

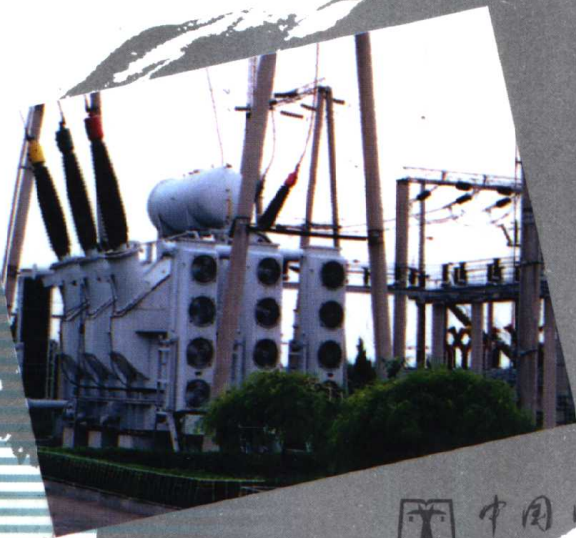
DIANLISHEBEI
YUFANGXIN SHIYAN
JISHU
CONGSHU

电力设备预防性试验技术丛书

第二分册

吴锦华 编

电力变压器与电抗器



中国电力出版社

www.cepp.com.cn

电力设备预防性试验技术丛书

第二分册

电力变压器与电抗器

吴锦华 编



中国电力出版社

www.cepp.com.cn

内 容 提 要

为进一步提高高压电气设备绝缘状况诊断的有效性和准确性,能反映每一设备的具体试验过程,结合工作实际经验和《电力设备预防性试验规程》的要求,特组织编写了这套《电力设备预防性试验技术丛书》,共8册。本套图书的特点是:①对每一设备的每一试验,均从试验目的、试验周期及判断标准、试验方法、试验注意事项及异常情况处理、结果分析判断等方面予以介绍;②精简试验原理及有关结构的讲解,细化试验步骤;③给出一些具体的试验范例,方便读者参照进行试验;④引入了实际工作中行之有效的新工艺和新方法;⑤附录中给出了规程中的相关条文,便于查阅。

本书是《电力设备预防性试验技术丛书》中的第二分册,共分4章,主要介绍了电力变压器本体试验、干式变压器试验、有载开关试验和电抗器试验,具体包括直流电阻、绝缘电阻、绕组泄漏电流、绕组介损损耗因数、交流耐压试验、空载试验、负载试验、局部放电试验、绕组变形测量。内容上注重从操作技能出发,并给出许多具体实例,据此能有效地指导试验。

本书可供发、供电部门和电气设备制造单位从事高压设备试验技术和管理人员,以及各电力试验研究院(所)技术人员使用,也可供高校有关师生参考。

图书在版编目(CIP)数据

电力变压器与电抗器/吴锦华编. - 北京:中国电力出版社, 2003

(电力设备预防性试验技术丛书; 2)

ISBN 7-5083-1457-3

I. 电… II. 吴… III. ①电力变压器 - 电工试验
②电抗器 - 电工试验 IV. ①TM410.6 ②TM470.6

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2003) 第 068703 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>)

汇鑫印务有限公司印刷

各地新华书店经售

*

2003 年 11 月第一版 2003 年 11 月北京第一次印刷

787 毫米 × 1092 毫米 32 开本 3.625 印张 75 千字

印数 0001—5000 册 定价 8.00 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)



《电力设备预防性试验技术丛书》

前 言

电力设备的绝缘预防性试验是保证设备安全运行的重要措施,是绝缘监督工作的基础。通过试验,可以掌握电力设备的绝缘状况,及时发现缺陷,进行相应的维护与检修,以免运行中的设备绝缘在工作电压或过电压作用下击穿,造成事故。为了进一步提高绝缘监督管理人员和高压试验人员技术业务素质,满足电力行业技术人员等级培训和岗位培训的需要,特组织编写了《电力设备预防性试验技术丛书》。

