

水利电力部技术改进局編譯

---

# 发电机热試驗程序

水利电力出版社

## 前 言

发电机热試驗方法的公开出版，是为了适应当前发电机提高出力的需要，协助現場更好地进行发电机出力的鉴定，使发电机提高出力的工作建立在科学的可靠的基础上。

这本小册子是依照苏联电站部技术改进局編訂的“发电机热試驗标准程序”，結合我国当前情况，加以整理改編而成的。其中有关最高允許温度的規定以及对于温度裕度的充分利用，都是遵照水利电利部在北京召开的发电設備提高出力會議的精神編訂的，所以在內容上可能和原来热試驗标准程序有不一致的地方。

# 目 录

一、基本条例 .....	3
二、准备工作 .....	5
1. 仪器设备的准备 .....	5
2. 了解技术资料及运行资料 .....	6
3. 发电机静止时进行的工作 .....	6
4. 发电机转动时进行的工作 .....	9
5. 记录表格的准备 .....	10
6. 试验的分工 .....	12
三、负荷情况下热试验的进行 .....	13
1. 试验的次数 .....	12
2. 热试验的要求 .....	13
3. 测量方法 .....	14
四、试验资料的整理 .....	15
五、编写技术报告 .....	18

## 一、基本条例

1. 新安裝的发电机与大修中改換过綫卷及轉子綁綫或套箍的发电机，在正式投入运行前，以及在运行中，为了适应当前国民經济发展需要而提高出力时，均須进行运行中的发热試驗，借以了解发电机在帶負荷工作时各工作部分的发热情况，并校驗所測得的数字是否符合于原制造厂的設計技术条件或借以重新确定发电机的負荷定額，檢驗空气冷却器的保証值，找出改进冷却系統的方法，或解决其他特殊問題（如改变周波运行等）。

运行中的发电机，应根据具体情况定期地进行核对性的发热試驗，借以与該发电机的原有資料相比較，以檢查发电机各部分的运行情况。核对性热試驗于大修后进行。

2. 运行中的发热試驗，轉子綫卷的温度依其直流电阻随温度之变化而确定，而靜子綫卷及靜子鉄的温度則借制造厂埋于靜子槽內的檢温裝置的指示来决定。

埋于靜子槽內的檢温裝置为热电偶或电阻温度计，其埋于槽底者所測的温度为靜子鉄温度，埋于綫卷之間者所測的温度为綫卷温度；

如果，在靜子槽中未埋有檢温裝置时，則可依轉子之温度及冷却空气进出温度之差为准进行試驗。靜子埋入式温度计应設法于大修时埋入。如檢温裝置埋入槽底或綫卷之間有困难时，則可以埋入槽楔和綫卷之間。

3. 运行中，发电机各部分之允許温升，应以原制造厂提出

之规范为根据，如果缺乏厂家资料，则可以参考下表所列数字。表内所列为允许最高温度，这是国际上所应用的一般正常条件下的绝缘运行允许最高温度。

項号	电机部分	“A”級絕緣		“B”級絕緣	
		3	4	5	6
1	2	电阻法	檢温計法	电阻法	檢温計法
1	靜子綫卷	—	105°C	—	130°C
2	靜子鉄	—	95°C	—	120°C
3	轉子綫卷	105°C	—	130°C	—

帶有 A 級絕緣材料的 B 級絕緣的容許溫度限度同于 A 級絕緣。但必須注意并不作为絕緣使用的 A 級絕緣物例如擲扎用的白布帶等不应作为 A 級絕緣处理。当冷却空气温度为 40°C 时，表列各值均降低 5°C。

为了适应国家经济发展的需要，力争电力先行，对允许最高温度可以根据地区负荷的情况作适当的提高，以提高发电机的出力。结合大多数发电机的结构，铜铁温差較低的发电机轉子(如苏联及仿苏 T 2 型)B 級絕緣，允许最高温度可以提高到 145°C，浸膠絕緣的靜子綫卷允许最高温度可以拿膠的軟化点作为标准，一般可以在 105~120°C 之間适当选择。在入口风温为 10°C 以上时，可以不考虑铜铁温差，而以允许最高温度控制发电机的出力(即在气温較低可以进一步提高出力)。风道內的出汗問題应以防止漏风，引入干燥补給风以及在风道內加砂膠等吸水剂的办法加以消除，如果不能完全消除，出汗問題对发电机也并不是很危险的。

