ICS 29.160.01
K 21

中华人民共和国国家标准

GB/T 1029—2005
代替 GB/T 1029—1993

三相同步电机试验方法

Test procedures for three-phase synchronous machines

2005-08-26 发布　　2006-04-01 实施

中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局
中国国家标准化管理委员会　发布

060619000001

目　次

前言 …… V
1　范围 …… 1
2　规范性引用文件 …… 1
3　试验准备 …… 1
4　一般性试验项目 …… 1
4.1　绝缘电阻的测定 …… 1
4.2　绕组在实际冷状态下直流电阻的测定 …… 2
4.3　轴电压测定 …… 4
4.4　空载特性的测定 …… 4
4.5　稳态短路特性的测定 …… 5
4.6　励磁机试验 …… 6
4.7　超速试验 …… 6
4.8　隐极式发电机转子匝间短路试验 …… 6
4.9　振动的测定 …… 6
4.10　密封状态检查和漏氢测定 …… 6
4.11　匝间冲击耐电压试验 …… 6
4.12　短时升高电压试验 …… 6
4.13　工频耐电压试验 …… 6
4.14　电枢绕组绝缘直流泄漏电流试验及直流耐压试验 …… 8
4.15　电压波形正弦性畸变率的测定 …… 9
4.16　噪声的测定 …… 9
4.17　电话谐波因数的测定 …… 9
5　效率测定 …… 10
5.1　效率的直接测定法 …… 10
5.2　效率的间接测定法 …… 11
5.3　量热法 …… 12
5.4　对应于额定负载时各种损耗的测定 …… 12
5.5　自减速试验 …… 15
5.6　其他负载时效率的求取 …… 16
6　温升试验 …… 16
6.1　温度测量方法 …… 16
6.2　温升试验时冷却介质温度的测定 …… 16
6.3　温升试验时电机各部分温度的测定 …… 17
6.4　电机各部分在切离电源后所测得的温度修正 …… 17
6.5　短路保温制动法 …… 17
6.6　温升试验方法 …… 18
7　自励恒压时电压调整性能测定 …… 21
7.1　稳态电压调整率的测定 …… 21

7.2 发电机在不对称负载工作时电压偏差程度的测定 …… 21
7.3 瞬态电压变化率的测定 …… 21
8 转矩和转动惯量的测定 …… 22
8.1 堵转电流和堵转转矩测定 …… 22
8.2 标称牵入转矩的测定 …… 23
8.3 同步电动机失步转矩的测定 …… 25
8.4 电动机的短时过转矩试验 …… 26
8.5 转动惯量的测定 …… 26
9 过电流和机械强度试验 …… 26
9.1 偶然过电流试验 …… 26
9.2 过载试验 …… 26
9.3 短路机械强度试验 …… 26
10 负序电流承受能力试验 …… 27
11 定子绕组端部动态特性测定 …… 27
12 参数测定(本章等同采用 IEC 60034-4) …… 27
12.1 说明 …… 27
12.2 用空载饱和特性与三相稳态短路特性确定参数 …… 28
12.3 零功率因数过励试验 …… 28
12.4 零功率因数过励时,对应额定电压和额定电枢电流时的励磁电流的确定 …… 28
12.5 用空载特性、三相稳态短路特性和零功率因数(过励)时对应额定电压和额定电枢电流的励磁电流确定保梯电抗 …… 29
12.6 用保梯图确定额定励磁电流 …… 29
12.7 用 ASA 图确定额定励磁电流 …… 30
12.8 用瑞典图确定额定励磁电流 …… 31
12.9 反励磁试验 …… 31
12.10 用反励磁试验确定 X_q …… 31
12.11 低转差率试验 …… 32
12.12 用低转差率试验确定 X_q …… 33
12.13 用负载试验测定功角 δ …… 33
12.14 用负载试验测定功角法确定 X_q …… 33
12.15 三相突然短路试验 …… 34
12.16 由三相突然短路试验确定参数 …… 36
12.17 电压恢复试验 …… 36
12.18 用电压恢复试验确定参数 …… 37
12.19 转子相对电枢绕组磁场处于直轴和交轴位置时的外施电压试验 …… 37
12.20 用转子相对电枢绕组磁场直轴和交轴位置时的外施电压试验测定参数 …… 37
12.21 当转子处于任意位置时的外施电压试验 …… 38
12.22 用转子处于任意位置时的外施电压试验确定参数 …… 38
12.23 两相稳态短路试验 …… 38
12.24 用两相稳态短路试验确定参数 …… 39
12.25 逆相序试验 …… 39
12.26 用逆相序试验确定参数 …… 39
12.27 三相绕组外施单相电压试验 …… 39

