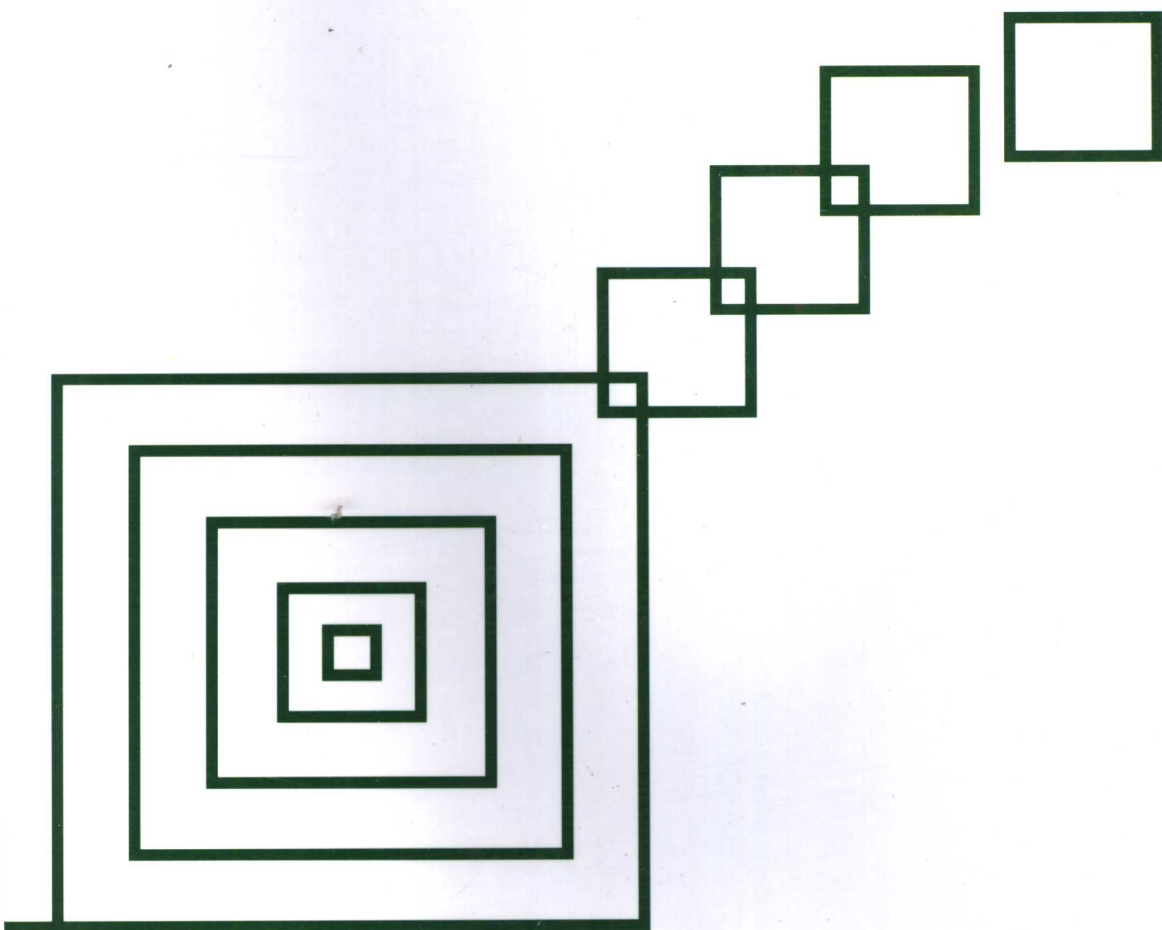


电力设备交接和 预防性试验

周武仲 编

200例



33
9



中国电力出版社
www.cepp.com.cn

电力设备交接和 预防性试验 200 例

● 周武仲 编



中国电力出版社
www.cepp.com.cn

内 容 提 要

电力设备的预防性试验是电力设备运行和维护工作中的一个重要环节,本书除对电力设备电气试验的原理、方法、设备、接线及注意事项等方面进行必要的说明外,还收集了大量有关的实际例子,能使读者进一步加深理解。

本书内容包括同步发电机、直流电机、交流电动机、电力变压器及电抗器、互感器、开关设备、套管、支柱和悬式绝缘子、电力电缆线路、电容器、避雷器、接地电阻、电除尘器等设备的试验方法及实例,还讲述了有关红外线测试以及绝缘油的电气试验的内容。

本书可供从事电力设备电气试验工程技术人员、管理人员及高等院校有关师生参阅读。

图书在版编目 (CIP) 数据

电力设备交接和预防性试验 200 例/周武仲编. - 北京:中国电力出版社, 2005

ISBN 7-5083-2925-2

I. 电... II. 周... III. 电力系统-电气设备-试验. IV. TM7-33

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2004) 第 135946 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>)

冶林印刷厂印刷

各地新华书店经售



2005 年 5 月第一版 2005 年 5 月北京第一次印刷
787 毫米×1092 毫米 16 开本 10.125 印张 226 千字
印数 0001—4000 册 定价 17.00 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)

