

用不对称电压法测定三相异步电机的负载杂散损耗和绕组温升

徐宁寿 李忠诚 李 环 张培华 韩仕景

北 京
工 业 大 学

1979·10·

用不对称电压法测定三相异步电机的负载杂散损耗和绕组温升

徐宁寿 李忠诚 李 环 张培华 韩仕景

提 要

文中论证了异步电机在不对称电压下运行时,电机内部正、负序系统间的关系与异步机法测量负载杂散损耗时被试机与辅助机间的关系十分相似。根据这一基本特征,拟出了测定负载杂散损耗的不对称电压法,简化了试验机械设备,并有助于提高测量精度。

文中还针对现有不对称电压法测定异步电动机绕组温升试验的缺点,在较严格的理论分析基础上提出了改进方案,从而在试验设备要求不高的情况下获得了令人满意的温升测定精度。

一. 引 言

(1) 关于杂散损耗测定

〔文1、2〕中已证明,异步电机内由于高次谐波磁场在转子及同步速旋转(转差率 $S=2$)时所造成的杂散损耗与在正常工作状态($S \approx 0$)时所造成的杂散损耗基本一致。因此,在国家标准GB1032-69中规定,用反序因反转速法测定异步电动机杂散损耗。但是由于该法需要用到分片无刷直流电动机或测功机,以及该法造成比较特殊的发热,因而难于普遍推广。〔文3〕中提出了用同型号异步机代替直流测功机或测功机及反序的“异步机法”,经有关方面初步验证,其结果与直

流机法出入不大，值得推广。本文所介绍的不对称电压法，可认为是异步机法基础上的进一步发展。如果假想地把异步机法中二台电机合併，那么原来作用在辅助机上的电压、电流便相当于合併后所得不对称三相电压、电流中的正序分量，而原来作用在被试机上的电压、电流则相当于合併后的负序分量。因此，只要能通过不对称电压下的测量数据分介出正、负序电压、电流和功率，即可利用与异步机法相似的关系式求出杂散损耗。这样既可完全省去一切试验用的机械装置和机组安装劳动量，还有可能从某些方面提高测量杂散损耗的精度。

(2) 关于绕组温升测定

在人们多年来探讨过的几种测定绕组温升试验的等效发热方法〔文5~9〕中，以不对称电压法所需试验设备最为简单，只需对一般工频三相电流设备稍加改接即可〔见附录〕。但长期以来，这种方法并未得到广泛应用，究其原因主要有以下三条：

① 以往的研究工作，对于不对称电压下电机内部损耗分布情况及其与对称电压情况间的关系未作细致剖析、比较，因而给出的试验时掌握条件不够确切、严格，致使温升测定结果与直接负载法相差很大。甚至同样用不对称电压法，各种三相电流不平衡分配方案所得结果之间，相差也很大〔文6〕

② 三相电流的不平衡，使三相绕组的温升很不一致。一般认为，应取三相温升平均值作为试验结果，为此，要求断电停机后，立即十分紧张地依次轮番测量三相绕组热电阻，稍有疏忽怠慢即会使测量结果出现较大误差。此外，取平均值的作法还可能掩盖了各相绕组温升在三相对称电压下固有的不平均性（因为实际运行中三相绕组匝数不免略有出入），致使各相电流在对称三相电压作用下不完全一致。通常可把冷态电阻最

小的一相绕组匝数最少，电流可能较大，温升可能最高的一相（温升试验中可只测这一相绕组热电阻，并以此作为温升考核之依据）。

③ 即使三相绕组温升平均值合格，往往也会出现试验过程中电流最大的一相绕组温度长时间大大超过允许极限温度的现象。这使人担心采用不对称电压法会损害电机绝缘。

本文将针对既有方法的上述问题进行研究，提出较严格合理的试验时掌握的条件和恰当的操作方法，使测试结果既准确可靠，又不伤害电机。

二、在不对称电压下对异步机中功率和损耗关系的分析

按对称分量法理论，可以把作用在异步机定子上的任意一组不对称三相电压（ $\dot{U}_{AB}$ 、 $\dot{U}_{BC}$ 、 $\dot{U}_{CA}$ ）分解为具有相同相序、数值较大的正序分量（ $\dot{U}^+_{AB}$ 、 $\dot{U}^+_{BC}$ 、 $\dot{U}^+_{CA}$ ）和具有相反相序、数值较小的负序分量（ $\dot{U}^-_{AB}$ 、 $\dot{U}^-_{BC}$ 、 $\dot{U}^-_{CA}$ ）。于是，不对称三相电压作用在异步机上产生的各种后果，便可通过正、负序电压分别作用所产生的后果——合成来进行研究。

