

提高发电机出力 的几个问题

水利电力部技术改进局等著



水利电力出版社

內 容 提 要

从去年冬季以来，許多发电厂都在千方百计地提高現有发电机的出力，以供給工农业更多的生产用电。为了交流經驗，我們選擇了几項提高出力的方法和运行經驗汇编成此书，供有关单位参考。

本书內容：

一、适当选择运行电压提高发电机出力 介绍淮南发电厂等在改变发电机运行电压后提高出力的經驗。

二、运行中測量发电机定子綫卷的平均温度。敘述对未设置測溫元件的发电机，如何加設簡單的測溫装置以及具体操作方法等。可供設有类似电机的电厂加强測溫监视和提高出力时应用。

三、汽輪发电机开式冷却运行的一些体会。介绍广东五仙門发电厂的开式冷却发电机的运行經驗。

四、蒸汽喷射降低風温装置的設計，介绍冷却“冷却空气”的装置。

五、加电瓶提高励磁机出力。北京电业管理局对由于励磁机容量不足而限制发电机出力的设备进行了試驗，証明在励磁机励磁电路中加接电瓶后可提高发电机出力。这里介绍它的連接方法和操作等。

提高发电机出力的几个問題

水利电力部技术改进局等著

*

2138 D 615

水利电力出版社出版（北京西郊科学路二里内）

北京市书刊出版业营业許可証出字第105号

水利电力出版社印刷厂排印

新华书店北京科技发行所发行 各地新华书店經售

*

787×1092 1/32 开本 * 3% 印張 * 77 千字

1959年9月北京第1版

1959年9月北京第1次印刷(0001—4,330册)

統一书号：15143·1714 定价(第9类)0.41元

目 录

- 一、适当选择运行电压
 提高发电机出力.....淮南发电厂 倪安华 (2)
- 二、运行中测量发电机
 静子线卷平均温度水利电力部技术改进局 (9)
- 三、汽轮发电机开式冷却运行
 的一些体会广东省电业局五仙门发电厂 (16)
- 四、蒸汽喷射降低风温装置的设计.....水利电力部技术改进局 (27)
- 附录：蒸汽喷射致冷装置的设计参考资料..... (65)
- 五、加电瓶提高励磁机出力
 北京电业管理局中心试验所 (116)

一、适当选择运行电压 提高发电机出力

淮南发电厂 倪安华

适当的提高或者降低发电机的运行电压，可以挖掘设备潜力，提高发电机的出力。因为在提高发电机出力的时候，往往受到静子温度或转子温度的限制。但是，静子温度与转子温度不会同时达到极限，而是其中之一达到极限以后，就限制了发电机的出力。在这种情况下，如果我们能通过分析与试验，改变运行电压就有可能降低静子温度或转子温度，也有可能两者都降低。如淮南发电厂由于静子温度较高，转子温度较低，出力受到静子温度的限制。在提高电压5%以后，出力增加了4%。但转子温度约增加了4~5°C。闸北发电厂提高电压10%以后，静子温升由60°C降低到56.5°C，转子温升由91°C降低到90°C。又如阜新发电厂在降低电压5%以后，当额定运行方式时转子电流由413安降低到389安，因此转子温升由102°C降低到88°C。这些例子都说明了改变发电机的运行电压后，可以提高发电机的出力。

(一)改变电压时发电机静子温升的变化

发电机静子温升与静子电流平方关系曲线，差不多是一条直线，如图1-1中， U_{H_0} 曲线与纵座标的交点为发电机空载额定电压时的静子温升 τ_0 。其中包括两个部分：即静子温升的通风所引起的成分 τ_v ，和静子温升由于铁损所引起的成分 τ_{cm} 。在额定运行方式的时候，静子线卷的温升