前 言

电力设备的预防性试验是电力设备运行和维护工作中的一个重要环节，是保证电力系统安全运行的有效手段之一。而预防性试验规程则是电力系统技术监督工作的主要依据。这方面的书籍虽已有不少，但大部分都是理论和叙述，举实例的较少，实际上实例可以使读者进一步加强理解。根据读者的需要，作者收集了大量有关的实际例子，除了在书中对试验的原理、方法、设备、接线及注意事项等方面进行必要的说明外，对每种试验项目都举实例来说明，以进一步提高读者的应用能力，扩大知识面。编写本书的基础是原电力工业部颁发的 DL/T 596—1996《电力设备预防性试验规程》以下简称《预规》，随着近年来电力工业的发展，试验技术也在不断进步。1996 年以后还颁发了不少导则和规定，在参照了有关资料以后，本书还补充了一些重要的试验项目和方法。编写顺序基本上是按照《预规》的试验项目的次序进行的，除了一些非高压试验人员进行的项目外，大部分都涉及了。编写的方法是力求简明、实用。

本书题名为《电力设备交接和预防性试验 200 例》，其中以预防性试验为主，也涉及交接试验的标准和内容。本书可供从事电力设备电气试验和管理人员及高校有关专业师生参考。

由于时间、水平及篇幅有限，书中难免有不足之处。希望读者给予批评指正。

编者

2004.12 月

目 录

前言

第一章 同步发电机的试验	1
第一节 测量定子绕组的绝缘电阻	1
第二节 测量定子绕组的直流电阻	4
第三节 定子绕组泄漏电流和直流耐压	7
第四节 定子绕组交流耐压	14
第五节 超低频耐压试验	16
第六节 转子绕组的绝缘电阻	18
第七节 转子绕组的直流电阻	20
第八节 转子绕组交流耐压	21
第九节 励磁机和励磁回路设备的绝缘电阻和交流耐压	21
第十节 定子铁芯试验	22
第十一节 转子绕组的交流阻抗和功率损耗	24
第十二节 定子槽部线圈防晕层对地电位	28
第十三节 汽轮发电机定子绕组引线的自振频率	29
第十四节 定子绕组端部手包绝缘施加直流耐压测量	30
第十五节 空载特性曲线	31
第十六节 三相稳定短路特性曲线	34
第十七节 温升试验	35
第十八节 转子绕组匝间短路测试	38
第二章 直流电机的试验	42
第三章 交流电动机的试验	47
第四章 电力变压器及电抗器的试验	52
第一节 油中溶解气体色谱分析	52
第二节 绕组直流电阻	68
第三节 绕组(铁芯及附件)绝缘电阻、吸收比或极化指数	70
第四节 变压器绕组的 $\text{tg}\delta$	73

第五节	交流耐压试验	76
第六节	绕组泄漏电流	79
第七节	校核三相变压器组别和单相变压器极性, 变比试验	80
第八节	空载和短路试验	83
第九节	局部放电测量	88
第十节	测绕组变形	93
第五章	互感器的试验	98
第一节	电压互感器试验	98
第二节	电流互感器试验	101
第六章	开关设备的试验	105
第一节	SF ₆ 断路器和 GIS 的试验	106
第二节	多油和少油断路器的绝缘试验	111
第三节	空气和真空断路器试验	114
第四节	高压开关柜的试验	115
第五节	其他开关设备的试验	115
第七章	套管的试验	118
第八章	支柱和悬式绝缘子的试验	122
第九章	电力电缆线路的试验	126
第一节	纸绝缘电力电缆的试验	126
第二节	橡塑绝缘电力电缆的试验	128
第三节	电缆故障点的探测	130
第十章	电容器的试验	133
第十一章	避雷器的试验	137
第十二章	接地装置的试验	142
第十三章	电除尘器的试验	145
第十四章	红外线测温	147
第十五章	绝缘油的电气试验	152

第一章 同步发电机的试验

同步发电机是电力系统的最主要的元件之一，它直接决定能否发电。但在制造和运行过程中，其绝缘可能受伤、质量不良或老化。因此，及早发现绝缘缺陷是完全必要的。而预防性试验正是有效的预防措施之一。

在 DL/T 596—1996《电力设备预防性试验规程》，以下简称《预规》。《预规》中规定的试验项目共 23 项。本章中就下列项目进行说明，有些个别的项目就不一一说明了。

- (1) 定子绕组的绝缘电阻、吸收比或极化指数。
- (2) 定子绕组的直流电阻。
- (3) 定子绕组泄漏电流和直流耐压。
- (4) 定子绕组交流耐压（工频 50Hz 和 0.1Hz 频率）。
- (5) 转子绕组的绝缘电阻。
- (6) 转子绕组的直流电阻。
- (7) 转子绕组交流耐压。
- (8) 发电机和励磁机和励磁回路所连接设备的绝缘电阻和交流耐压。
- (9) 定子铁芯试验。
- (10) 转子绕组的交流阻抗和功率损耗。
- (11) 定子槽部线圈防晕层对地电位。
- (12) 汽轮发电机定子绕组引线的自振频率。
- (13) 定子绕组端部手包绝缘施加直流电压测量。
- (14) 空载特性曲线。
- (15) 三相稳定短路特性曲线。
- (16) 温升试验。
- (17) 转子绕组匝间短路测试。

本书将从其特点，测试方法等方面说明上述各项目，同时举以实例，使读者能进一步加深理解。

第一节 测量定子绕组的绝缘电阻

测量定子绕组的绝缘电阻是检查发电机绝缘状态最简单也最基本的方法。在现场普遍

使用兆欧表，对水内冷发电机还需采用专门的兆欧表（一般由厂家提供），如 ZC-3T 型水内冷发电机绝缘电阻测试仪等。

一、测量方法

(1) 选择兆欧表。按照 DL/T 596—1996《电力设备预防性试验规程》，以下简称《预规》规定：额定电压 1000V 以上者，用 2500V 兆欧表，量程一般不低于 10000MΩ，对水内冷发电机用专用兆欧表。