丛书的分册结构与《电力设备预防性试验规程》的章节对应,内容突出电力行业技术等级培训和岗位培训的特点,深入浅出,针对性、适应性较强,密切联系生产实际,反映现场新技术。本套图书的特点是:①对每一设备的每一试验,均从试验目的、试验周期及判断标准、试验方法、试验注意事项及异常情况处理、结果分析判断等方面予以介绍;②精简试验原理及有关结构的讲解,细化试验步骤;③给出一些具体的试验范例,方便读者参照进行试验;④引入了实际工作中行之有效的新工艺和新方法;⑤附录中给出了预规中的相关条文,可便于查阅。全书共分8册:第一分册为《旋转电机》;第二分册为《电力变压器与电抗器》;第三分册为《互感器与电容器》;第四分

册为《开关设备》；第五分册为《套管与绝缘子》；第六分册为《电线电缆》；第七分册为《避雷器与接地装置》；第八分册为《绝缘油》。

本书是《电力设备预防性试验技术丛书》中的第二分册，由吴锦华编写。全书共分4章，主要介绍了电力变压器本体试验、干式变压器试验、有载开关试验和电抗器试验，具体包括直流电阻、绝缘电阻、绕组泄漏电流、绕组介质损耗因数、交流耐压试验、空载试验、负载试验、局部放电试验、绕组变形测量。内容上注重从操作技能出发，并给出许多具体实例，据此能有效地指导试验。

本书由山东省电力试验研究院刘民主审。在收资、编写和审查过程中，还得到很多单位的领导、专家的大力支持与热心帮助，在此表示衷心感谢。

本书虽经数次审查修改，但由于编者经验所限，在编写中难免有疏漏之处，诚恳希望广大读者提出修改意见，并在教学、实践中进行调整和补充，使其更加完善。

编 者

2003年7月



目 录

前言

第一章

变压器本体试验 1

第一节 直流电阻 1

第二节 绝缘电阻 8

第三节 绕组泄漏电流 13

第四节 绕组的介质损耗因数 15

第五节 交流耐压试验 19

第六节 空载试验 40

第七节 负载试验 48

第八节 局部放电试验 53

第九节 变压器绕组变形测量 60

第二章

干式变压器 72

第一节 概述 72

第二节 试验项目和局部放电测量
方法 72

第三节 110kV 干式变压器试验 74

第三章

有载开关试验 75

第一节	概述	75
第二节	检查动作顺序、动作角度	75
第三节	操作试验	79
第四节	测量过渡电阻和切换时间	79
第五节	检查动、静触头接触情况	80
第六节	有载开关偏移电压测量	80

第四章

电抗器试验	87
第一节 概述	87
第二节 油浸电抗器	87
第三节 干式电抗器	87
第四节 消弧线圈	88

附录 A	DL/T 596—1996《电力设备预防性试验 规程》相关条文摘录	89
------	--	----



第一章

变压器本体试验

第一节 直 流 电 阻

一、试验目的

直流电阻测量是变压器和电抗器预防性试验的定期试验项目，是发现导电回路缺陷的重要手段。DL/T 596—1996 中规定：变压器在无载分接开关切换、有载调压开关检修以及大修后要进行直流电阻测量；变压器在经过出口短路或色谱判断有过热性故障时要进行直流电阻测量。

直流电阻测量可以检查变压器内部导电回路接触是否良好，如绕组内部和引线的焊接质量，分接开关和套管引线螺丝是否拧紧等。

二、测量方法

直流电阻测量方法很多，从理论上分为电压降法和电桥法，为了加快直流电阻测量，可采取减小铁心电感和增大回路电阻的措施。不论采取哪种测试方法，都能达到准确、快速的目的，但快速的含义要从两方面理解，不是越