被施以不对称电压的异步机在空转条件下，其转子必定顺着较强的、由正序电压建立的正序磁场方向旋转。对于一般异步电机来说，因为转子电阻和机械摩擦转矩不大，转子的实际转速总是能达到很接近于正序旋转磁场同步速的地步。这时，转子对于正序磁场来说， $1 \gg s^+ \approx 0$ ，处于电动运行状态；但对于负序磁场来说， $s^- = 2 - s^+ \approx 2$ ，处在电磁制动运行状态，如图1所示。图2中画出了对立于各相序的等效电路。

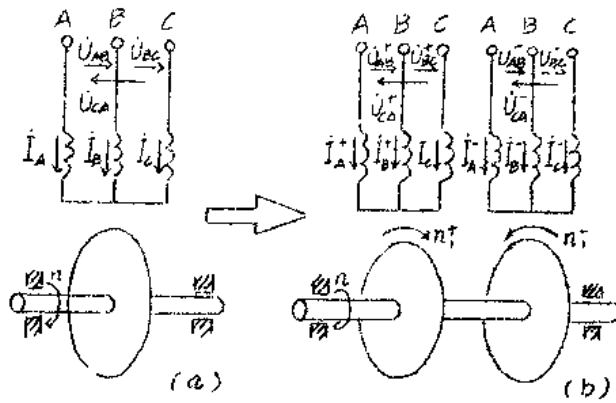


图 1. 处于不对称电压下空转的异步机 (a) 等效为一台正序电压作用下的电动机拖动另一台负序电压作用下的同型电机反转的系统 (b)

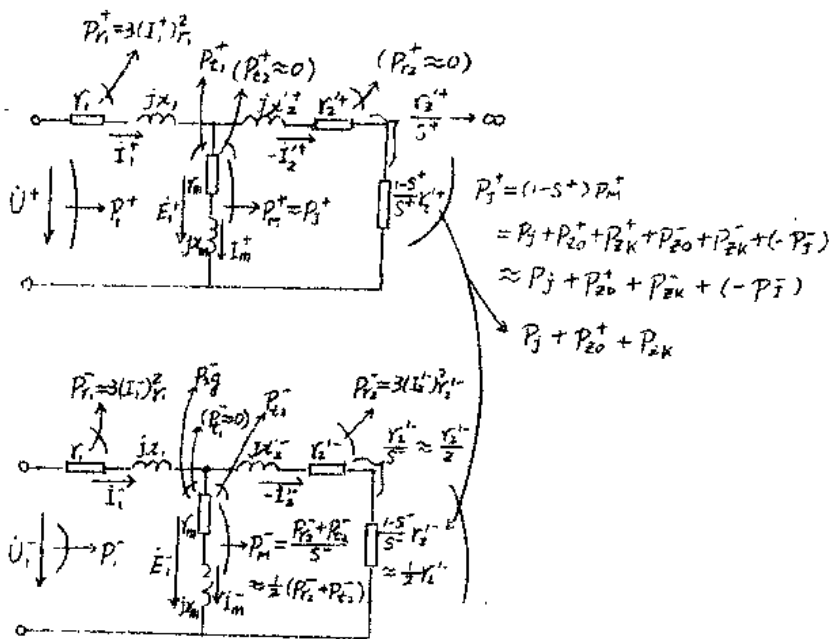


图 2 正、负序等效电路及功率、损耗关系

对应于各相序的等值电路及功率、损耗关系如图2所示，
图中

r_1, X_1 —— 分别为定子每相绕组的电阻和漏抗；

r_m, X_m —— 分别为每相激磁电阻和激磁电抗；

r_2', X_2' —— 分别为折合到定子方面的转子一相绕组的电阻和漏抗；

U_1, E_1, I_1 —— 分别为定子相电压、相电势、相电流；

i_m —— 激磁电流；

I_2' —— 折合到定子方面的转子相电流；

P_1 —— 定子输入功率；

P_{r1}, P_{r2} —— 分别为定、转子绕组电阻损耗；

P_{t1}, P_{t2} —— 分别为定、转子铁芯损耗；

P_j —— 机械损耗；

P_j —— 全机械功率；

P_M —— 电磁功率；

P_{20} —— 空载杂散损耗；

P_{2g}, P_{2k} —— 分别为负载后出现的基频和高频杂散损耗。

符号右上方标有“+”者表示正序分量，标有“-”者表示负序分量。

在 $S^+ \approx 0$ 、 $S^- \approx 2$ 情况下，电机中的功率、损耗关系如下。

(1) 正序输入功率 P_1^+ ，部分消耗于 I_1^+ 在定子电阻 r_1 上产生的损耗 P_{r1}^+ ，部分消耗于正序磁场切割定子铁芯产生的损耗 P_{t1}^+ ，其余部分为电磁功率 P_M^+ 。于是有