12.28 用三相绕组外施单相电压试验确定参数 …… 40
12.29 两相对中性点稳态短路试验 …… 40
12.30 用两相对中性点稳态短路试验确定参数 …… 40
12.31 电枢绕组开路时的励磁电流衰减试验 …… 41
12.32 用电枢绕组开路时的励磁电流衰减试验确定 T'_{do} …… 41
12.33 电枢绕组短路时的励磁电流衰减试验 …… 41
12.34 用电枢绕组短路时的励磁电流衰减试验确定 T'_{d} …… 41
12.35 悬挂转子扭摆试验 …… 41
12.36 用悬挂转子扭摆试验确定 T_j 和 H …… 41
12.37 辅助摆摆动试验 …… 42
12.38 用辅助摆摆动试验确定 T_j 和 H …… 42
12.39 空载自减速试验 …… 42
12.40 用空载自减速试验确定 T_j 和 H …… 42
12.41 机械联结机组的有载自减速试验，而同步电机作电动机运行 …… 43
12.42 用同步电机作电动机运行的有载自减速试验确定 T_j 和 H …… 43
12.43 电机作发电机运行时的甩负载加速试验 …… 43
12.44 用电机作发电机运行时的甩负载加速试验确定 T_j 和 H …… 43
12.45 额定电压调整率 ΔU_N …… 43
12.46 用已知试验参数通过计算确定参数 …… 43
附录 A（规范性附录） 空载短路法求取励磁绕组温升时的 $\Delta\theta$ 值 …… 46
附录 B（资料性附录） 物理量的符号及单位 …… 47

前　言

本标准规范了三相同步电机产品的各项试验方法，是三相同步电机产品各项试验的依据。

本标准前一版本 GB/T 1029—1993《同步电机试验方法》参照采用了 IEC 60034-2：1972、IEC 60034-4：1985、IEEE 115：1983、ГОСТ 10169：1977 和 ГОСТ 11828：1986 等国际国外标准。

本标准是 GB/T 1029—1993《同步电机试验方法》的修订版本。在原版标准的基础上，主要作了如下修订：

1. 考虑到我国的实际国情，第 12 章参数的测定修改采用了国际电工委员会 IEC 60034-4：1985《同步电机参数试验方法》，IEC 60034-4 的附录 A 为未经最后审定的试验方法，由于该附录内容实际应用尚不成熟，故本标准中删除了此附录。

2. 增加了前言；

增加了负序能力试验；

增加了定子绕组端部动态特性测定；

增加了瞬态电压变化率的测定等内容。

3. 删除了全电流法和叠加法的相关内容；

删除了对两台相似或匹配的电机可采用规定的同步反馈法；

删除了短路电流试验等内容。

4. 将励磁电流和电压调整率的测定、转动惯量的测定调整到参数的测定中。

5. 对原标准 GB/T 1029—1993 中有误之处进行更正。主要更正如下：

① 原标准 6.6.3.4 中："$(I_{fN}^2 R_{f73}, 75\theta_c)$"改为"$(I_{fN}^2 R_{f75}, 75-\theta_c)$"；