(2) 检查兆欧表。先将兆欧表的接线端子间开路，转动表到额定转速（约 120r/min），指针应为“∞”，然后将线路和地端子短路，转动表，指针应为“0”；如指示不对，应更换或修理。

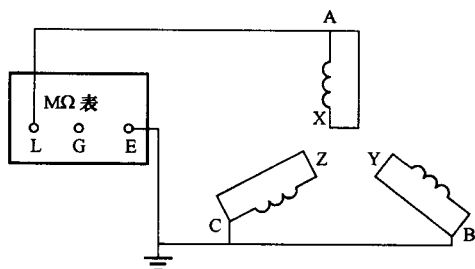


图 1-1 发电机绕组绝缘电阻试验接线示意图

(3) 对被试发电机断电和放电。对被试发电机应确认已断电，然后进行充分放电，由于发电机电容量较大，至少应放电 5 分钟，放电时应用绝缘工具，不得用手碰触放电导线。

(4) 接线。将对地端子“E”接到发电机的接地端，如机壳铁芯等（如图 1-1 所示），将线路端子“L”接到发电机出线端，发电机定子各相绕组应首尾短接，非被试相应短路接地。对水内冷发电机，将汇水管和屏蔽端子“G”相

连接（如图 1-1 及图 1-2 所示）。

(5) 测绝缘电阻、吸收比及极化指数。驱动兆欧表到额定转速，或接通兆欧表电源，待指针稳定后（或 60s 后），读取绝缘电阻值。

测吸收比和极化指数时，在兆欧表停转状态，将表的“E”端接到发电机接地端，“L”端接到出线端，分别读 15s 及 60s（或 1min 及 10min）时的绝缘电阻。

(6) 读完绝缘电阻后，先断开接到发电机出线端的连接线，然后再停止摇转，以免在测量时充入发电机电容的电荷经兆欧表放电而损坏兆欧表。

(7) 对发电机充分放电，应大于 5min，分相测量时每一绕组都应为 5min 以上。

(8) 记录。测量时应记录发电机型号，编号，铭牌规范，运行位置，发电机和现场湿度，现场湿度，气象情况，试验日期及使用仪表型号等。

(9) 在测量时的温度不同情况下对绝缘电阻应进行温度换算。换算公式如下

$$R_c = K_T R_T \quad (1-1)$$

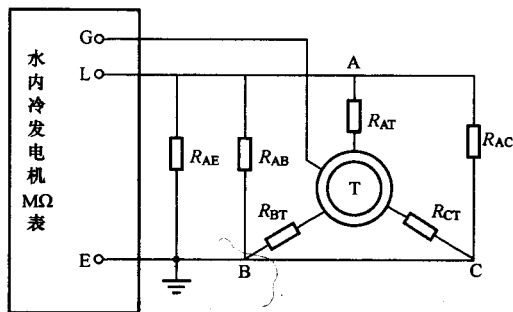


图 1-2 水内冷发电机定子绕组绝缘电阻试验接线示意图

R_{AB} 、 R_{AC} —A 相对 B、C 相绝缘电阻； R_{AE} —A 相对地绝缘电阻； R_{AT} 、 R_{BT} 、 R_{CT} —A、B、C 相绝缘引水管的电阻；T—汇水管

$$K_T = 0.5^{(40 - T)/10}$$

式中 R_c ——修正到 40℃ 的绝缘电阻, MΩ;

K_T ——温度修正系数;

R_T ——测量的绝缘电阻。

(10) 在进行对比时, 应使用同一温度和同一电压、型号的兆欧表。

二、实例说明

实例 1-1 水内冷发电机定子绕组绝缘电阻三相不平衡

某电厂一台汽轮发电机, 型号为 QFSN-200-2, 额定功率为 200MW, 定子绕组水内冷。在预试中发现三相绝缘电阻不平衡: A 相为 750MΩ; B 相为 50MΩ; C 相为 750MΩ。按照《预规》规定, 各相或各分支绝缘电阻的差值不应大于最小值的 100%。现为 (750-50)/50 = 14 倍, 明显的不合格, 然后做直流耐压试验, 在直流电压加到 10kV 时, 发电机汽侧上部定子下层线棒有火花, 立即停止试验。经解体检查发现相邻 5 根线棒有一道长约 150mm、深 7mm、宽 5mm 的硬伤。决定更换新线棒。经处理后测绝缘电阻为: A 相 750MΩ, B 相 1000MΩ, C 相 1000MΩ, 互差 1000-750/750 = 0.33, 合格。

实例 1-2 水内冷发电机定子绕组绝缘电阻不合格

某电厂的 300MW 发电机由于其定子由海上运输, 加上当地天气潮湿, 相对湿度大, 用 2500V 专用绝缘电阻测试仪测得 A、B、C 三相绕组对地绝缘在 200~350MΩ 之间, 怀疑定子绕组受潮, 决定通 60~80℃ 内冷水循环。在各加热状态下测得的各汇流管对地绝缘电阻见表 1-1。为了测冷态下的定子绕组绝缘电阻, 向发电机内冲入除湿后的常温压缩空气, 打开汇流管的排污门, 排除部分热水, 在水箱内不断补充室温的合格水, 测得各相定子绕组绝缘电阻, 见表 1-2。