$$P_M^+ = P_1^+ - P_{r1}^+ - P_{t1}^+ = P_1^+ - 3(I_1^+)^2 r_1 - P_{t1}^+ \quad (1)$$

负序的情况与正序相似，只是要多考虑一项由 I_1^- 引起的基频杂散损耗 P_{2g} 当 $I_1^- < I_1$ （定子相电流 I_1 的额定值）时，负序磁场很弱，其在定子铁芯中产生的损耗 $P_{t1}^- \approx 0$ ，于是又

~ 6 ~

有

$$P_M = P_i - P_{r1} - P_{zg} - P_{t1} \approx P_i - 3(I_1^-)^2 r_1 - P_{zg} \quad (2)$$

(2) 按电机学理论, 消耗在转子绕组和铁芯中的损耗 $P_{r2} + P_{t2}$ 为电磁功率的 S 倍, 其余 $(1 - S)$ 倍转化为全机械功率 P_j 。于是对于正、负序系统分别有:

$$P_{r2}^+ + P_{t2}^+ = S^+ P_M^+ \approx 0 \quad (3)$$

$$P_j^+ = (1 - S^+) P_M^+ \approx P_M^+ \quad (4)$$

$$P_{r2}^- + P_{t2}^- = S^- P_M^- \approx 2 P_M^- \quad (5)$$

$$P_j^- = (1 - S^-) P_M^- \approx -P_M^- \quad (6)$$

(3) 由于正序磁场起拖动作用, 电机的机械损耗 P_j 以及两个磁场在转子中产生的空载杂散损耗 P_{z0}^+ 、 P_{z0}^- 和高频负载杂散损耗 P_{zk}^+ 、 P_{zk}^- , 都要由转子在正序磁场作用下产生的全机械功率 P_j^+ 来承担。 P_j^+ 的余部从轴上输入给负序磁场作用下的转子, 以供给负序全机械功率 $-P_j^-$ 的需要。由此可得关系式

$$P_j^+ = P_j + P_{z0}^+ + P_{zk}^+ + P_{z0}^- + P_{zk}^- + (-P_j^-) \quad (7)$$

在 $S^+ \approx 0$ 情况下, 由于正序转子电流 $I_2'^+$ 很小, 约与 $(I_2'^+)^2$ 成正比的 P_{zk}^+ 可忽略。在 $I_1^- \ll I_{1e}$ 和 $S^- \approx 2$ 的情况下, 负序磁场很弱, E_1^- 不大, 约与 $(E_1^-)^2$ 成正比的 $P_{z0}^- \approx 0$ 。再利用包含于 (5)、(6) 二式中的关系

$$-P_j^- \approx +P_M^- \approx \frac{1}{2}(P_{r2}^- + P_{t2}^-) \quad (8)$$

可将 (7) 式化为

$$P_j^+ = P_j + P_{z0}^+ + P_{zk}^- + (-P_j^-) = P_j + P_{z0}^+ + P_{zk}^- + \frac{1}{2}(P_{r2}^- + P_{t2}^-) \quad (9)$$

上有表明，与一般空载状态相比，正序磁场作用下的转子只不过多承担了与三项不大的损耗 $P_{2k} + \frac{1}{2}(P_{r2} + P_{e2})$ 相当的机械负载。

(4) 正序磁场和负序磁场都是圆形旋转磁场，各自磁密沿气隙按正弦规律分布的幅值都是恒定的，但方向相反、幅值不一。这两个磁场合成后得出椭圆形旋转磁场，其磁密沿气隙仍按正弦规律分布，但幅值则是交变的：最小值为正、负序磁场幅值之差；最大值为二者之和。如果正序磁场的幅值已使电机磁路处于饱和状态，那么合成磁场的最大幅值就有可能使磁路过度饱和。当定子接成人形时，在气隙磁密分布波形中出现的三次谐波会造成附加定子铁芯损耗；接△成形时，在绕组中出现的三倍频率环流会造成附加定子电阻损耗。以上情况是采用不对称电压法进行试验时应当考虑的因素。