應該注意在使用上述允許最高溫度時，絕緣的運行壽命將有所影響，但不致于急速劣化。

## 二、准备工作

為了進行發電機的發熱試驗，必須進行試驗前的准备工作及發電機在靜止和轉動時的測量工作。同時要收集有關發電機的各项技術資料。

### 1. 儀器設備的準備

(1) 靜子回路及轉子回路使用的儀表至少應為 0.5 級。這些儀表包括：

交流電流表	3 只(如負荷平衡，允許用一只)
交流電壓表	3 只(如電壓平衡，允許用一只)
力率表	1 只
周波表	1 只
單相瓦特表	2 只(或用三相瓦特表一只)
直流電壓表	1 只
標準分流器 (附毫伏表 及導線)	1 套

(2) 選擇試驗儀表時，應符合原有表用變流器及表用變壓器之條件，並應尽可能使其表針在試驗時的指示值，位於表度盤之後半部。

(3) 其他設備包括：

測量轉子電壓用的鋼刷 一對；

双电桥	一套;
可变电阻10~20安 5 欧	一只;
蓄电池 6 伏 10~20安	一只;
水銀溫度計	十只;
风速計10~30公尺/秒	一套;
测风压用U空管	一套;
惠斯登电桥	一只;
計算尺	一只;
三角板	一付;
曲綫板	
方格紙	

## 2. 了解技术資料及运行資料

(1) 新安裝的发电机，应取得原制造厂家的制造資料（設計技术条件、安裝說明書之类的文件），尤其应注意到发电机絕緣結構的情况、对各工作部分允許溫升的規定值、迴轉条件及檢溫計安裝位置等。

(2) 已运行过的发电机应取得以往运行中曾发生事故的有关資料及大修資料，特別注意事故发生的地点及檢修結果。

(3) 已运行过的发电机，应了解其运行資料，即負荷情况，励磁系統工作情况，冷却系統工作情况等。

(4) 已运行过的发电机，应收集該机以往的試驗資料。

## 3. 发电机靜止时进行的工作

(1) 測量发电机轉子綫卷及励磁机并聯綫卷的直流电阻，对靜子綫卷測量其每相的直流电阻，如其为并聯回路时，測其每支路的直流电阻（当有最近可靠的試驗資料时可以不进行）。

测量时，发电机应处于冷却状态，此时发电机各部分的温度与周围空气的温度相差应不超过  $\pm 3^{\circ}\text{C}$ 。自停机到测量时的时间约为48小时，为了加速发电机的冷却，可使发电机于切去负荷及励磁后，空转六小时再停机。

测量发电机各部及周围空气的温度时，所用的水银温度计数量应不少于六支。测量用的温度计应置于齿间的楔条上，通风孔里，静子线卷端部以及靠近线卷的其他地点，温度计应该遮盖起来，使指示的温度不受空气流动的影响而变更。

当发现发电机转子有层间短路现象时，其直流电阻的测定应在转子转动的条件下进行，此时转子应空转一定时间（或开始停机时空转一定时间），使出入口风温保持平衡，这样测定的结果可以避免因为转子不稳定层间短路所引起的测量误差，同时也可以把自停机到测量的时间缩短到6小时左右。

## (2) 发电机热电偶温度曲线的校对

从发电机原有的一个热电偶上截取  $0.7 \sim 1.0$  公尺长的一段，用以制取热电偶的温度特性曲线，即热电动势对其两焊点温度差的关系曲线。最好绘制冷点为零度的温度特性曲线。