表 1-1 加热状态下各汇流管对地绝缘电阻

水温 (℃)	小汇流管绝缘电阻 (kΩ)	汽侧汇流管总绝缘电阻 (kΩ)	励侧汇流管绝缘电阻 (kΩ)	水温 (℃)	小汇流管绝缘电阻 (kΩ)	汽侧汇流管总绝缘电阻 (kΩ)	励侧汇流管绝缘电阻 (kΩ)
38	190	20	40	71	30	8	5
66	45	12	7	74	28	7	4.5
68	39	10	7				

表 1-2 冷却状态下各相定子绕组绝缘电阻

水温 (℃)	小汇流管绝缘电阻 (kΩ)	汽、励端汇流管总绝缘电阻 (kΩ)	汽、励侧及小汇流管总绝缘电阻 (kΩ)	A 相绝缘电阻 (MΩ)	B 相绝缘电阻 (MΩ)	C 相绝缘电阻 (MΩ)
37	690	72	65	750/1000	700/1000	600/1000
34	720	77	70	700/1200	800/1200	900/1250

注 各相绝缘电阻值为 15°/60° 时值。

必须注意, 在通循环热水处理定子绝缘时, 一定要将发电机定子密封, 用大功率 (如 1440W) 抽湿机抽湿, 否则, 虽然绝缘电阻达到要求, 但绕组的直流泄漏电流会很大, 而

且不平衡。

在《预规》中水内冷定子绕组的绝缘电阻为自行规定。该台发电机按制造厂家规定为：定子内冷水路通合格水（20℃时导电率为 $0.5\mu\text{S}/\text{cm}$ ；pH值为7~8；硬度 $>2\mu\text{g}/\text{kg}$ ）时，各汇流管总的对地绝缘电阻应在20~30kΩ以上，温度在10~30℃吸收比（ R_{60}/R_{15} ）值应大于1.3，定子绕组各相绝缘电阻值（相间及对地）均不低于1000MΩ（1min值）。具备上述条件后才可进行耐电压试验。由表1-2可见，在水温为34和37℃下，绝缘电阻符合规定。

实例1-3 绝缘电阻过低一定子线棒接地故障

某厂一台125MW双水内冷发电机，型号为QFS-125-2，13.8kV，125MW。在小修做直流耐压试验时，在定子绕组通水情况下发电机绝缘电阻过低（A相20MΩ，B相1.5MΩ，C相1.2MΩ）当直流耐压加到5kV时A相泄漏电流已大于1500μA，C相大于300μA。将A、C相停止加压。B相5kV时泄漏电流为30μA，10kV 2min后为20μA，15kV时电源跳闸。

决定将定子绕组吹干水后再做直流耐压试验。吹气约40h后，用2500V兆欧表测绝缘电阻得，A相2000MΩ，B相0MΩ，C相2000MΩ，用M-14万用表测B相绝缘电阻为110kΩ。检查定子端部未见异常。决定采用对B相直流升压寻找故障点，升至4kV时，在汽侧槽口处有焦味和烟雾，停止升压。抽转子检查，发现汽侧第17槽上层线棒距槽口约10cm处有一道较细白色线条痕迹。为此，又对B相加压，当电压升至600V时，发现白色线条痕迹烧红并由线棒延伸至定子铁芯接地。原因是环氧浸透不够，并有气孔，运行中长期受油污侵蚀，导致该处绝缘薄弱。处理后再进行吹水试验，测得绝缘电阻：A相600MΩ，B相600MΩ，C相1000MΩ，做直流耐压试验合格。

第二节 测量定子绕组的直流电阻

测量定子绕组的直流电阻是检查发电机定子绕组导电回路的完好性的重要方法，导电回路的质量问题（如焊接缺陷，断股等）将引起局部过热而损坏绝缘。一般用压降法或双臂电桥（如QJ44型电桥）测量。

一、测量方法

- (1) 在测试前对发电机定子绕组先对地放电。
- (2) 应分别测量每相（或分支）绕组的直流电阻，以便比较。
- (3) 在冷态下测量，绕组表面温度与周围空气温度之差不应大于 $\pm 3^\circ\text{C}$ 。测温度时，应使用多支酒精温度计，分别放置于齿间槽楔上、通风孔里及绕组端部等处，取平均值。
- (4) 采用压降法时，通入绕组的电流不应大于额定电流的20%。
- (5) 应测量每相（或分支）引线的长度及截面，根据引线材料电阻率计算出引线电阻，在计算各相（或各分支）的直流电阻时，应扣除引线电阻，在校正了由于引线长度不同而引起的误差后再比较相互间差别及初次测量值。
- (6) 在用双臂电桥测量时，必须将电桥的电流接线端（C1、C2）与电位接线端（P1、P2）分别连接到发电机定子绕组的首尾端。

(7) 试验引线应尽可能的短而粗；并且与定子绕组出线端有良好的接触。

(8) 在比较时应换算到同一温度。按式 (1-2) 计算

$$R_2 = R_1 (T + t_2) / (T + t_1) \quad (1-2)$$

式中 R_2 —— t_2 温度时的直流电阻；

R_1 —— t_1 温度时的直流电阻；

T ——铜的材料系数 ($T = 235$)。

二、实例说明

实例 1-4 扣除引线电阻的计算

有一台发电机，容量为 7500kVA，双星形接线，共 6 个分支绕组，在表 1-3 中列出了环境温度为 15℃ 时的实测电阻值，引线的长度和引线电阻及扣除引线电阻后的各分支绕组电阻。