三、不对称电压法测定负载杂散损耗

(1) 基本原理和线路

前已指出，不对称三相电压作用下的异步电机与异步机法测量负载杂散损耗时的“辅助机—被试机”机组相比，前者的正序系统相当于后者的辅助机，前者的负序系统相当于后者的被试机。按这一理解，我们可以把异步机法中测量被试机在定子电流为 I_1 时的负载杂散损耗（对应于被试机试验电流 $I_2 = \sqrt{I_1^2 - I_0^2}$ 的问题转变成不对称电压下测量负序系统的负载杂散损耗 P_2^- （对应于负序定子电流 $I_1^- = \sqrt{I_1^2 - I_0^2}$ 的问题。

由 (1)、(4) 二式可得

$$P_J^+ \approx P_M^+ = P_1^+ - 3I_1^{+2} \sigma_n^2 R_1 P_t^+ \quad (10)$$

又由 (2)、(6) 二式可得

$$-P_j^- \approx P_M^- = P_i^- - 3(I_i^-)^2 r_i - P_{zg}^- \quad (11)$$

将 (10)、(11) 二式分别代入 (9) 式两边得

$$P_i^+ - 3(I_i^+)^2 r_i - P_{t1}^+ \approx P_j + P_{z0}^+ + P_{zk}^- + P_i^+ - 3(I_i^-)^2 r_i - P_{zg}^-$$

整理后得

$$P_{zk}^- - P_{zg}^- \approx P_i^+ - P_i^- + 3(I_i^-)^2 r_i - (P_{t1}^+ + P_{z0}^+ + P_j + 3(I_i^+)^2 r_i)$$

$$\text{或} \quad P_{zk}^- + P_{zg}^- \approx P_i^+ - P_i^- + 3(I_i^+)^2 r_i - P_0^+ \quad (12)$$

$$\text{式中} \quad P_0^+ = P_{t1}^+ + P_{z0}^+ + P_j + 3(I_i^+)^2 r_i \quad (13)$$

为在正序电压 U^+ 单独作用下测得的空载输入功率损耗。

在一般情况下，对于 J_2 、 J_{02} 和 J_3 、 J_{03} 系列异步电动机 $P_{zg} \approx 0.09 P_{zk}$ 。于是总的负载杂散损耗

$$P_z = P_{zk} + P_{zg} \approx 1.2(P_{zk} - P_{zg}) \quad (14)$$

类似地，对于负序系统可得

$$P_z^- \approx 1.2(P_{zk}^- - P_{zg}^-) = 1.2[P_i^+ - P_i^- + 3(I_i^-)^2 r_i - P_0^+] \quad (15)$$

注意上式与 [文 3] 中对异步机法导出的结果在形式上完全相似，这也就是不对称电压法的基础。

至此，进一步要解决的具体问题就是如何求出 (15) 式中的 I_i^- 和与之对应的 P_i^+ 、 P_i^- ，以及对应于 U_i^+ 的 P_0^+ 。利用 [文 4] 中的图 5，我们可以很简便地从三相不对称电流 I_A 、 I_B 、 I_C 的实测值中分析出 I_i^- ，从三相不对称电压 U_{AB} 、 U_{BC} 、 U_{CA} 的实测值中分析出正序线电压 U^+ ，并按 U^+ 进行对称电压下的空载试验以测定出 P_0^+ 。按 [文 4] 中的图 8 和公式 (27)、(29) 直接测标出正、负序输入功率之差

$$P_i^+ - P_i^- = \frac{1}{\sqrt{3}} (Q_{AA} - Q_{BB} + 2Q_{AB} - 2Q_{BA}) \quad (16)$$

式中

$$\begin{cases} Q_{AA} = U_{AC} I_A \sin(\widehat{U_{AC}, I_A}) \\ Q_{BB} = U_{BC} I_B \sin(\widehat{U_{BC}, I_B}) \\ Q_{AB} = U_{AC} I_B \sin(\widehat{U_{AC}, I_B}) \\ Q_{BA} = U_{BC} I_A \sin(\widehat{U_{BC}, I_A}) \end{cases} \quad (17)$$

分别为 U_{AC} 与 I_A 、 U_{BC} 与 I_B 、 U_{AC} 与 I_B 、 U_{BC} 与 I_A 所形成的无功功率。

综上所述，可拟出测量负载杂散损耗的不对称电压法基本线路如图3所示：图中采用了〔文4〕中介绍的瓦特表配接 90° 移相网络测量无功功率的方法。由于瓦特表 $W_{AA'}$ 与 $W_{AB'}$ 的