② 原标准公式(52)中：第二个"="改为"·"；

③ 原标准公式(60)中："$t_{pin}=\left(\frac{U_N-U'}{U-U'}\right)\cdot\frac{P+P_{fws}}{(1-s)P_N}$"改为"$t_{pin}=\left(\frac{U_N-U'}{U-U'}\right)^2\cdot\frac{P+P_{fws}}{(1-s)P_N}$"；

④ 若干打印字符错误(上、下角标等)。

6. 删除了原标准的附录 A、附录 B、附录 C。

本标准自实施之日起，代替 GB/T 1029—1993。

本标准的附录 A 是规范性附录，附录 B 是资料性附录。

本标准由中国机械工业联合会提出。

本标准由全国旋转电机标委会发电机分技术委员会归口。

本标准由哈尔滨大电机研究所负责起草，东方电机股份有限公司、上海汽轮发电机有限公司、华北电科院、华中科技大学、发电设备国家工程研究中心、哈尔滨工业大学、上海电器科学研究所等单位参加起草。

本标准主要起草人：富立新、苟智德、朱昌谦、沈蓉洲、白亚民、宁玉泉、赵一军、孙力、康尔良、倪立新。

本标准所代替标准的历次版本情况为：

GB 1029—1967(首次发布)、GB 1029—1980(第一次修订)、GB/T 1029—1993(第二次修订)。本次修订为第三次修订。

三相同步电机试验方法

1 范围

本标准规定了三相同步电机的试验方法。

本标准适用于额定功率为 1 kW(kVA)及以上的同步电动机、发电机和同步调相机。不适用于无直流励磁绕组的同步电机，静止变频电源供电的同步电动机试验可参照使用。

2 规范性引用文件

下列文件中的条款通过本标准的引用而成为本标准的条款。凡是注日期的引用文件，其随后所有的修改单(不包括勘误的内容)或修订版均不适用于本标准，然而，鼓励根据本标准达成协议的各方研究是否可使用这些文件的最新版本。凡是不注日期的引用文件，其最新版本适用于本标准。

GB 755—2000 旋转电机 定额和性能(idt IEC 60034-1:1996)

GB/T 5321 用量热法测定大型交流电机的损耗及效率(GB/T 5321—1985,neq IEC 60034-2A:1974)

GB/T 7409.3 同步电机励磁系统大、中型同步发电机励磁系统技术要求

GB 10068 轴中心高为 56 mm 及以上电机的机械振动 振动的测量、评定及限值(GB 10068—2000,idt IEC 60034-14:1996)

GB/T 10069.1 旋转电机噪声测定方法及限值 噪声工程测定方法

GB/T 10069.2 旋转电机噪声测定方法及限值 噪声简易测定方法

GB/T 10585 中小型同步电机励磁系统基本技术要求

GB/T 15548 往复式内燃机驱动的三相同步发电机通用技术条件

JB/T 6227 氢冷电机密封性检验方法及评定

JB/T 7836.1 电机用电加热器 通用技术条件

JB/T 8445 三相同步发电机负序电流承受能力试验方法

JB/T 8446 隐极式同步发电机转子匝间短路测量方法

JB/T 8990 透平型发电机定子绕组端部动态特性和振动试验方法及评定

JB/T 9615.1 交流低压电机散嵌绕组匝间绝缘试验方法

JB/T 9615.2 交流低压电机散嵌绕组匝间绝缘试验限值

JB/T 10098 交流电机定子成型线圈耐冲击电压水平(JB/T 10098—2000,idt IEC 60034-15:1995)

JB/T 10500.1 电机用埋置式热电阻 第 1 部分:一般规定、测量方法和检验规则

IEC 60034-2 旋转电机 第 2 部分 损耗和效率的试验方法

IEC 60034-4 旋转电机 第 4 部分 参数试验方法

3 试验准备

试验时，采用的电气测量仪器、仪表的准确度应不低于 0.5 级(兆欧表除外)，测量三相功率时允许采用准确度为 1.0 级的三相瓦特表。测量温度时，允许采用误差为±1℃的温度计。