电阻按式 (1-3) 计算

$$R = \rho_t L/S \quad (1-3)$$

$$\rho_t = \rho_0 (235 + t) / 235$$

式中 L ——引线长度，m；

S ——引线截面， mm^2 ；

ρ —— t 温度下的电阻率；

ρ_0 ——铜在 0℃ 时的电阻率 ($\rho_0 = 0.01647\Omega \cdot \text{mm}^2/\text{m}$)。

表 1-3 实测电阻值

相别	实测电阻 (Ω)	引线长度 (m)	引线电阻 (Ω)	扣除引线电阻后的分支绕组电阻 (Ω)
A1	0.004425	0.89	0.0000259	0.004399
A2	0.00455	5.30	0.000154	0.004396
B1	0.004575	5.85	0.000170	0.004405
B2	0.00452	2.90	0.0000845	0.004435
C1	0.00452	2.54	0.000074	0.004446
C2	0.004575	4.57	0.000133	0.004442

从表 1-3 可知，相互间差别为 $(0.004446 - 0.004396) / 0.004396 \times 100\% = 1.13\%$ 小于《预规》要求的 1.5% 值 (汽轮发电机)。

实例 1-5 用逐段分割法寻找缺陷

某台发电机型号为 QF-12-2，容量 12000kW，在出厂时三相直流电阻相差均在 1.5% 以内，1992 年因 B 相直流电阻大而处理了不良接头。在一次出口短路后，测三相直流电阻 $R_A = 5984\mu\Omega$ ， $R_B = 6131\mu\Omega$ ， $R_C = 5964\mu\Omega$ ， $\Delta R = 2.8\%$ ，为不合格，B 相电阻最大。为此，用逐段分割法进行查找。

该发电机每相绕组有 2 个极相组，每个极相组有 8 个线圈，共 16 根线棒。用 QF-44 电桥先测 B 相直流电阻。用橡皮锤依次敲击 B 相绕组的鼻部接头和引出线及极相组连线接头，观察电桥指针的变化，未发现问题。将 B 相的两个极相组的连线的中间剥开绝缘 (见图 1-3 中 p 点) 测量极相组的直流电阻为： $R_{B1} = 3034\mu\Omega$ ， $R_{B2} = 3160\mu\Omega$ ，互差 $\Delta R =$

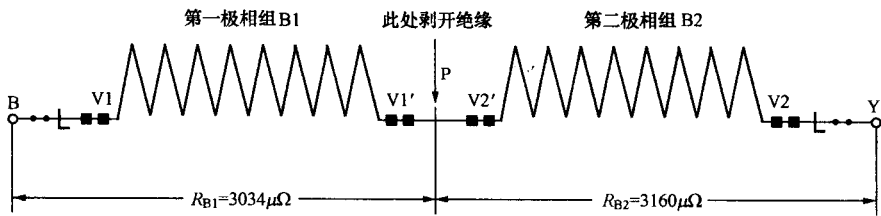


图 1-3 B 相绕组连接图

· —螺栓连接板；■—铆接或焊接；L—直角板焊接

4.1%，将 V'2 和 V2 的接头处绝缘剥开，发现 V2 处接头银焊料不满、V'2 处接头并头套与铜连接板间银焊缝全长有裂纹，绝缘内层已黑。对缺陷进行处理后，B 相电阻仍大于 A、C 相，对 B 相绕组所有引出线接头和极相组连接接头测接触电阻，均在 $10 \sim 16 \mu\Omega$ 之间，相差不大。用电桥直接测两极相组两端，得 $R_{B1} = 2849 \mu\Omega$ ， $R_{B2} = 2962 \mu\Omega$ ， $\Delta R = 3.96\%$ 。将第二极相组 8 个线圈分为两部分（如图 1-4 所示），测得 $R'_{B2} = 1425 \mu\Omega$ ， $R''_{B2} = 2340 \mu\Omega$ 。

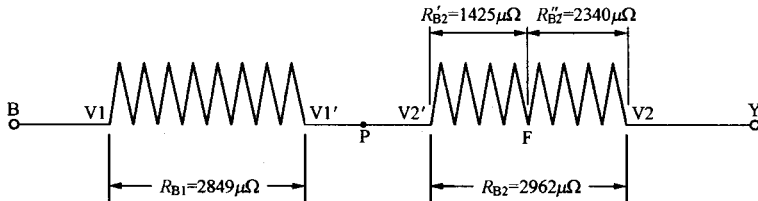


图 1-4 B 相绕组测量电阻

由测量值可见，问题出在 F - V2 段，为了减少测量误差，对线棒端头的股线（共 22 股）用软铜线捆绑，并用铜板加螺栓夹紧。

接着做接头发热试验，（通入 800A 直流约 2h15min）测鼻部绝缘表面温度，互差约 4°C ，不足以显示接头缺陷。

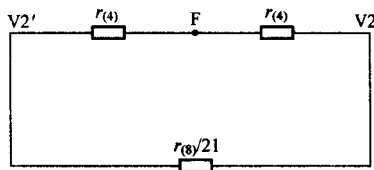


图 1-5 股线等值电路

最后决定用针状细杆逐股测量，由 $R_{B1} = 2849 \mu\Omega$ 可得，每股线电阻为 $r_{(8)} = 2849 \times 22 \mu\Omega = 62678 \mu\Omega$ 。4 个线圈串联时， $r_{(4)} = 31339 \mu\Omega$ （每根股线），为简化步骤，从等值电路（如图 1-5 所示）上可计算得

$$r_{(F-V2)} = r_{(4)} // \left(r_{(4)} + \frac{r_{(8)}}{21} \right) = 16381.7 \mu\Omega, \text{ 若被测股}$$