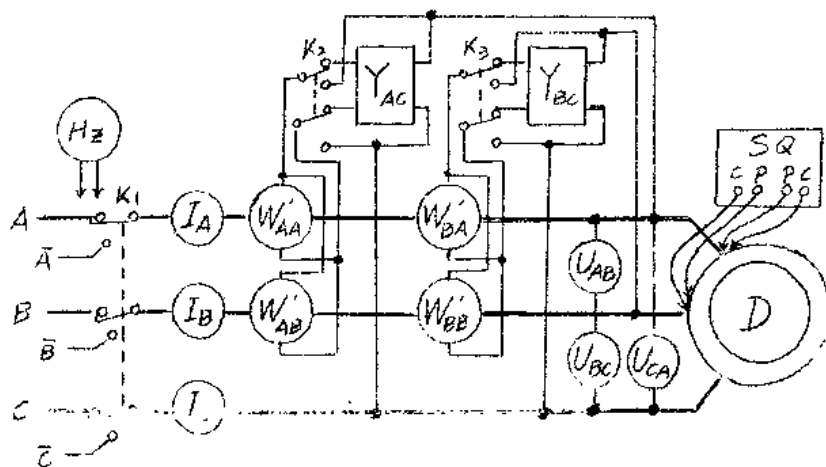


图3 不对称电压法测量负载杂散损耗的基本线路

电压线圈都与电压表 U_{CA} 并联，因此可合用一个 90° 移相网络 Y_{AC} 。同样因瓦特表 $W_{BA'}$ 与 $W_{BB'}$ 的电压线圈都与电压表 U_{BC} 并联，可合用一个 90° 移相网络 Y_{BC} 。注意每个移相网络的无

件参数应与所接二个瓦特表电压线圈的并联电阻值相匹配。

(2) 操作要点

① K_1 、 K_2 、 K_3 全部向上投，按被试电机由不对称三相电流 A 、 B 、 C 供电，并按瓦特表 W'_{AA} 、 W'_{AB} 、 W'_{BA} 、 W'_{BB} 与移相网络 Y_{AC} 、 Y_{BC} 配接，以便测取 $P^+ - P^-$ 。

② 调节三相定子电压不对称度，使三相电流与额定电流 I_{1e} 之间的关系为

$$\sqrt{\frac{1}{3}(I_A^2 + I_B^2 + I_C^2)} \approx 1.2 I_{1e}$$

为防止电机内出现较显著的三次谐波铁芯损耗或三倍频率环流损耗，三相电压 U_{AB} 、 U_{BC} 、 U_{CA} 的平均值宜控制在额定值 U_{1e} 的 0.8 倍左右。

③ 迅速读取 U_{AB} 、 U_{BC} 、 U_{CA} ； I_A 、 I_B 、 I_C 和 $Q_{AA}(=W'_{AA})$ 、 $Q_{AB}(=W'_{AB})$ 、 $Q_{BA}(=W'_{BA})$ 、 $Q_{BB}(=W'_{BB})$ 。

④ 为防止三相绕组电阻因不平衡三相电流引起发热不均匀而过于不一致，每次通电读表时间应尽量短，一读完表便立即断电停机，并用双臂电桥 SQ 迅速测取电流为最大和最小的两根线端之间的定子绕组电阻（这样得出的相电阻较接近于三相平均值）。

⑤ K_1 、 K_2 、 K_3 全部转投向下，按被试机改由对称三相电流 $\bar{A}$ 、 $\bar{B}$ 、 $\bar{C}$ 供电，并按瓦特表 W'_{AA} 、 W'_{BB} 的电压线圈直接接到电压 U_{AC} 和 U_{BC} 上，以便按普通二表法原理测量 P^+ 。

⑥ 从已测出的不对称电压 U_{AB} 、 U_{BC} 、 U_{CA} 中分选出正序分量 U^+ （按〔文4〕中国5）按此 U^+ 值施加三相对称电压，读取 I_{0A} 、 I_{0B} 、 I_{0C} 和 $W_{AA}(=W'_{AA})$ 、 $W_{BB}(=W'_{BB})$ 。于是对应于 U^+ 单独作用下的电流和功率为

$$I_0^- = \frac{1}{3} (I_{0A} + I_{0B} + I_{0C}) \quad (18)$$

$$P_0^+ = W_{AA} + W_{BB} \quad (19)$$

为免去查图表计标的麻烦，也可取三相电压的平均值作为 U_1^+ 的近似值（略偏大于准确值）。

$$U_1^+ \approx \frac{1}{3} (U_{AB} + U_{BC} + U_{CA}) \quad (20)$$

⑦ 再分别针对 $\sqrt{\frac{1}{3}(I_A^2 + I_B^2 + I_C^2)} \approx I_{1e}, 0.85I_{1e}, 0.7I_{1e}, 0.6I_{1e}, 0.5I_{1e}$ 重复上列步骤进行测试。随着电流的减小，允许三相电压的平均值逐步提高到 U_{1e} 。

