.3	133	1038	+30	有三层电容击穿
3	LCLWD3—220	745	33.2	132	801	+7.5	受 潮
4	LB—220	756	31.8	130	780	+3.2	正 常
5	LB—220	685	31.9	130	782	+14	有一层电容击穿

可见,由于电容式电流互感器的一次绕组与末屏间的电容屏总数远较电容式套管为少,因此只要任二相邻屏间的电容层有贯穿性击穿,测得的电容量即有明显变化而可被检测出来。一般当电容量相对变化超过±10%时,就应分析原因。如表2-2中的序号2及5;当电容量相对变化较大虽还未超过10%,也宜与tgδ监测等结合起来综合判断,如序号3,测tgδ时,也发现不正常,果然是受潮。

近年来,由于电流传感器的广泛采用,使电流的在线监测更为方便。一类是固定型,

如在接地线上套以罗哥夫斯基线圈,因为电力部门常希望采用穿芯式的,这样可以不改变原有的明显的接地引下线;另一类为钳型电流表,由于是可携式,使用更灵活。一般是在接地线上钳取电流值,如带有绝缘杆的也可用于高压侧,这时杂散电流的影响可减小,它更适宜于较小电流的测量。

图2-2为国外一种用于交流电压在7kV以下的钳型数字电流表的外形图。在其绝缘杆内引出两根绝缘绳:一根为拉线开关,另一根用以锁定读数,便于取下后读取。其测量准确度如表2-3所示。

这些穿芯式互感器无论是固定的还是钳型的,由于一次侧仅一匝,因此其角差、比差的精度都较低,而且难以在全量程内

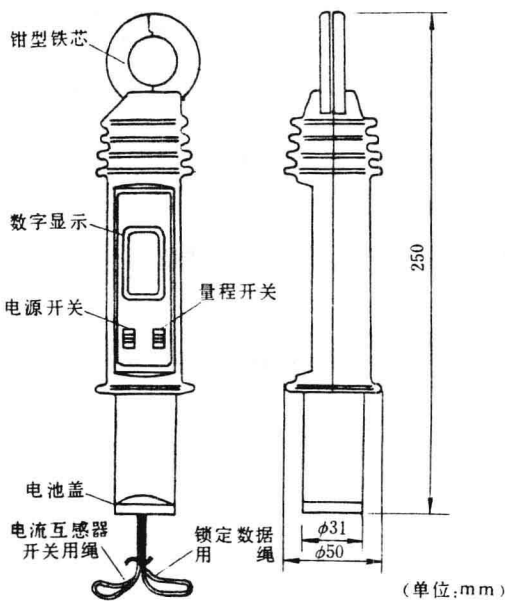


图 2-2 一种钳型电流表的外形图

恒定。特别是钳型的，不但由于每次测量时的位置差异而使所受干扰不同，而且钳型铁芯闭合时多少有气隙，难以每次保持一致。

二、用电桥法进行tgδ在线检测

前已述及，在停电试验中用电桥法测量tgδ是一种比较有价值的测量方法，如能在运行的高电压下进行检测，则有效性更高。但首先遇到的问题是：需有耐压等级比运行电压更高的标准电容器，且用反接法测量时，调节R₃、C₄的绝缘杆的耐压水平也将远远不够，即使用正接法（如图2-3所示），也要注意由于外施电压的提高，可能出现 $\dot{U}_4$ 比 $\dot{U}_3$ 高得多，且难以平衡；也可能因流经C_x的电流I_x过大而使R₃过热等情况，这时常并以另外的标准电阻来解决。