如果从原来之热电偶上截取一段有困难时，则温度特性曲线的绘制可按下列方法进行：

热电偶露出的两端子上用铜线连接至检流计，将铜线（如为镍铜时）的端子与温度计一同沉于预先加热到  $100^{\circ}\text{C}$  的水或油中，按照水（或油）温的降低同时进行温度计与检流计读数的记录。检流计为零时，即表示水的温度与热电偶埋入处的温度相等。

电阻温度计不可能绘制温度特性曲线。为了用他来决定线卷及铁心的温度，要求有制造厂的温度特性曲线或应当知道它是用哪种材料作成的。



在这种情况下决定温度的时候，必須知道欧姆电阻。

(3) 檢温計欧姆电阻的測量

分別測量檢温裝置的电阻及从发电机到測量裝置(流比計、檢流計)間的回路的电阻。

电阻溫度計欧姆电阻溫度曲綫的檢查。

电阻溫度計精確性的檢查。

(4) 測量发电机的次瞬間电抗或漏抗(在缺乏厂家原始資料或試驗資料时进行)。

(5) 裝置轉子回路測量用的分流器，裝置分流器可利用励磁回路原有双脚插銷，如原来沒有双脚插銷，則在裝置时，最好并联一个旁路刀閘，以便于在运行中折除試驗用的分流器。

(6) 將測量靜子回路內各量用的电压表、电流表、瓦特表及力率表接入原来的靜子回路中。

所有靜子回路的表計，均应直接接于靜子出綫上，禁止在变压器另一側进行測量。

在接入前必須事先檢查发电机的表用变流器及表用变压器的負載情况，須保証該項表用变流器及表用变压器的誤差不超过允許范围。如不合要求时，应另裝試驗用表用变流器及表用变压器。

(7) 將測量冷却空气进出口溫度及冷却水进出口溫度用的溫度表，置于測量位置。溫度計應該經過校准。

(8) 除去外盖进行发电机檢查，仔細觀察靜止綫卷端部絕緣情况，靜子鉄的情况、污穢狀況等等。

檢查冷却系統的情况，如冷却空气量調節裝置溫度表位置等是否正常。

(9) 設置用手提式毕托管风速仪測量风量用的螺孔及堵头，并測量裝置地点风道的截面。

(10) 裝置測量冷却空气压力的裝置 一般測量風扇前，風扇后及发电机出口三处。如遇有特殊需要，則需沿冷却系統各点多測几处，以考察各处之压力。

(11) 繪制轉子电阻——温度曲綫 以測得的冷电阻为根据进行計算，温度范围可由  $50^{\circ}\text{C}$  到  $145^{\circ}\text{C}$ 。电阻温度的換算用下列公式进行。

$$R_2 = R_1 \times \frac{235 + T_2}{235 + T_1}$$

式中  $R_2, T_2$  —— 欲求之电阻及温度；

$R_1, T_1$  —— 冷却状态之电阻及温度。

#### 4. 发电机轉动时进行的工作

(1) 录制发电机的主要特性曲綫——空載特性曲綫及短路特性曲綫。

为了取得特性曲綫的饱和部分，空載特性曲綫的录制，允許在降低轉数至額定值的  $80\sim 85\%$  时进行。

当录制特性曲綫的同时，进行配电盤仪表的校驗。同时檢查三相电压或三相电流是否平衡。

(2) 录制励磁机的空載特性曲綫，至其最大值。

(3) ① 录制发电机的調整特性曲綫  $I_{\text{ном}} = f(I_{\text{cm}})$

当  $u = U_{\text{ном}}$  时，在发电机帶有三个不同力率的負荷下进行，即  $\cos \varphi$  值等于額定值或降低及升高各  $10\%$  时，录制調整特性曲綫是最方便的。录制的調整特性曲綫与用电抗三角形(保梯三角形)所繪制的調整特性曲綫相比較。

(4) 冷却风量的測量 在近似額定負荷时，用风量表进行

① 此項应在发热試驗以后进行。

测量，以便进行热试验结果的分析。

### 5. 记录表格的准备

(1) 静子回路记录表 年 月 日

时间 时分	次数	电压(千伏)				电流(安)				功率(瓩)			力周率		备注
		AB	BC	CA	平均	A	B	C	平均	$W_1$	$W_2$	$\frac{W_1}{W_2}$	率	率	
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
	1														
	2														
	平均														