线已断开，则 $[r_{(F-V2)}]' = r_{(4)} + r_{(8)}/21 = 34323.6 \mu\Omega$ ；

若其他股线断开一根，则 $[r_{(F-V2)}]_1 = r_{(4)} // [r_{(4)} + r_{(8)}/20] = 16415.6 \mu\Omega$ ，断个股线的阻值比完好的要大。根据上述方法，最后查出断股的接头位于 B 相第二极相组的第 6 个线圈汽侧鼻部。该接头有 1 股导线已开焊，（约 1mm 宽的缝），经补焊后测得：

$$R_A = 5927 \mu\Omega, R_B = 5989 \mu\Omega, R_C = 5902 \mu\Omega, \Delta R = 1.47\%$$

按《预规》要求应 $< 1.5\%$ ，合格。

由上述可见，在发电机出口短路后应按《预规》检查直流电阻（定子绕组）。寻找缺陷时，可采用逐段分割法进行，但应注意测量的正确性。

第三节 定子绕组泄漏电流和直流耐压

泄漏电流试验的原理和绝缘电阻试验是一致的，但其所用的直流试验电压是由高压整流设备所供给的，电压比兆欧表高，且可以调节，这样绝缘本身的弱点就容易显示出来。同时，试验是用微安表来指示泄漏电流值，读数比兆欧表准确，在加压过程中可以随时监视微安表读数。因此，泄漏电流试验对于发掘绝缘缺陷比绝缘电阻试验更灵敏和有效。特别是对一些尚未贯通的集中性缺陷，通过直流耐压能够发现交流耐压时所不能发现的缺陷，尤其是发电机定子绕组端部的缺陷。泄漏电流试验属于非破坏性试验，而直流耐压试验属于破坏性试验。

在现场一般使用直流耐压试验器。它使用高压硅堆作为整流元件，电源使用工频电源，对串级整流装置也采用中频电源。由变压器、电容器、硅堆，保护电阻等元件组成半波、倍压、串级整流回路，其参数将根据被试设备的电压来选择。

一、测量方法

(1) 按图 1-6 所示进行接线，这两种接线主要差别是微安表的接线位置。一种是在高压侧，测量比较准确，但读数不方便，操作人员在试验中调整微安表量程时应采用安全措施，比较麻烦；另一种是在低压侧，读数方便。

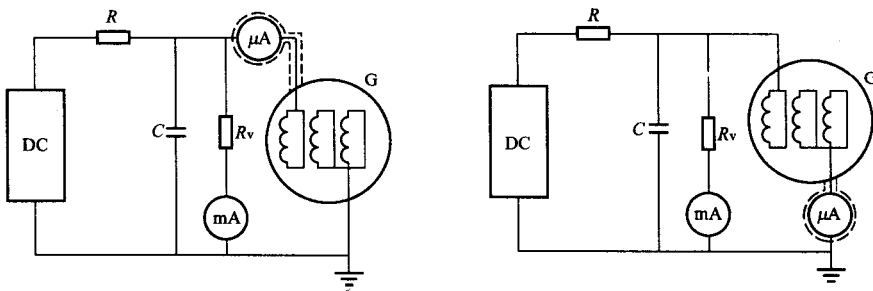


图 1-6 微安表的接线方式

DC—高压整流装置；R—保护电阻；C—滤波电容器； R_v —高值电阻器；

mA—串联毫安表； μA —微安表

- (2) 确定试验电压值。根据《预规》要求选择。
- (3) 试验前，应检查被试发电机是否停电，接地放电，检查一切对外连线是否断开。
- (4) 应在停机后清除污秽前热状态下进行。对备用的机组可在冷态下进行，氢冷的严禁在置换过程中进行，排氢后含氢量应小于 3%。
- (5) 在接线后，应由第二人复查无误。
- (6) 升压时应缓慢，按《预规》要求，每级 $0.5 U_N$ 分阶段升高，每阶段停留 1min。
- (7) 在升压过程中，应监视发电机、试验器及微安表，一旦有异常现象应立即降压，

断开电源，并查明原因。

(8) 降压、断电及放电。试验完成后，应迅速降压到零切断电源，进行充分放电（需 5min 以上），放电时，应通过适当的放电电阻（专用的放电棒）进行。

(9) 整理记录并绘制电流电压关系曲线。

(10) 对水内冷发电机采用低压屏蔽接线，如图 1-7 所示。

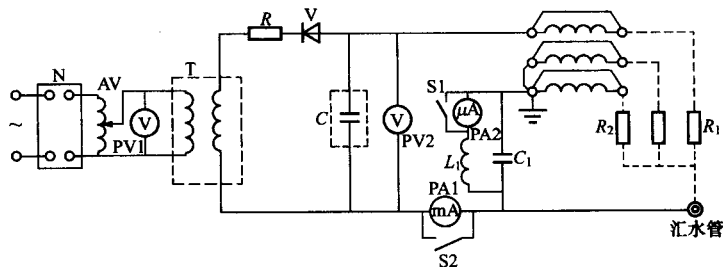


图 1-7 低压屏蔽法接线图

N—稳压器；AV—调压器；PV1—交流电压表；T—高压试验变压器；R—限流保护电阻；V—硅整流二极管；PV2—高压静电电压表；PA1—毫安表；PA2—微安表；S1、S2—单向开关；C₁—低压滤波电容器；R₁—被试分支与绝缘引水管并联电阻（通水）；R₂—汇水管对地绝缘电阻（通水）；L₁—扼流圈