快越好，而是在现场可接受的测量时间范围内（如在30min内），要充分考虑现场接线等方便程度。实用的测量方式有三种：第一种直接法，是直接在绕组两端取信号测量；第二种助磁法，是在测量低压绕组电阻时，把高压侧和低压侧电流回路串在一起，并保持电流同方向，进行测量；第三种消磁法，是在高压侧和低压侧通有一定方向反向的电流，保持铁心零磁通状态下测量。

1. 直接法

直接法测量直流电阻直观、方便、简单，其适应的范围根据变压器容量、测试仪器的不同而不同；增大回路电阻法是一种比较原始的方法，但在测量回路中串入附加电阻会使灵敏度降低，一般适用于双臂电桥。最有效的增大电阻方法是电阻突变法，其原理接线图如图 1-1 所示。在图 1-1 中，电流回路中串入附加电阻 R ，其值是被试绕组的 4~6 倍，闭合 S_2 开关将电阻短接，全部电压加在被试绕组上，当加到预定的电流时，断开 S_2 ，电流很快达到稳定状态，测量出直流电阻。直阻仪测量比电桥方便。表 1-1 列出了用直接法测量变压器绕组的范围。

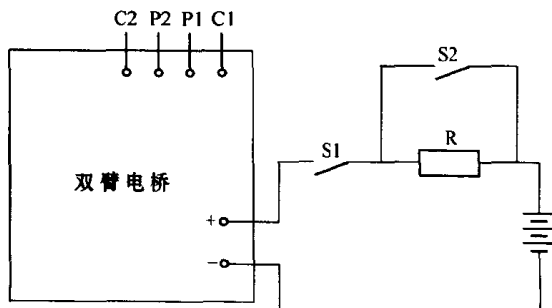


图 1-1 电阻突变法原理接线图

表 1-1 直接法测量变压器直流电阻的要求

变压器参数 范 围	10 ~ 35kV	110kV	220kV		500kV	
			120MVA 及以下	120MVA ~ 180MVA	180MVA ~ 400MVA	400MVA 及以下
建议所 使用直阻仪 电流范围	1A 及以 上	电流 3A 及以上	电 流 10A 及以 上	电 流 10 ~ 20A	电 流 20 ~ 40A	电 流 40A 及以上
电桥法	电桥直 接测量	电桥直 接测量或 增大回路 电阻法	增大回 路电阻法	一般不 用	不宜用	不用

以上是在实际测量过程中总结出来的，用以上仪器测量能够达到快速、准确的测量目的，但并不是绝对的。但在测量过程中，使用大电流测量直流电阻时，要充分考虑剩磁对变压器的影响，必要时应进行去磁试验。下面是几个测量实例，供参考。

[实例 1-1] 对一台 360MVA、220kV 双绕组 YN, d 接线变压器运行直流电阻测量，使用仪器为最大量程为 40A 的可调直阻仪，测量结果如表 1-2 所示。

表 1-2 一台 360MVA、220kV 变压器直流电阻测量结果

测量点	A - N	B - N	C - N	ab	bc	ca	ca	ca
测量值 (mΩ)	0.6486	0.6498	0.6490	0.001578	0.001596	0.001595	0.001593	无法 平衡
测量时间 (min)	1	1	1	5	5	7	15	40
测量使用的 电流值 (A)	40	40	40	40	40	40	20	3

2. 助磁法

由于超高压、大容量变压器，特别对发电厂的大容

量、低阻值变压器的充电时间常数大，如不采取措施，测一台三相变压器低压绕组需要一天或更长的时间，有时甚至测不出直流电阻的真实值。如某电厂测量一台 500kV、755MVA 的三相变压器，用 10A 直阻仪测量，直接测量低压绕组的直流电阻，几天也测不出真实值，而采用了助磁法就可解决测量问题。因此，助磁法因可有效缩短测量电阻的时间而被广泛采用。在实际测量不同容量和特殊结构的变压器直流电阻时，选用合适的测试仪器是很重要的。