(2) 转子回路记录表 年 月 日

时间 时分	次数	电压(伏)		电流(安)		电阻值 (欧)	换算温度 °C	备注
		读表值	换算值	读表值	换算值			
1	2	3	4	5	6	7	8	9
	1							
	2							
	3							
	平均							



## 6. 試驗的分工

(1) 試驗期間負荷的增加、轉子電流的調整、冷卻空氣的調節均由原來的值班人員擔任，但其操作必須遵照試驗指揮者的規定和指示進行，不得擅自變動，以免影響試驗結果。

(2) 除原值班人員外，試驗應由下列人員進行：

靜子回路精密儀表	電壓表	一人	} 靜子回路二人亦可
	電流表	一人	
	瓦特表	二人	
轉子回路	電流表	一人	
	電壓表	一人	
銅刷接觸(視滑環位置而定)、	冷卻空氣及		
	水的溫度	一人~二人	
配電盤表計及靜子溫度			
(可由值班人員兼任)		一人	
- 其中一人擔任指揮。			

## 三、負荷情況下熱試驗的進行

### 1. 試驗的次數

(1) 新裝的發電機發熱試驗至少須在三種不同的負荷下進行，第一次為額定容量的70~75%，第二次為額定容量的80~90%，第三次為額定容量的100%。為提高出力而進行熱試驗時，可以逐步升高負荷，每次在5%額定值以下，試驗後停留較長時間作運行觀察，當一切正常以後，再增加負荷進行測量，一直到靜子或轉子達到允許最高溫度為止。

(2)运行中进行的核对性热試驗，仅在近于額定負荷的情况下作試驗，然后将試驗結果与发电机已往的热試驗記錄比較。

## 2. 热試驗的要求

(1)发电机的热試驗的时间約为6~8小时(必要时可适当延長)。如果热試驗进行前发电机已在近于試驗所要求的容量下运行，則試驗时间可以适当縮短，因为此时发电机的热稳定状态很快即可达到。

(2)在整个热試驗进行期間，轉子电流須用手动調节，保持其严格的稳定，同时靜子电流、电压及有功功率亦須尽可能的保持不变。若有变化，則其允許范围以各相应的試驗要求值作基准时，为：

轉子电流	$\pm 1\%$
靜子电流	$\pm 3\%$
靜子电压	$\pm 3\%$
有功功率	$\pm 3\%$

为了維持上列各值的稳定，自动电压調整器在整个試驗期間，应予切除退出运行。

(3)試驗期間三相靜子电流及电压应尽量保持平衡，其不平衡值不得超过3%。

(4)在試驗期間，冷却空气的进口温度应接近于額定值，并严格地保持其不变，其变化不超过 $\pm 1^{\circ}\text{C}$ 。如为提高出力进行試驗，則进口风温可以逐步降低，使入口风温不低于 $10^{\circ}\text{C}$ 。但仍需严格保持不变。

(5)所有記錄应每半小时讀取一次，最后一小时应每10~15分鐘讀取一次。轉子电流及轉子电压的測量每次应連續三

次，取其平均值。其他表計取二次平均值，所有表計均應同時讀取。

(6) 發電機在調整至某一負荷值後，約於 3 ~ 5 小時內達到熱平衡，在試驗的最後一小時，溫度變化不大於  $1^{\circ}\text{C}$  時，即認為已達到穩定狀態，在該負荷下的試驗，即可停止。

### 3. 測量方法

#### (1) 轉子繞卷溫度的測量

轉子繞卷的平均溫度，由繞卷直流電阻與冷卻狀態電阻的相對變化而決定。在負荷情況下，熱狀態的繞卷電阻用電流電壓表法決定。

轉子電流用接於轉子回路分流器上的毫伏表測量，接線應該盡量短，其截面應不小於 6 平方公厘；分流器、毫伏表皮導線應一起進行過校驗。

轉子電壓的測量使用特制的專用銅刷，從轉子滑環上引出，由於炭刷接觸的不穩定引起誤差，以及由於炭刷電壓降的關係使測得的轉子電壓過高，在計算轉子溫度中會引起很大的誤差，因此不允許在發電機轉子滑環的炭刷上測量電壓。