⑧ 为消除各瓦特表电压线圈和电压表内部损耗对 $P_1^+ - P_1^-$ 和 P_0^+ 测量结果的影响，可拆去被试机，并在同样的不对称电压 U_{AB}, U_{BC}, U_{CA} 下读取四个瓦特表的余数 $\Delta Q_{AA}, \Delta Q_{AB}, \Delta Q_{BA}, \Delta Q_{BB}$ （以便从原来测出的 $Q_{AA}, Q_{AB}, Q_{BA}, Q_{BB}$ 中分别减去这此余数），以及在同样的 U_1^+ 下读取二瓦特表的余数 $\Delta W_{AA}, \Delta W_{BA}$ （以便从已测得的 W_{AA}, W_{BB} 中分别减掉这二个余数）。注意这时瓦特表电压、电流线圈的量程应与原来的一致。

(2) 试验数据的处理

为了求出公式 (15) 中至此尚属未知的负序电流 I_1^- ，严格来说，应从每次不对称电压下试验所得不对称电流 I_A, I_B, I_C 中，按〔文4〕图5分介出 I_1^- 。但须注意，这时 I_A, I_B, I_C 的实际相序多半与 U_{AB}, U_{BC}, U_{CA} 相反，致使电流中负序分量 I_1^- 较大，而正序分量 I_1^+ 较小。此 I_1^+ 很接近于在 U_1^+ 单独作用下测得的 I_0^+ 。因此，在应用〔文4〕图5对 I_A, I_B, I_C 进行对称分量分介时，应从所得两个分量中取最接近于 I_0^+ 。

~ 12 ~

者作为 I_1^+ ，而另一个才是 I_1^- 。

由于 $I_1^+ \approx I_0^+$ ，故由〔文4〕(15)式有

$$\frac{1}{3}(I_A^2 + I_B^2 + I_C^2) = (I_1^+)^2 + (I_1^-)^2 \approx (I_0^+)^2 + (I_1^-)^2$$

因此也可利用这个关系式直接求出

$$I_1^- \approx \sqrt{\frac{1}{3}(I_A^2 + I_B^2 + I_C^2) - (I_0^+)^2} \quad (21)$$

从而又免去一次查图表的麻烦。

其后的试验数据处理方法与异步机法相同，只是须以负序电流 I_1^- 作为被试机试验电流，绘制出 P_2^- 与 I_1^- 的关系曲线。再将 $I_1^- = \sqrt{I_{1e}^2 - I_0^2}$ (I_0 ——额定对称电压下的空载电流)，从这条曲线上查出对应的 P_2^- 值，即得被试异步电动机在额定负载运行时的杂散损耗 P_{ze} 。

〔例1〕一台 JO_2-31-4 型 2.2 瓩异步电动机，用不对称电压法测定负载杂散损耗的试验原始记录数据和计算结果如表 1 所列。 P_2^- 与 I_1^- 的关系曲线如图 4 所示。在同一图中还画出了这台电机用异步机法测得的曲线。