助磁法就是用高压侧加电流，使铁心尽快饱和，降低铁心电感，来达到快速测量低压绕组的直流电阻目的，同时也可以测量高压绕组的直流电阻。助磁法不仅可以用于电桥法测量，而且也可以用于直阻仪（恒流源法）测量，其变压器端子的接线与完全相同。以下介绍电桥助磁法测量方法。

电桥助磁原理接线如图 1-2 所示，测量接线见表 1-3。图 1-2 中，用双臂电桥的外接电源，通过高压绕组进行助磁测量直流电阻，其基本要求有三点：一是接线正确；二是不宜长时间充电测量，以防电桥零点漂移造成的测量误差；其三是要提高电源电压，由于电流回路串入了高压绕

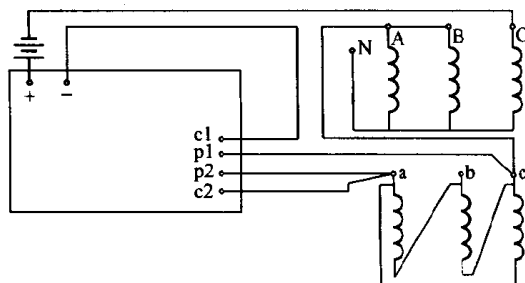


图 1-2 电桥助磁法接线原理图

组，使回路电流降低，但稳态电流不能超过电桥的工作电流，即电源电压要满足如下要求

$$2I_0(R_x + R_l) < U < I_m(R_x + R_l)$$

式中 I_0 ——变压器的空载电流；

R_x ——整个回路的电阻包括高压绕组电阻和低压绕组电阻；

R_l ——仪器内阻；

I_m ——稳态电流。

表 1-3 电桥助磁法接线表

被测变压器 接线组别	测量 端子	P1	C2	P2	电源 正极	电源 负极	连接 端子
Y, d11	ab	a	b	b	A	C1	B-C-a
	bc	b	c	c	B	C1	A-C-b
	ca	c	a	a	C	C1	A-B-c
Y, yn	aN	a	b-c	n	A	C1	B-C-a, b-c
	bN	b	a-c	n	B	C1	A-C-b, a-c
	cN	c	a-b	n	C	C1	A-B-c, a-b

3. 消磁法

消磁法与助磁法相反，力求铁心磁通为零，使用的方法有零序阻抗法和磁通抵消法。

(1) 零序阻抗法。该方法仅使用于三柱铁心 YN 连接的变压器。它是将三相绕组并联并同时通电，由于磁通需经气隙闭合，磁路的磁阻大大增加，绕组的电感随之减少，从而缩短了测量时间。

(2) 磁通抵消法。试验时同时在测量绕组和非被测绕组加电流，使两者产生的磁通大小相等、方向相反而互相抵消，保持铁心中磁通趋近于零，把绕组的电感降到最低

程度，从而达到缩短测量时间的目的。

磁通抵消法可同时测量两侧绕组的直流电阻，此方法现场应用不是很方便，一般很少用，不做详细介绍。

三、试验判据

(1) 根据规程要求，1.6MVA 以上的电力变压器各相绕组电阻相互之间的差别不应大于三相平均值的 2%；无中性点引出的，线间电阻相互之间的差别不应大于三相平均值的 1%。

(2) 根据规程要求，1.6MVA 以下的电力变压器各相绕组电阻相互之间的差别不应大于三相平均值的 4%；无中性点引出的，线间电阻相互之间的差别不应大于三相平均值的 2%。

(3) 纵向比较变化不应大于 2%。

不同温度下的电阻值应按式 (1-1) 换算成 75℃ 值 R_2

$$R_2 = R_1 \times (T + 75)/(T + t_1)$$

式中 T ——导线材质系数，铜取 235、铝取 225；

R_1 ——在油温度在 t_1 时测量的电阻值。

四、实例分析

[实例 1-2] 一台 150MVA、220kV 双绕组变压器，2003 年 1 月 21 日测量油色谱，得出数据异常。历次绝缘油色谱测试数据见表 1-4。

表 1-4 油 色 谱 数 据 ($\mu\text{L/L}$)