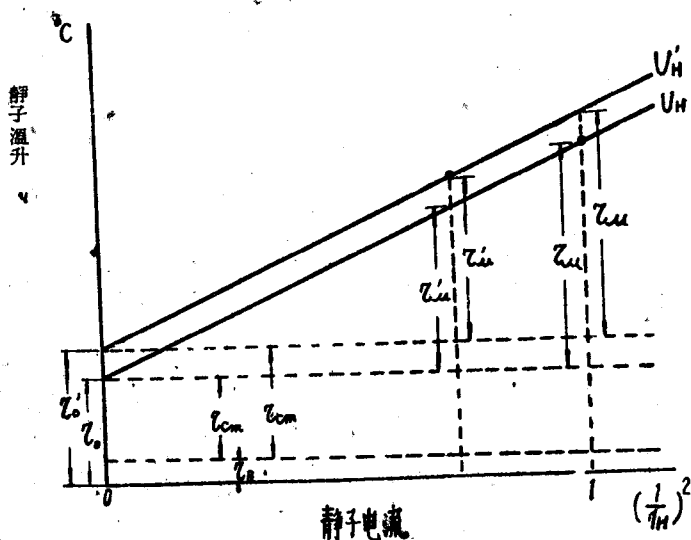


图 1-1 静子电流

$$\tau = \tau_0 + \tau_{\kappa} = \tau_0 + \tau_{cm} + \tau_{\kappa}$$

式中 τ_{κ} ——为额定电流 I_N 时由于静子电流铜损所引起的温升。

如果发电机的额定电压改变时(假定提高), 则静子绕组温升曲线(图中 U_H')应该是平行与 U_H 的平行线, 其与纵坐标的交点为 τ_0' , 但此时 τ_0 并没有改变, 因此,

$$\tau_0' = \tau_0 + \tau_{cm}'$$

式中 τ_{cm}' ——在 U_H' 时的铁损所引起的静子温升。

从图中可以看出, 当同一电流不同电压时, 静子绕组温升之差为

$$\tau_0' - \tau_0 = \tau_{cm}' - \tau_{cm}$$

但

$$\tau'_{cm} = \tau_{cm} \left(\frac{U'_n}{U_n} \right)^2,$$

因此

$$\tau'_0 - \tau_0 = \tau_{cm} \left(\left(\frac{U'_n}{U_n} \right)^2 - 1 \right) \quad (1)$$

同样可以从图中看出，当同一电压不同电流时，静子线卷温升之差为 $\tau_m - \tau'_m$ 。但

$$\tau'_m = \tau_m \left(\frac{I'_n}{I_n} \right)^2,$$

因此

$$\tau_m - \tau'_m = \tau_m \left(1 - \left(\frac{I'_n}{I_n} \right)^2 \right) \quad (2)$$

在这里，我们假定发电机电压由 U_n 改变为 U'_n ，同时静子电流由 I_n 改变为 I'_n ，但是仍旧保持发电机的千伏安出力不变。即

$$U_n I_n = U'_n I'_n.$$

则

$$\left(\frac{U'_n}{U_n} \right)^2 = \left(\frac{I_n}{I'_n} \right)^2.$$

由此可知，当改变运行方式以后，发电机静子线卷温升之差为公式(1)~(2)：

$$\Delta\tau = \tau_{cm} \left(\left(\frac{U'_n}{U_n} \right)^2 - 1 \right) - \tau_m \left(1 - \left(\frac{I'_n}{I_n} \right)^2 \right).$$

当 U'_n 与 U_n 变化不大时，则

$$\left(\left(\frac{U'_n}{U_n} \right)^2 - 1 \right) \approx \left(1 - \left(\frac{I'_n}{I_n} \right)^2 \right),$$

则

$$\Delta\tau = (\tau_{cm} - \tau_m) \left(\left(\frac{U'_n}{U_n} \right)^2 - 1 \right). \quad (3)$$

由此可见，当提高电压以后，如果 $\tau_{cm} > \tau_m$ 时，则 $\Delta\tau$ 为正，即表示温升增加。如果 $\tau_m > \tau_{cm}$ 时，则 $\Delta\tau$ 为负，即表示温升降低。反之，如果降低发电机电压，即 $\frac{U'_n}{U_n} < 1$ 。如果 $\tau_{cm} >$