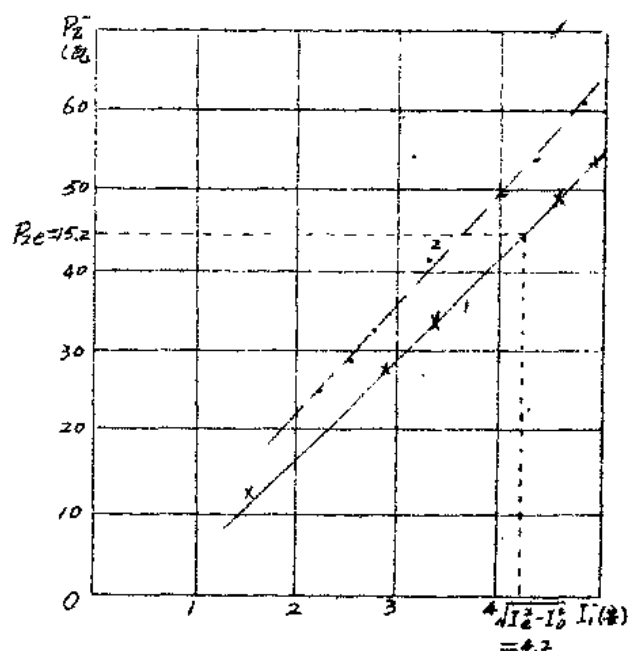


图 4 在一台 JO_2-31-4 2.2 瓩电机上用不对称电压法测得的负载杂散损耗 (曲线 1) 与异步机法结果 (曲线 2) 的比较

表1、对称电压法测负负载效率数据汇总表

额定输出功率 $P_{Te} = 2.2$ 瓦		额定电压 $U_e = 380$ 伏 (A 接法)				额定电流 $I_e = 4.61$ 安			
NO		1	2	3	4	5	6	7	
*	U_{AB} (伏)	336.0	335.7	340.8	349.5	345.3	346.8	342.0	
*	U_{BC} (伏)	320.7	321.3	324.3	335.4	331.8	336.3	330.9	
*	U_{CA} (伏)	411.3	407.4	404.4	402.0	390.0	375.6	363.0	
*	I_A (安)	6.92	6.50	6.03	5.48	4.91	3.96	3.50	
*	I_B (安)	2.84	2.56	2.22	1.69	1.396	1.088	1.145	
*	I_C (安)	5.62	5.18	4.75	4.15	3.64	2.90	2.505	
*	$Q_{AA} = U_{AC} I_A \sin \varphi_{AA}$ (瓦)	2721	2518	2295	2053	1775	1336	1127	
*	$Q_{BB} = U_{BC} I_B \sin \varphi_{BB}$ (瓦)	866	762	636	417	286	65	168	
*	$Q_{AB} = U_{AC} I_B \sin \varphi_{AB}$ (瓦)	-1928	-1722	-1654	-1340	-1090	-639	-502	
*	$Q_{BA} = U_{BC} I_A \sin \varphi_{BA}$ (瓦)	1510	1305	1040	830	642	266	46	
$P_T = \frac{1}{\sqrt{3}} (Q_{AA} Q_{BB} + 2Q_{AB} - 2Q_{BA})$ (瓦)		872	792	737.0	773.2	789.9	711.3	737.1	
*	$Y_T (= Y_A + Y_B)$ (欧)	5.11	5.17	5.21	5.12	5.09	5.07	5.05	
$U_T \approx \sqrt{3} (U_{AB} + U_{BC} + U_{CA})$ (伏)		356.0	354.8	356.5	362.3	355.7	352.9	345.3	
*	I_{0A} (安)	2.20	2.16	2.23	2.29	2.19	2.17	2.05	
*	I_{0B} (安)	2.16	2.11	2.16	2.20	2.15	2.10	2.04	
*	I_{0C} (安)	2.12	2.09	2.12	2.17	2.11	2.06	2.00	
$I_0 = \frac{1}{\sqrt{3}} (I_{0A} + I_{0B} + I_{0C})$ (安)		2.16	2.12	2.17	2.22	2.15	2.11	2.03	
*	W_{AA} (瓦)	574	569	575	604	573	540	538	
*	W_{BB} (瓦)	-344	-340	-345	-370	-343	-313	-324	
$P_0^+ = W_{AA} + W_{BB}$ (瓦)		230	229	230	234	230	227	214	
$I_T \approx \sqrt{3} (\sqrt{I_A^2 + I_B^2 + I_C^2}) - (I_0)^2$ (安)		4.95	4.55	4.05	3.42	2.89	1.96	1.51	
$P_T = \frac{3}{2} (I_T)^2 Y_T$ (瓦)		188.5	161.0	128.5	90.0	63.8	29.2	17.4	
$P_{K+P_{Tg}} = P_T^+ - P_T^- + P_T - P_0^+$ (瓦)		45.7	41.2	35.5	29.2	23.7	13.5	10.5	
$P_T = 1.2 (P_{K+P_{Tg}})$ (瓦)		54.9	49.4	42.6	35.0	28.4	16.2	12.6	

在额定对称电压下的空载电流 $I_0 = 2.55$ 安。

在 $P_T - I_T$ 曲线 (图4) 上找 $I_T' = \sqrt{I_{Te}^2 - I_0^2} = \sqrt{4.61^2 - 2.55^2} = 4.2$ 安, 查得额定负载