试验前被试电机应处于正常状态，接线正确，设备及导线应符合试验要求。

4 一般性试验项目

4.1 绝缘电阻的测定

4.1.1 绕组对机壳及绕组相互间绝缘电阻的测定

4.1.1.1 测量时电机的状态

测量电机绕组的绝缘电阻时应分别在电机实际冷状态和热状态(或温升试验后)下进行。

检查试验时,如无其他规定,则绕组对机壳及绕组相互间的绝缘电阻仅在冷状态下测量。

测量绝缘电阻时应测量绕组温度,但在实际冷状态下测量时可取周围介质温度作为绕组温度。

4.1.1.2 兆欧表的选用

测量绕组对机壳及绕组相互间的绝缘电阻时应根据被测绕组的额定电压按表1选择兆欧表。

表1

被测绕组额定电压 U_N/V	兆欧表规格/V
$U_N<1\ 000$	500
$1\ 000\leqslant U_N\leqslant 2\ 500$	500～1 000
$2\ 500<U_N\leqslant 5\ 000$	1 000～2 500
$5\ 000<U_N\leqslant 12\ 000$	2 500～5 000
$U_N>12\ 000$	5 000～10 000

4.1.1.3 测量方法

测量绕组绝缘电阻时,如果各绕组的始末端单独引出,则应分别测量各绕组对机壳及绕组相互间的绝缘电阻,这时,不参加试验的其他绕组和埋置检温元件等均应与铁心或机壳作电气连接,机壳应接地。当中性点连在一起而不易分开时,则测量所有连在一起的绕组对机壳的绝缘电阻。

绝缘电阻测量结束后,每个回路应对接地的机壳作电气连接使其放电。

测量水内冷绕组的绝缘电阻时,应使用专用的绝缘电阻测量仪,在绝缘引水管干燥或吹干的情况下,可用普通兆欧表测量。

不能承受兆欧表高压冲击的电器元件(如半导体整流器,半导体管及电容器等)应在测量前将其从电路中拆除或短接。

测量时,在指针达到稳定后再读取数据,并记录绕组的温度。

若测量吸收比,则吸收比 R_{60}/R_{15} 应测得 15 s 和 60 s 时的绝缘电阻值。

若测量极化指数,则极化指数 R_{10}/R_1 应测得 1 min 和 10 min 时的绝缘电阻值。

4.1.2 其他绝缘电阻的测定

4.1.2.1 轴承绝缘电阻的测定

轴承绝缘电阻的测定用不高于 1 000 V 的兆欧表测量。

4.1.2.2 埋置检温计绝缘电阻的测定

埋置检温计的绝缘电阻测定按 JB/T 10500.1 规定的方法进行。

4.1.2.3 加热器绝缘电阻的测定

加热器绝缘电阻的测定按 JB/T 7836.1 规定的方法进行。

4.2 绕组在实际冷状态下直流电阻的测定

4.2.1 实际冷状态下绕组温度的测定

将电机在室内放置一段时间,用温度计(或埋置检温计)测量电机绕组、铁心和环境温度,所测温度与冷却介质温度之差应不超过 2 K,对大中型电机,温度计应有与外界隔热的措施,且放置温度计的时间应不少于 15 min。

测量电枢绕组和辅助绕组(如自励恒压发电机谐波绕组等)温度时应根据电机的大小,在不同部位测量绕组端部和绕组槽部的温度(如有困难时可测量铁心齿和铁心轭部表面温度),取平均值作为绕组的实际冷状态下温度。