τ_m 时則 $\Delta\tau$ 为負，即表示温升降低。如果 $\tau_m > \tau_{cm}$ 时，則 $\Delta\tau$ 为正，即表示温升增加。因此，我們應該把发电机額定电压时的鉄損与額定电流时的銅損作一次比較，如果銅損大于鉄損，則應該用提高电压的方式来降低靜子温升，如果鉄損大于銅損，則應該用降低电压的方式来降低靜子温升。

淮南发电机是国产 4H5466/2 型发电机，鉄損为 24 瓦，靜子銅損为 47 瓦，因此可以采用提高电压的方式。当电压提高 5% 时，鉄損为 $24(1.05)^2 = 26.4$ 瓦。如保持千伏安不变，則靜子电流应降低 5%，則銅損为 $47(0.95)^2 = 42.5$ 瓦，所以靜子損耗由 $24 + 47 = 71$ 瓦降低为 $26.4 + 42.5 = 68.9$ 瓦。根据試驗結果， $\tau'_0 - \tau_0 = 2^\circ\text{C}$ ， $\Delta\tau = 4^\circ\text{C}$ 。即提高电压以后，保持同样的千伏安出力，靜子温升降低 4°C 。如果保持同样的温升，則靜子电流允許大于 $0.95I_n$ 。根据試驗結果約可提高到 $0.99I_n$ ，則发电机千伏安出力为 $1.05 \times 0.99 = 1.04$ ，即提高 4%。

一般发电机銅耗往往大于鉄損，尤其当利用設計裕度，提高出力的时候，鉄損并不因提高出力而增加，而銅損則随提高出力而大量增加。从式(3)中很容易看出，当銅損大大超过鉄損时，而电压有較大的提高时， $\Delta\tau$ 的值也会大量增加，因此发电机温升大量降低，对提高出力更加有利。

(二) 改变电压时对发电机轉子温升的变化

考虑到发电机靜子內的发热对轉子的温升影响很小，轉子綫卷的温升只决定于轉子綫卷的損失，因此，改变发电机靜子电压运行时，并不会改变轉子綫卷的温升曲綫。但当改变运行电压而千伏安出力和功率因数不变时，則轉子电流会有相应的改变，由于轉子电流的改变也就改变了轉子綫卷的温升。当低于額定电压运行时，轉子电流一般将减小。当高于額定电压运

行时，轉子电流一般将增加。但对每台发电机而言，由于材料和工艺的差别，影响到参数的改变，其变化幅度并不一致，也可能与上述情况相反。因此，要决定采用提高电压方式，还是采用降低电压方式来达到减低轉子温升的目的，首先，应该根据发电机的空载特性曲线和三相短路特性曲线用作向量图的方法，来算出同一千伏安，同一功率因数，不同靜子电压时相应的轉子电流值，再根据轉子温升曲线查出相应的轉子繞卷温升来确定。

(三)如何适当选择运行电压

根据上面分析，提高或者降低发电机的运行电压，就有可能降低靜子或者轉子的温升。那末究竟应该提高还是降低呢？应该根据每台机的特点分别决定。但在一般情况下，如果靜子温度较高，而轉子有一定的温度裕度，则应该提高电压运行。
如果轉子温度较高，而靜子有一定的温度裕度，则应该降低电压运行。因为，一般发电机都是铜损大于铁损，当降低电压运行以后，轉子电流会相应降低。但是，为了谨慎起见，在决定提高还是降低电压以前，最好事先进行以下几方面分析工作：

1. 将发电机进行一次温升试验，繪出靜子与轉子温升对电流平方的关系曲线。通过试验，再解发电机的出力究竟受靜子温度的限制，还是受轉子温度的限制。

2. 调查一下发电机的试验记录，了解发电机的各项损失，以及由于通风损失、铁心损失、定子基本铜损分别所引起的靜子繞卷的温升。如果没有以上的资料，或没有办法进行试验时，也可以从温升曲线中大略比较一下 τ_o 及 τ_m 的数值。