效率损耗 $P_{Te} = 45.2$ 瓦。

注: 1) 表中打有“*”号的各行均为实验中直接测出的原始数据。

2) Q_{AA} 、 Q_{BB} 、 Q_{AB} 和 W_{AA} 、 W_{BB} 中已分别扣除各表电压线圈内阻损耗或其余数 ΔQ_{AA} 、 ΔQ_{BB} 、 ΔQ_{AB} 和 ΔW_{AA} 、 ΔW_{BB} 。

(3) 测量结果准确性分析

不对称电压法同异步机法一样，也属于反转法类型，所以由于异步机在反转时气隙谐波磁场与正常运行时的差异而引起的理论误差依然存在。但是，同一般反转法和异步机法相比，不对称电压法在提高负载杂散损耗的测量精度方面有以下改进：

① 由于正序磁场的存在，被试机内主磁路的饱和情况与实际运行时很接近，从而基本上避免了采用其他反转法时高频杂散损耗 P_{zk} 因主磁路饱和程度大大减弱、同样幅值的谐波磁势建立的谐波磁通更多而偏大的问题。图4上所示不对称电压法测得的 P_2 值比异步机法偏小将近20%，即说明了这一点。

② 由于不采用辅助机，只有被试机单独空转，也就使 $P_1^+ - P_1^-$ 和 P_0^+ 因都不包含辅助机的机械损耗而比其他反转法中相应的功率测量值小得多。这样，由于两个相接近的大数 $P_1^+ - P_1^- - 3(I_1^-)^2 r_1$ 与 P_0^+ 相减引起测量误差的情况，就比其他反转法有所改善。这种误差，在用异步机法对机械损耗较大的二极电机进行试验时，是比较明显的。

但是，不对称电压法也有自己的弱点。在按(16)式计算

$$P_1^+ - P_1^- = \frac{1}{\sqrt{3}} (Q_{AA} - Q_{BB} + 2Q_{AB} - 2Q_{BA})$$

时，又出现了 Q_{AA} 、 Q_{BB} 、 Q_{AB} 、 Q_{BA} 这四个大数间的加减运算。因此，在实验中这四个量必须特别注意同时精确测量。

四、不对称电压法测定绕组温升

(1) 试验中的掌握条件

为确定试验中的掌握条件，需寻求一种不对称电压下的运行状态，使电机内各部分的损耗分布情况与实际额定负载运行时完全一致或基本一致，以实现电机绕组发热的等效模拟。表2列出经过分析论证所得不对称电压法温升试验时各发热部位

损耗等值模拟要求及相应的条件式。

由表可见，不同发热部位损耗等值模拟所要求的条件并不完全一致。抓住主要关键，适当兼顾其余因素，可归纳出下述三项掌握条件：

① 定子绕组与转子绕组的电阻损耗等值模拟条件不一定恰能同时满足。但因定子绕组温升必须考核，定子电阻损耗直接影响定子绕组温升，所以应首先满足这项损耗的等值模拟条件，即：

$$I_A^2 + I_e^2 + I_c^2 = 3 I_{1e}^2 \quad (22)$$

对绕组式电动机，即使转子电流 I_2 与 I_{2e} 有些出入，转子绕组满载温升 θ_{2e} 可由试验中测得的温升 θ_{2z} 从下式推出（按国家标准 GB 1032-68）

$$\theta_{2e} = \begin{cases} \theta_{2z} \left(\frac{I_{2e}}{I_2} \right)^2 & (I_2 \text{ 与 } I_{2e} \text{ 相差小于 } \pm 5\% \text{ 时}) \\ \theta_{2z} \left(\frac{I_{2e}}{I_2} \right)^2 \left[1 + \frac{\left(\frac{I_{2e}}{I_2} \right)^2 - 1}{K + t_t + \theta_{2z}} \theta_{2z} \right] & (I_2 \text{ 与 } I_{2e} \text{ 相差小于 } \pm 20\% \text{ 时}) \end{cases} \quad (23)$$

式中： t_r 为温升试验最后一小时的平均室温（℃）；

$K = 235$ （对铜导线）。

② 定子（基波）铁芯损耗、人形接法时定子三次谐波铁芯损耗或△形接法时定子三倍频率环流损耗，以及转子损耗等值模拟所要求的条件互有出入，但都要求三相电压平方和在 $3 U_{1e}^2$ 以下，一般可按

$$U_{AB}^2 + U_{BC}^2 + U_{CA}^2 \approx (2.0 \sim 2.5) U_{1e}^2 \quad (24)$$

来掌握。