测试日期	H ₂	CH ₄	C ₂ H ₆	C ₂ H ₄	C ₂ H ₂	C ₁ + C ₂	CO	CO ₂
2002.10.29	17.2	3.1	0	1.3	0	4.4	101.2	400
2003.01.21	594	1248.2	332.9	1593.7	10.3	3185.1	128	329
2003.01.22	572	1254.9	340.2	1625.7	10.5	3231.2	123	244
2003.01.23	592	828.2	303.3	1429.9	8.5	2569.9	107.6	604.1

综合分析判断无载开关接触不良的可能性较大，随即准备测量直流电阻。首先拆除高压引线测量高压绕组，此时低压侧未拆开，根据运行要求低压侧挂了接地线，在测量高压绕组时，仪器 20min 也没平衡，只好拆除低压侧接地线，2min 就平衡了。直流电阻在运行挡（第Ⅳ挡）测量直流电阻，A-N 为 249.6mΩ，B-N 为 316.4mΩ，C-N 为 250.1mΩ，相间不平衡明显达到了 25.4%，远远大于 DL/T 596 中要求的 2% 的要求。当进行 B 相开关在第Ⅳ挡位置来回调整后，测得 B-N 直流电阻为 318.7mΩ，然后将分接开关调整到一个接触较好的位置，测得 B-N 直流电阻为 250.0mΩ，但此时 B 相分接开关位置与标示不对应。然后对各挡位的直流电阻进行测量，B 相其他挡也有发现类似现象，测试数据见表 1-5。

表 1-5 变压器高压侧直流电阻测量数据（油温 20℃）（mΩ）

测试状态	错位调整前			错位调整后
分接挡位	A-N	B-N	C-N	B-N
I	269.4	255.5	269.5	268.4
II	262.3	268.6	262.8	261.9
III	255.6	262.0	256.1	255.3
IV	249.0	255.5	249.3	248.6
V	242.3	248.9	242.8	241.9

检查发现 B 相分接开关触头有过热痕迹，A、C 两相分接开关未发现异常。触头过热部位如图 1-3 所示。

在测量直流电阻时，如果非被测试绕短路接地，测量时间较长，有时很难平衡，因此本例中由于低压侧短路接地，所以高压侧 20min 也未平衡，而拆除接地线后，2min

就完成了测试，故在实际测量中要注意此问题。

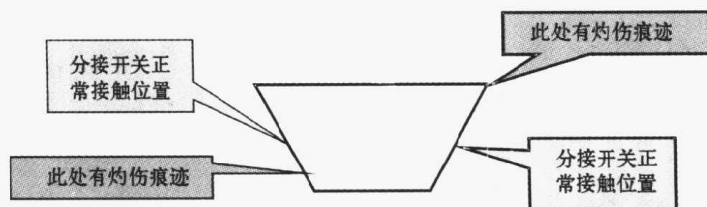


图 1-3 无载开关触头灼伤位置图

第二节 绝 缘 电 阻

一、本体绝缘电阻

1. 试验目的和基本原理

变压器的绝缘性能除了要满足在额定电压长期运行外，还必须承受由于各种原因产生的过电压对变压器绝缘的侵袭，因此必须要求变压器具有良好的绝缘性能，绝缘电阻是考核变压器主绝缘性能试验项目之一，可以发现绝缘的局部和整体缺陷，尤其是在发现绝缘纸受潮、绝缘油质不良等缺陷上有较好的灵敏度，它是决定进行耐压试验和运行的主要依据。绝缘电阻值与变压器内部结构、材料、环境条件等有关，在直流电压的作用下，绝缘中流过的电流随着时间的增加而逐渐减少至一个恒定值，总电流有三部分组成：①位移电流 i_2 ，也叫充电电流，它是当直流电压加到试品上时对两极之间的几何电容进行充电形成的电流，衰减很快，一般在几秒钟之内衰减完成；②吸收电流 i_1 ，是在直流电压的作用下，层间电压重新分布过程中所形成的电流，由于电荷分布的平衡过程较长，电