3. 根据发电机的空载特性曲线及饱和特性曲线，繪制额定千伏安、额定功率因数时，当电压为 1.0, 0.95, 1.05 额定电

压时，找出相应的轉子电流数值，以便确定在那一种的运行方式时的轉子电流最小。

根据以上方法，决定提高电压还是降低电压以后，再决定它的变化数值。但是，变压的数值实际上是由主变压器分接头所規定，一般主变压器設有95%，97.5%，100%，102.5%，105%的分接头，因此电压的变化，也只有可能在这五个数字中决定。如果需要改变的数值大于 $\pm 5\%$ 时，或者主变压器原来的分接头位置已經不能改变时，那只有改变整个系统的电压。这就需要由調度部門对整个系統或一部分系統作統一的考虑。同时，厂用电系統也需要相应的改变厂用变压器的分接头。

(四)改变电压以后需要考虑的几个問題

1. 如果要提高发电机的运行电压，应该考虑发电机的絕緣。如果电压变化在 $\pm 5\%$ 以內，这是完全允許的。但如果电压高于5%，能否长期連續运行，应该考虑发电机的对地絕緣情况、层間絕緣情况、漏磁情况、靜子的电暈情况等。最好事先征求一下制造厂的意見。同时在提高电压后的試运行期間，应对发电机进行严密的監視，端部端盖及机座有无局部发热現象。

2. 提高电压以后，应考虑主变压器主引出綫及分綫头上所加的电压的数值。因为由于变压器运行电压的提高，必将引起励磁电流的增加，由于励磁电流的增加，必将引起鉄心損失的增加。因为，一般变压器設計的額定电压均接近于飽和曲綫的飽和点上，因此电压增加以后，可能鉄心損失大量增加，使鉄心产生不允許的高热。如果有条件的話最好測量一下鉄心由于升高电压后的額外温升，或者做一次空載特性試驗来比較一下电压升高以后励磁电流增加的数值。但是，一般如果电压在5%

範圍以內變動，這是完全允許的，超過 5 % 以上時，應該有周密的分析才能決定。

3. 如果降低電壓運行，應該考慮發電機運行的靜態穩定度問題。由於發電機提高了出力，對於靜過載能力 S 應該重新核算

$$S = \frac{i_n}{i_n \cos \varphi}$$

式中 i_n ——額定運行方式下的轉子電流，當提高出力以後，應該是新的運行方式下的轉子電流；

i_k ——額定靜子電流時的三相穩定短路的轉子電流，當提高出力後，應該是新的靜子電流時的轉子電流；

$\cos \varphi_n$ ——額定運行方式時的轉子電流。

如果有自動電壓調整器及強行勵磁的發電機，核算上述 S ，如果大於 1.3 時，則可以不考慮靜態穩定度問題。

4. 廠用電系統一般接在發電機電壓的母線上。由於發電機的变化，也同時引起了廠用電系統電壓的变化。如果廠用動力容量比較富裕的話，則當降低電壓運行時，就有可能改善它們的力率，這種情況是有利的。如果是升高電壓運行，對電動機來說，可以達到 110 % 額定電壓，這樣運行對電動機提高出力也有好處的。因此，如果發電機電壓變動不大，可以不一定調整廠用電變壓器的分接頭位置。對於廠用照明來說，提高電壓以後會縮短燈泡的使用壽命。