(11) 采用低压屏蔽法试验水内冷发电机定子绕组时，应注意以下几点。

- 1) 水质要求。在通水状态下试验时，水质应维持电导率 $\leq 2 \sim 5 \mu\text{S}/\text{cm}$ ， $\text{pH} = 7 \sim 8$ 。
- 2) 为了防止微安表因受引水管水电阻小的影响而摆动可采用并联电容器（ $1 \sim 2 \mu\text{F}$ ）（电容器外壳要对地绝缘）或降低水电导率到 $5 \mu\text{S}/\text{cm}$ 以下（如 $2 \mu\text{S}/\text{cm}$ ）。
- 3) 测得的泄漏电流应按式（1-4）校正（考虑引水管对地绝缘电阻并联影响）

$$I_x = I_A (1 + R_A/R_{dx}) - I_0 \quad (1-4)$$

式中 I_A ——微安表实测电流， μA ；

R_A ——微安表内阻， Ω ；

R_{dx} ——微安表并联水电阻， Ω ；

I_0 ——空载泄漏电流（即试验器电流）， μA 。

4) 通水加压前，调整电位器，即调节微安表内阻，使微安表指示零，以补偿引水管的极化电势使微安表偏转。

二、实例说明

实例 1-6 空冷发电机寻找绝缘缺陷（端部）

某厂一台汽轮发电机，TQ-25-2 型，10.5kV，星形接线，54 槽，在预试中发现定子线圈三相泄漏电流明显不平衡，三相绕组在 $2.5 U_N$ 下泄漏电流为： $I_A = 52 \mu\text{A}$ ， $I_B = 270 \mu\text{A}$ ， $I_C = 394 \mu\text{A}$ ； I_C 和 I_B 已远大于 I_A ，不合格。

采用一相加压，另两相经微安表接地测得结果如下：

- (1) A 相有 $18 \mu\text{A}$ 流经 B 相绕组，有 $1.3 \mu\text{A}$ 流经 C 相绕组入地。
- (2) B 相有 $13 \mu\text{A}$ 流经 A 相绕组，有 $200 \mu\text{A}$ 流经 C 相绕组入地。

(3) C相有 $0.8\mu\text{A}$ 流经 A 相绕组, 有 $190\mu\text{A}$ 流经 B 相绕组入地。

可见, 除 BC 两相绕组间存在泄漏电流通路外, C 相还存在直接入地的通路。

进一步把三相分成六个分支, 加 $2.5U_N$ 直流耐压。测得数据见表 1-4。

表 1-4 各分支的泄漏电流 (μA)

泄漏路径	A1	A2	B1	B2	C1	C2
总泄漏电流	68	17	140	68	190	240
流经 A1 分支			8			1.5
流经 A2 分支				0.2	1.5	
流经 B1 分支	11				156	
流经 B2 分支						34
流经 C1 分支		2.3	126			
流经 C2 分支	32			22		

由表 1-4a 可见, B1 分支有 90% 泄漏电流流经 C1 分支入地; C2 分支有 85% 以上泄漏电流直接入地; A1 分支与 B2 分支有较大泄漏电流经 C2 分支入地; A2 分支基本正常。

从绕组展开图 (如图 1-8 所示) 可见, B1 分支和 C1 分支所有线棒都不在同一槽内, 故此两分支发生关系的部位是在端部交叉部分, 包括鼻部、端部层间垫圈, 绑环支架等。

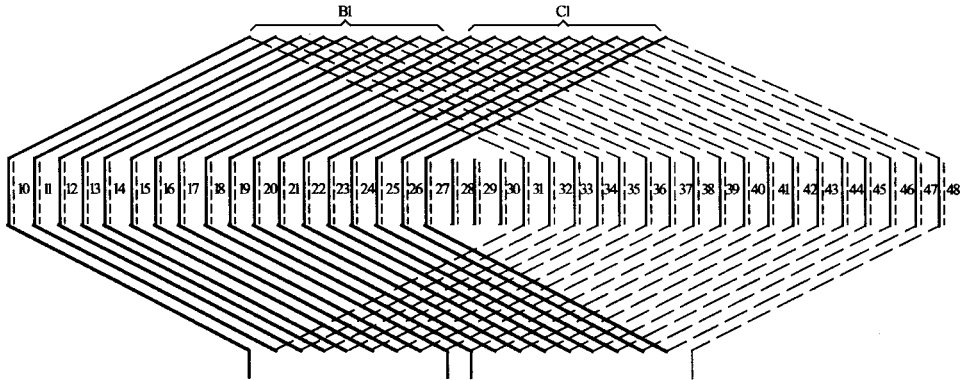


图 1-8 B1、C1 分支展开图

于是, 扒开 B1、C1 分支所有并接头绝缘, 发现 C1 分支 19、20 号槽上层线棒励侧接头及 B1 分支 18 号槽上层线棒汽侧接头处绝缘已烧焦, 有大块的锡疙瘩; B1 分支 37、38 号槽下层线棒励侧线头, 18 号槽上层线棒及 38、39 号槽下层线棒汽侧线头的铜股线被打弯折叠, 绝缘未包住。

接着将 C2 分支分解为 C2a 和 C2b, 分别测泄漏电流, 测得数据见表 1-5。

表 1-5 分解后测泄漏电流值

试验电压/kV	15	18	21	23	26.25
C2a 分支/ μA	—	18	33	49	92
C2b 分支/ μA	1.5	10.5	26	45	138

由表可见，这两部分都有对地捷径，检查发现 48、49 号槽上层线棒汽侧线头与端部层间绝缘垫之间有焊锡搭接，50 号槽上层线棒的绑环支架扬角处已露铁。

检查 A1、B2 分支时，发现 A1 分支励磁侧 30 号槽下层线头对应的绑环支架垫块被包入并头套绝缘中。

总的检查发现 B 相缺陷 16 处，C 相缺陷 17 处，C 相最严重。经处理后再测泄漏电流值见表 1-6，已完全正常。

表 1-6 处理后测泄漏电流值 (μA)