流衰减时间增长；③泄漏电流 i_3 ，也叫电导电流，是绝缘中的自由导电粒子所形成的电流，它与时间无关。其衰减变化如图 1-4，等值电路如图 1-5。

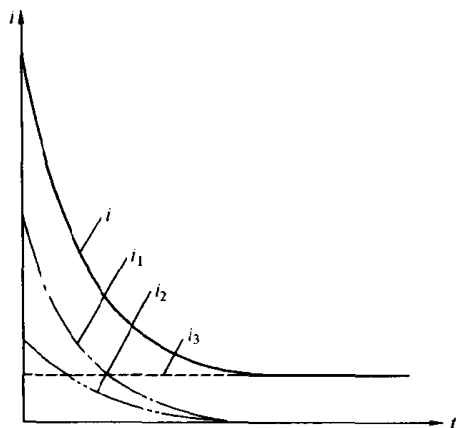


图 1-4 电流时间特性曲线

i —总电流； i_1 —吸收电流； i_2 —充电电流； i_3 —电导电流

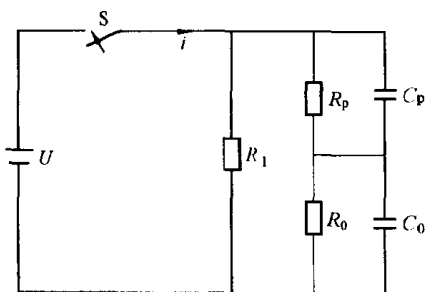


图 1-5 变压器等值电路

R_p 、 C_p —变压器纸的绝缘电阻和电容；

R_0 、 C_0 —变压器油的绝缘电阻和电容；

R_1 —绝缘纸板的绝缘电阻

2. 影响吸收比和极化指数的因素分析和判断标准

变压器绝缘电阻取决于变压器纸和油的状况，还取决于结构尺寸，并随时间增加而增大，因此单纯的绝缘阻值不是判别绝缘状况的理想指标。实测表明，用吸收比和极化指数更能反映变压器的绝缘状况。

吸收比 K 为绝缘电阻在 60s 和 15s 值之比，可写成

$$K = \frac{1 + Ge^{-15/T}}{1 + Ge^{-60/T}} \quad (1-1)$$

其中 $G = (C_0 R_0 - C_p C_p)^2 / [(C_0 + C_p) / R_0 R_p]$

式中 G ——吸收系数。

吸收系数 G 与油纸绝缘有关，当吸收系数 G 增加时，吸收比增大。当油纸绝缘都良好时或绝缘都不良时，吸收系数小，吸收比小；当油纸介质中一种介质绝缘不良时，吸收系数大，吸收比大。因此，吸收比在反映变压器绝缘状态时存在着不确定性。

极化指数 P 为绝缘电阻在 600s 和 60s 值之比，可写成

$$P = \frac{1 + Ge^{-60/T}}{1 + Ge^{-600/T}} \quad (1-2)$$

通常，吸收时间常数 T 在 100 ~ 200s 左右， $1 + Ge^{-600/T} \approx 1$ ，则

$$P \approx 1 + Ge^{-60/T} \quad (1-3)$$

由式 (1-3) 可知，极化指数 P 随 G 和 T 均有单向变化的关系；即绝缘良好时， T 大， P 也大，对大容量变压器用极化指数判断绝缘状况比吸收比准确；但对于小容量变压器，因吸收时间常数 T 较小，极化指数也较小。