5. 有關二次回路方面也需要根據發電機的強行電壓重新考慮一些問題：

(1) 在低電壓閉鎖的過電流保護裝置中，低電壓繼電器的整定值，應該根據新的額定電壓重新整定。否則可能使過流保

护的范围发生变化；

(2) 强行励磁的動作电压應該根据新的运行电压重新整定；

(3) 对发电机变压器組的縱联差动保护装置，如果当主变压器分接头改換以后，應該重新考虑补偿电流的整定值，否則，会引起不平衡电流的增加。

(4) 由于主变压器分接头的变动，对于单元制接綫的发电机，当准同期并列时，應該重新規定被并机电压与系統电压之差，这可以根据变压器及表用变压器的变压比进行計算。

二、运行中測量发电机

· 靜子綫卷平均溫度

水利电力部技术改进局

通过发电机全面的热試驗，准确掌握发电机运行中的温度，有助于挖掘发电机的潜力，使我們能有把握的掌握发电机超出力运行。发电机靜子綫卷的温度通常是用埋在槽內上下层綫棒之間或綫棒与鉄心之間(对单层綫組而言)的檢温計(电阻测温元件或热偶)进行測量。某发电厂的三号机上沒有这种測量装置，后来他們曾在靜子綫卷、鉄心、压环等各处理置了电阻测温元件和热偶，由于埋放不恰当，測出的温度与出风温度相近，不能作为掌握发电机运行的可靠根据。此次試驗中，采用了运行中測量靜子綫卷平均温度的办法，这种测温办法用于缺乏檢温計或檢温計不准确的旧发电机上，能够比較准确的了解导綫銅温，掌握发电机的运行。

(一) 測量接綫圖

測量的綫路圖見圖2-1。在運行中測量出發電機靜子繞組的直流電阻，然後根據電阻，隨溫度變化的關係計算出導綫的銅溫。

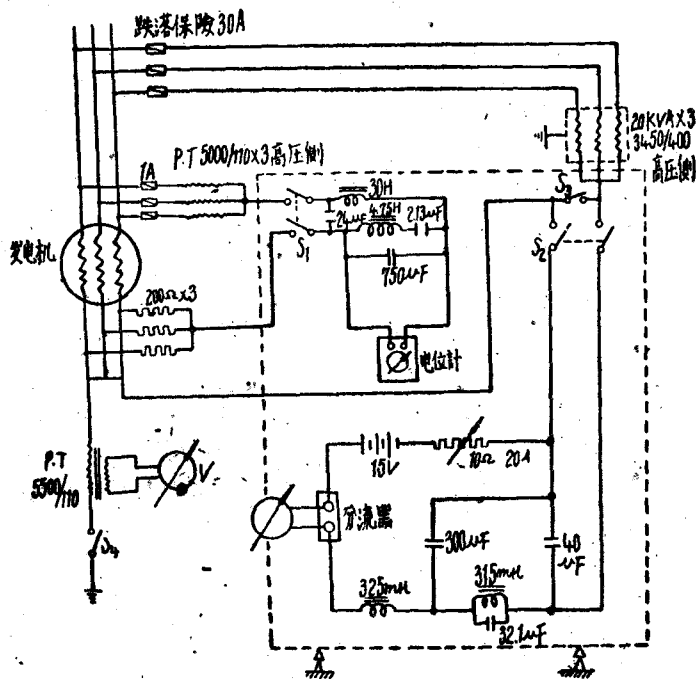


圖 2-1 帶負荷測量靜子繞組平均溫度接綫圖

整個綫路分為兩個部分，一部分是在靜子繞組中通入直流電，並測量繞組通過的直流電流的電流回路；一是測量靜子繞組直流壓降的電壓回路。

电流回路可以从发电机出线母线上接下来，经过跌落保险和隔离交流变压用的电抗器（以三台20千伏安单相变压器高压侧接成Y形组成，低压侧开路），经过刀闸 S_2 的一刀串入电流表，蓄电池和调节电流用的10欧可变电阻，再由刀闸 S_2 的另一刀接到发电机中性点去。在这回路中还有一套交流过滤的接线（图中的电感、电容），滤去电流回路内的交流使它不流过电流表。

电压回路和电流回路的接法一样，为了使测量准确，电压回路的接线应该从发电机静子绕组的出线端接出来。经过一组接成Y型的P.T，再经刀闸 S_1 的一刀串入电位计，由 S_1 的另一刀和接成Y型的三个200欧电阻，分别接上发电机中性点侧的三个出线端。这三个200欧的电阻是为了避免直接短接发电机中性点侧差动保护C.T用的，在这回路内，也有一套交流过滤接线（图中的电感，电容），滤去回路内的交流，使它不经过电位计。使用电位计可以直接读出静子绕组直流压降的毫伏数，若用微安表来测量，则必须选用比较精确的微安表，并应连同整个电压回路的接线事先进行校准。