表 2-3 图 2-2 钳型表参数

量 程	分 辨 率	准 确 度
2 mA	1 μA	± 2 % ± 5 位
200 mA	0.1 mA	
20 A	10 mA	

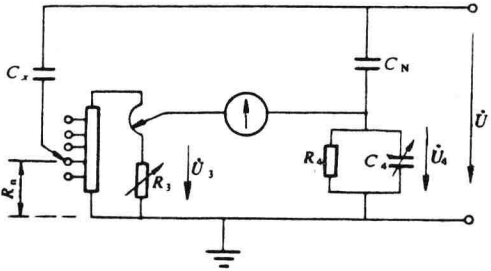


图 2-3 采用高压标准电容器C_N以正接法测量tg δ

为解决现场没有很高电压的标准电容器的困难，不少单位采用挂在同相线路上各电容型试品相互作对比的方法，测得各电容型试品的tgδ的差值，如果此差值与过去有显著变化，往往反映某一试品有问题。应用得较多的是选定某几台tgδ较小且随电压、温度较稳定的电容型试品相串联而当作“标准”电容器使用。这时宜事先在试验室里对此“标准”电容器进行全面试验，观察其电容及tgδ_N值是否随电压、温度的上升有显著变化；如在所使用的环境下其tgδ_N值无明显改变，则在用它代替标准电容器进行测量后，可将此tgδ_N补充到测得的数据中去。

这是因为在图2-3的电桥原理图中，当以有损耗tgδ_N的“标准”电容器当作C_N，而试品C_x的损耗为tgδ_x；当调节到电桥平衡后，测值为tgδ_m。如图2-4可见

$$\text{tg} \delta_m = \omega C_4 R_4 = \text{tg} (\delta_x - \delta_N)$$

或
$$\text{tg} \delta_m = \frac{\text{tg} \delta_x - \text{tg} \delta_N}{1 + \text{tg} \delta_x \text{tg} \delta_N} \tag{2-1}$$

由于tgδ_N ≪ 1，tgδ_x ≪ 1，故

$$\text{tg} \delta_m \approx \text{tg} \delta_x - \text{tg} \delta_N$$

或
$$\text{tg} \delta_x \approx \text{tg} \delta_m + \text{tg} \delta_N \tag{2-2}$$

例如有些单位采用性能较好的均压电容器当作“标准”电容器来作为此高压“标准电容器”C_N，用以对电容型套管进行在线检测，如图2-5所示。其中S点为电容套管上的测量用小套管；而R₄′为并上去的“标准电阻”，这样就有可能对装有小套管的电容套管实现在线监测。

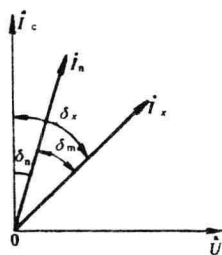


图 2-4 有 $\text{tg} \delta_N$ 时测量 $\text{tg} \delta$ 的相量图

当调节电桥至平衡后，读得 $\text{tg} \delta_m$ ，与式 (2-2) 一样时，可求出试品 C_x (电容量) 及 $\text{tg} \delta_x$ 为

$$C_x = C_N R_4^* / R_3 \quad (2-3)$$

$$\text{tg} \delta_x = \text{tg} \delta_m + \text{tg} \delta_N = \omega C_4 R_4^* + \text{tg} \delta_N \quad (2-4)$$

式中 R_4^* 为由 R_4' 与 R_4 并联后的电阻值； $\text{tg} \delta_N$ 为此“标准”电容器 C_N 的损耗角正切。

按图 2-5 对电容式套管进行在线检测的一些实例如表 2-4 所示，所采用的“标准”电容器的电容 $C_N = 420 \text{ pF}$ ， $\text{tg} \delta_N = 0.1\%$ 。

表 2-4 对电容式套管带电检测的实例

序号	套管型号	运行时带电检测		最近停电时加 10 kV 测量		备注
		C_x (pF)	$\text{tg} \delta_x$ (%)	C_x (pF)	$\text{tg} \delta_x$ (%)	
1	BRL—220	365	0.5	364	0.3	
2		370	0.6	368	0.5	
3		426	1.7	363	0.8	已有放电痕迹
4	BRL—110	326	0.5	321	0.3	
5		322	0.4	320	0.2	