從發電機的滑環到電壓表的引線，應使用良好的絕緣繞線。

#### (2) 冷卻空氣流量的測量

空氣流量的測量在接近於額定負荷時進行，用以進行熱試驗結果的分析。冷卻空氣流量，使用測量風速的手提式畢托管進行。

測量的地點應該處於氣流平穩的直綫的風道上，以免由於風道彎曲而引起的亂流影響測量結果。

密閉式發電機空氣流量的測量，應該在距空氣冷卻器入口

150~200公厘的冷却风道内进行。

测量时应该在截面的垂直及水平中心线上分成若干段（每段长度均为10~15公分），每段测量一次，最后取平均值。

空气流量等于平均速度与风道截面的乘积。

当在空气冷却器水的入口上有测量水量的装置时，则冷却空气量可以从热损失平衡方程式计算出来，为了准确起见，热平衡方程式最好在额定负荷时得出。

### (3) 用热电偶测量温度

用热电偶测量定子温度时，热电偶的冷点，可置于冷空气室内，此时检流计的指示，为静子的温升，此温升加上冷却空气的温度即为静子实际的温度。

检流计应校准于零位。

如果热电偶的指示计，系与导线同时校过而刻以温度值者，则该热电偶的冷点在测量区间，经常保持于校准时的温度，否则将会引起误差。

## 四、試驗資料的整理

1. 从相应于热状态的每一仪表的指示值，可以取得平均值，所有試驗的結果均按照平均值进行计算，个别突出的將因之而使平均值跃动的試驗結果可不必計入。

2. 发电机各工作部分的温升即为超过冷却空气进口温度的温度升高值。

3. 轉子綫卷的温升按照下列公式计算：

$$\Delta t = \frac{R_2 - R_1}{R_1} (234.5 + t_1) - t_2 + t_1,$$



- 式中  $\Delta t$ ——在該入口空气溫度下轉子繞卷的溫升；  
 $R_1$ ——轉子繞卷在冷狀態溫度為  $t_1$  時的電阻；  
 $R_2$ ——轉子繞卷在熱狀態溫度為  $t_2$  時的電阻；  
 $t_2$ ——在測量  $R_2$  時的入口空气溫度。

#### 4. 靜子溫度的決定按照檢溫計的指示依下列方式進行：

(1) 電阻溫度計 從測量所得的電阻平均值減去所有結綫的電阻，即得到電阻溫度計的電阻。然後可再利用電阻溫度計的溫度曲綫決定靜子溫度。

(2) 熱電偶溫度計 用熱電偶測定發電機溫度的方法，隨其刻度曲綫制取方法的不同而不同，熱電偶的溫度曲綫可以從埋於發電機的熱電偶，在發電機各部分所具有的不同溫度的冷點的情況下制取，或用一段熱電偶在零狀態的冷點制取。

當溫度曲綫系利用埋於發電機的熱電偶制成時，則決定發電機溫升時必須：

1) 根據測得的熱電動勢，利用溫度曲綫決定熱點與冷點的溫差。

2) 所得溫差加冷點的溫度即為熱點之溫度。

3) 熱點的溫度與冷卻空气進口的溫差即為發電機的溫升。

當溫度曲綫系利用熱電偶的一段制成時，則決定溫度時須考慮熱電偶內阻及導綫電阻的電壓降。在這種情況下，溫度用下列方式進行計算：

1) 計入熱電偶內阻及導綫電阻電壓降的熱電動勢，可依下式計算：

$$E = U \frac{R_{np} + R_{wo}}{R_{np}}$$

式中  $E$ ——欲求的熱電勢；

$U$ ——毫伏表的測量值；