发电机的中性点经过一P.T接地，其次级接一电压表作为监视发电机单相接地用。刀闸 S_3 用来使变压器的中性点与发电机的中性点短接（不进行测量时），以避免两中性点间产生的高压。

测量时合上刀闸 S_1 、 S_2 ，拉开刀闸 S_3 ，调节电流回路内的10欧姆可变电阻，使电流达3安左右，同时读取电流表与电位计的数值，算出发电机静子绕组的直流电阻，然后按公式

$$\frac{235 + t_0}{235 + t} = \frac{R_0}{R}, \text{ 计算出绕组的平均温度。}$$

(二) 测量回路內各元件

电流和电压回路內的交流过滤装置，是整个接綫中很重要的一部分。刀閘 S_1 、 S_2 后面都各有一組电容量較大的容器（图中电流回路为40微法，电压回路为24微法），通过它首先把两中性点間的交流电压降至最低，这是过滤中起主要作用的。电容愈大，阻抗愈小，两中性点間的电压也愈低。在电压回路中，不加这24微法的电容时；两中性点間的电压为60伏，加上这电容以后，电压降到几乎等于零（这都是指合上 S_1 时的情况，在断开 S_1 时，两中性点未接任何阻抗，此时电压很高，甚至高达1000伏以上）。这一点交流电压是容易被以后的过滤装置所滤掉的。当 S_1 合閘的瞬間，这一組电容器要承受一个冲击的高电压，所以必須选用耐压較高的交流电容器，如工作电压为400伏的油浸紙介质电容器或日光灯电容器（电流回路的情况也一样）。除了这一組电容而外，在电流回路內的交流过滤装置是由一个接成并联共振的高阻抗，一个电感綫圈和一个300微法的旁路电容器所組成。并联共振高阻抗中的电容，也应用耐压較高的电容器，300微法的旁路电容可以用电容量大的电解質电容器（一般直流工作电压为25~50伏，50微法以上）。两个电感綫圈的选择应使其导綫能通过2安培的电流，同时又要求阻抗較大，这两个电感可以用2或3个五灯收音机电源变压器一次綫卷并联。电压回路內的滤过装置是由一个阻抗大的电感綫圈（图中为30亨），一个接成串联共振的低阻抗和一組电容很大的电容所組成。

电压回路內隔离交流高压用的一組 P.T 应该选择其交流阻抗大而直流电阻小的 P.T。这样既能很好的隔离交流高压，又不会严重的影响电位計的灵敏度。假若用一組直流电阻小交

流阻抗也小的变压器則必須把 S_1 以后的电容器加得很大。此外，减小发电机中性点出綫端上所接的三个电阻，也可提高灵敏度，这电阻可减小到每相几欧。

全套測量設備和接綫都必須对地絕緣，試驗人員站在絕緣台上操作和測量。发电机中性点 P.T 次級所接的監視发电机系統单相接地的电压表，放在容易監視的地方。一旦发现有单相接地时立即停止試驗。

測量中所加直流电流不宜太大，也不宜太小。太小則发电机繞組直流压降小，表計不易測准，如太大，則可能引起电池的过度放电，在測量过程中不易使电流稳定。我們在試驗中直流加到 3 安左右。

(三)測量的准确度及誤差

試驗中，我們对測量的准确度及誤差进行了分析。最初考虑同时用双电桥和这一綫路进行比較。由于双电桥必須在比較大的电流的情况下測量才准确(10安以上)，一时又未找到这样大的直流电源，因此我們用另外的办法来进行比較。我們用一个 0.001 欧的标准电阻代替发电机綫卷作为被試品(75°C 发电机綫卷直流电阻三相并联为 0.00405 欧)，用这一套設備和接綫来測量它的电阻，得出如下的数值