可见对于绝缘良好的套管，运行高压下在线检测所得之值与停电后试验（加 10 kV）测量值相比较，其 C_x 及 $\text{tg} \delta_x$ 值一般比较相近；也有的单位在试验中初步总结认为，在线检测得的 $\text{tg} \delta_x$ 可能比停电值相差 $0.1\% \sim 0.3\%$ 。但如在线监测值与停电预试值相差很大，如表 2-4 中的序号 3，则或反映在上次停电预试后缺陷已明显发展，或反映有些缺陷只有在较高电压下才更易于检测出来。后对该套管解剖后发现，此套管的瓷套与法兰的结合处有一小裂纹，使末屏向导杆方向数起的第 1 屏到第 8 屏间绝缘受潮、且已有放电痕迹。这也说明在运行条件下进行在线监测更为有效、更为及时。

为解决在现场只有低压标准电容器而无高压标准电容器的困难，也有不少单位更乐于采用电压互感器配以低电压标准电容器 C_N 的方案，其原理图如图2-6。这时对该电压互感器的角差大小及其线性度等须予以重视，因为被测的试品 C_x 的 $\text{tg} \delta$ 常是很小的数值。

假如仍用为QS-1电桥配套的50pF标准电容器 C_N ，而电压互感器二次侧电压又常取100V，因此流经 C_N 桥臂的电流 I_N 将很小，以致 $\dot{U}_4 \ll \dot{U}_3$ ，电桥难以平衡。为此，宜增大 C_N 值，好在这时只需耐压100V以上的标准电容器。在现场实测时，一般选 C_N 为1000~3000pF。而试品真实的 $\text{tg} \delta_x$ 与电桥上读数 $\text{tg} \delta_m$ 的关系为

$$\text{tg} \delta_x = \text{tg} \delta_m + \omega C_N R_4 + \text{tg} \delta_N + \text{tg} \delta_c \tag{2-5}$$

其中 $\text{tg} \delta_N$ 为所采用的标准电容器的介质损耗角正切值，而 $\text{tg} \delta_c$ 为电压互感器角差的正切值，一般 $|\delta_c| < 10'$ ，即 $|\text{tg} \delta_c| < 0.3\%$ ，它对油纸绝缘设备现场的预防性试验一般并不会带来很大误差。从表2-5对耦合电容器用电压互感器法进行带电检测的结果中也可看出这点。同一试品，其 $\text{tg} \delta$ 值在不同电压下也可能是有些不同的。在表2-5的实例中用的低压标准电容器 C_N 为2000pF。

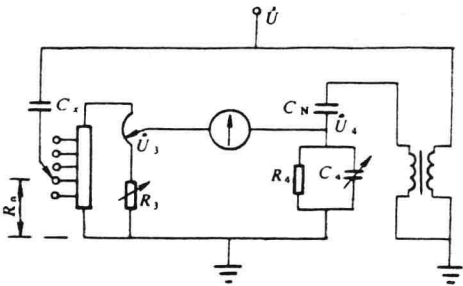


图 2-6 用电压互感器配低压标准电容器 C_N 而组成的电桥法

表 2-5 对OY-110/ $\sqrt{3}$ 耦合电容器带电检测例

序 号	铭牌电容 (pF)	停 电 试 验 值		用PT法带电检测	
		C_x (pF)	$\text{tg} \delta_x (\%)$	C_x (pF)	$\text{tg} \delta_x (\%)$
1	6280	6258	0.2	6301	0.18
2	6570	6550	0.2	6544	0.2
3	6270	6270	0.1	6221	0.16
4	6230	6230	0.1	6221	0.12

§ 2.2 三相电容型试品不平衡信号的在线检测

根据国外经验，对于三相系统中三个单相电容型试品，也可以在线监测其三相不平衡电流或三相不平衡电压。其基本原理如后所述。

一、几个绝缘特性参数分析

当电容型试品已存在有缺陷后，可近似地用图2-7 (a)的等值电路来表示：为了便于分析当缺陷性质变化时整个试品各绝缘参数的变化规律，将无缺陷部分 C_0 近似地看成损耗极小，以致可以忽略；而用电阻 R 以反映有缺陷的那部分的损耗大小。

当该试品中没有缺陷时，流过试品的电流为 i_0 ，而有缺陷后为 i ，如图2-7 (b)所示。两电流之差