试验电压 (kV)	5	10	15	20	26.2
A - BCE	6	12	19	29	39
B - ACE	6	13	19	28	39
C - ABE	6	12.5	19	27.5	39

实例 1-7 空冷发电机三相泄漏电流不平衡

某发电厂空冷发电机，TS845/159-40 型，72MW，13.8kV。在大修前，在 $2.5U_N$ 下测 A、B、C 三相泄漏电流分别为 65，6600，4000 μA ，计算互差，得

$$\Delta I_1 = [(6600 - 65) / 65] \times 100\% = 10053.8\% \gg 100\%$$

$$\Delta I_2 = [(4000 - 65) / 65] \times 100\% = 6053.8\% \gg 100\%$$

分析原因如下。

- (1) 该发电机曾在线棒端部表面不恰当地喷涂半导体漆层，降低了它的绝缘性能。
- (2) B、C 相绕组线棒端部锥体接缝处裂纹受潮，引起泄漏电流明显增加。

在大修中，对上述部位进行了处理后，三相泄漏电流基本平衡。

实例 1-8 泄漏电流随时间而增大

某发电厂汽轮发电机，QFN-100-2 型，10.5kV，100MW。

在小修时按《预规》要求做 $2.0U_N$ 直流耐压，测得三相泄漏电流不平衡。C2 分支在 40s 后，泄漏电流由 20 μA 增至 80 μA 。在大修中进行分解试验，发现 C2 分支 3 号槽下层线棒泄漏电流为 96 μA ，检查发现该线棒在励侧距槽口 220mm 处有豆粒大的一块修补充填物，附近绝缘已变色。5 号槽下层线棒泄漏电流为 26 μA ，检查发现线棒在励侧距槽口 320mm 处绝缘内嵌有一段长 5mm， $\phi 1\text{mm}$ 的磁性钢丝；4 号槽上层线棒抬出后整体断裂，属于制造缺陷。在更换线棒后，三相泄漏电流平衡。

实例 1-9 泄漏电流随电压不成比例显著增加

某台发电机，A 相在 $2.0U_N$ 和 $2.5U_N$ 的电流阶段的泄漏电分别为 50 μA 和 75 μA ，计算得试验电压和泄漏电流的增长率为

$$\Delta U = [(2.5 - 2) / 2] \times 100\% = 25\%$$

$$\Delta I = [(75 - 50) / 50] \times 100\% = 50\%$$

可见，泄漏电流的增长率较试验电压的增长率大 1 倍，经检查发现其绝缘受潮。经处理后问题解决。

实例 1-10 通水情况下做水内冷电机泄漏电流和直流耐压测试

某厂水氢冷发电机，型号 QFSN-300-20-2 型，电压 20kV 由于结构问题，其底部积水很难吹干，因此采用在通水情况下做试验。

(1) 试验前准备。

- 1) 拆除发电机和封闭母线的连线。
- 2) 撤出发电机中性点的连线。
- 3) 发电机定子绕组通冷却常温水，其导电率 $\leq 1.5\mu\Omega/\text{cm}$ 。
- 4) 将发电机转子接地。
- 5) 进行发电机膛内排氢，膛内含氢量应在 3% 以下。
- 6) 将发电机测温元件全部短接并接地。
- 7) 将发电机的电流互感器二次侧全部短接并接地。
- 8) 将汇水管的接地连片断开。

(2) 试验方案。

- 1) 按《预规》要求，直流耐压值为 $2U_N$ ，即 40kV。
- 2) 测试定子绕组绝缘合格。
- 3) 按照试验接线图接线，并仔细检查无误。
- 4) 试验电压按每级 $0.5U_N$ 分阶段升高，每阶段停留 1min。有异常现象时应立即停止试验。

5) 在耐压过程中，泄漏电流超过 3mA 时，应立即停止试验，查明原因后再作决定。

(3) 测试数据见表 1-7 及表 1-8。

表 1-7 绝缘电阻测试

相 别	耐压前 (MΩ)	耐压后 (MΩ)
A 相	1000	∞
B 相	1000	∞
C 相	1000	∞

注 使用仪器为 ZC-37 型水冷电机专用兆欧表。

表 1-8

直流耐压及泄漏电流

相 别	电 流 (μA)	试验电压 (kV)			
		10	20	30	40
A	总电流	7310	14590	21840	29120
	绕组泄漏电流	3.2	5.7	9.5	18.4
B	总电流	7110	14150	21160	28160
	绕组泄漏电流	2.1	3.9	7.3	14.1
C	总电流	7150	14270	21290	28310
	绕组泄漏电流	2.2	4.7	9.4	19.8

注 使用仪器为高压直流发生器 ZGS-60kV/200mA。

根据《预规》要求，在规定的试验电压下，各相泄漏电流的差别不应大于最小值的 100%，最大泄漏电流 $< 20\mu\text{A}$ 者，相间差值与历次试验结果比较，不应有显著变化。由上述数据可见该电机合格。

实例 1-11 检查出绝缘缺陷

某厂水内冷发电机，QFQS-200-2 型，15.75kV，其定子绕组直流耐压和泄漏电流测量数据见表 1-9。