电流(安)	1.79	1.13	1.83	1.22
电压降(毫伏)	1.8	1.13	1.83	1.21
計算电阻(欧)	0.001006	0.001	0.001	0.000992
誤差	0.6%	0	0	0.8%

由此可見，測量誤差在 1% 以下。

实际上，測量运行中发电机綫卷的直流电阻，和測量这标准电阻的情况不一样。运行中发电机的电流电压并不絕對稳

定，它的每一变动都将引起测量线路中的电感电容回路的一个瞬变过程，这是不能避免的。因此，在实际测量中使误差增大。我们在发电机温升已经达到稳定时，连续测量五次，取其平均数，测量情况如下：

名 称	1	2	3	4	5	平 均
电流(安)	10.72	10.2	9.71	8.68	7.95	
电压(毫伏)	2.79	2.62	2.49	2.24	2.04	
电阻(欧)	0.003842	0.003893	0.00389	0.003875	0.00389	0.003881
温度($^{\circ}\text{C}$)	62	65.5	66.2	64.5	66.2	64.5

从上面数据可以看出，连续数次测量出来的电阻数值，其差异在有效数字的第三位，由此而使推算出的温度的误差（平均数与最大、最小之差）在 3°C 以下，这已经是比较令人满意的了。

还必须提出换算公式的基本电阻(R_0)问题。由于基准电阻不准，换算所引起的误差可能比测量本身的误差还大。这基本电阻应该是在发电机冷状态下各部温度已经均衡且和室温相近(不超过 $\pm 3^{\circ}\text{C}$)时，利用本测量线路测出的发电机线卷直流电阻值作为基准。这需要停机相当长的时间(往往要几天)以后才能办到。这次试验中，由于停机时间有限，我们不能得到这样情况下的基准电阻值。但由于测量标准电阻时，其误差很小，所以就以原来用双电桥所测得的发电机冷状态下的直流电阻作为基准电阻。不过，最好还是进行一次上述的测量则更加完善。

还必须注意的是：开始进行测量合上刀闸 S_1 ， S_2 以后，测量回路内的电容有一个充电过程，这些电容都比较大，所以

充电过程的时间很长，在调节电阻回路内的可变电阻改变电流大小时也有此现象，因此必须在这些操作以后等两三分钟再行测量，否则将得出错误的结果。

(四)实际测量数据

应用这一方法在某发电厂三号发电机上作了热试验。发电机额定容量6,250千伏安，5,000瓩，电压5,700/5,250伏，电流634安，力率0.8，周波50，转速3,000转/分，英国MV厂出品，1924年安装。励磁机没有铭牌，厂里规定额定电压110伏额定电流210安。在5,000瓩及6,500瓩负载下，测量了发电机的温度，数据如下：

负载5,000瓩，静子电压5.5千伏，静子电流574安，力率0.9，测出静子线卷电阻0.003881欧，平均温度为64.5°C。励磁电压93伏，励磁电流207安，转子电阻0.45欧，转子温度为62.5°C。发电机入口风温18.5°C，出口风温43°C。

负载6,500瓩，静子电压5.65千伏，静子电流734安(电流过载15%)，力率0.9。测出静子线卷电阻0.004171欧，平均温度为87°C。励磁电压111伏，励磁电流231安，转子电阻0.4827欧，转子温度为84°C。发电机入口风温22.5°C，出口风温50.5°C。

从试验结果看来，在5,000瓩负载时，静子平均温升46°C，转子温升44°C。在6,500瓩负载时，静子平均温升64.5°C，转子温升61.5°C。这样低的温升，最初曾经引起我们的怀疑，后来对测量准确度及误差进行了多次的试验验证，又对历来运行情况进行了分析研究，并测定了发电机的风量为1,000公尺³/分，另一发电厂20,000瓩容量的十号机其风量为1,400公尺³/分，这说明本机风量是比较大的，最后肯定这台发电机，在温升方