测量凸极式电机的励磁绕组温度时,可在绕组表面若干处直接测量温度,取其平均值作为绕组的实

际冷状态下温度。

测量隐极式电机的励磁绕组温度时，应测量绕组表面的温度，有困难时可用转子表面温度代替，对大中型电机，测点应不少于三点，取其平均值作为绕组的实际冷状态下温度。

测量自励恒压发电机的励磁装置绕组（如变压器、电抗器绕组等）温度时，应用温度计测量铁心或绕组的表面温度作为绕组的实际冷状态下温度。

对于液体直接冷却的绕组在通液体的情况下，可在绕组进、出口处液体的温度之差不超过 1 K，铁心温度与环境温度相差不超过 2 K 时，取绕组进出口液体温度的平均值作为绕组的实际冷状态下温度。

4.2.2 绕组直流电阻的测定

绕组的直流电阻可用电桥法、微欧计法、电压表电流表法或者其他测量方法测量。

4.2.2.1 当使用自动检测装置、数字式微欧计等仪器测量绕组的直流电阻时，通过被测绕组的试验电流应不超过其额定电流的 10%，通电时间不超过 1 min。

4.2.2.2 使用电桥测量时，每一电阻应测量三次，每次应在电桥平衡破坏后重新进行测量，每次读数与三次读取数据的平均值之差应在平均值的±0.5%范围内，取其平均值作为电阻的实际测量值。如绕组的直流电阻在 1 Ω 以下时，应采用有效数不低于 4 位的双臂电桥测量。

4.2.2.3 使用电压表电流表法测量时，接线原理如图 1。图中 R_b 为可调限流电阻，R 为被试电机绕组，V 为电压表，A 为电流表。图 1(a)的接线适用于测量电压表内阻与被测电阻之比大于 200 时绕组的电阻，图 1(b)的接线适用于测量电压表内阻与被测电阻之比小于 200 时绕组的电阻。

试验时，所加电流不应超过绕组额定电流的 10%，通电时间不超过 1 min，测量时应同时读取电流及电压值，每一电阻至少应在三种不同电流值下进行测量，每个测量值与平均值相差应在±0.5%范围之内，取其平均值作为电阻的实际测量值。

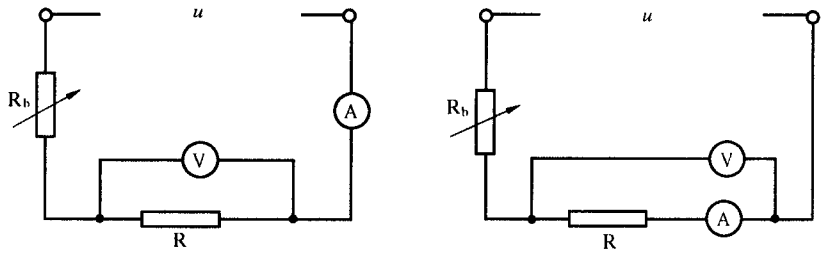


图 1

4.2.2.4 测量电枢绕组时，电机的转子静止不动。绕组的各相各支路的始末端均引出时，应分别测量各相各支路的直流电阻。

如果各相绕组在电机内部连接，那末就应在每个出线端间测量电阻，各相电阻值按下式计算：

对星形接法的绕组，如图 2(a)

$$R_u = R_{med} - R_{vw} \quad \cdots\cdots(1)$$

$$R_v = R_{med} - R_{wu} \quad \cdots\cdots(2)$$

$$R_w = R_{med} - R_{uv} \quad \cdots\cdots(3)$$

对三角形接法的绕组，如图 2(b)

$$R_u = \frac{R_{vw} \cdot R_{wu}}{R_{med} - R_{uv}} + R_{uv} - R_{med} \quad \cdots\cdots(4)$$

$$R_v = \frac{R_{wu} \cdot R_{uv}}{R_{med} - R_{vw}} + R_{vw} - R_{med} \quad \cdots\cdots(5)$$

$$R_w = \frac{R_{uv} \cdot R_{vw}}{R_{med} - R_{wu}} + R_{wu} - R_{med} \quad \cdots\cdots(6)$$

式中：$R_{med}=(R_{uv}+R_{vw}+R_{wu})/2$，$R_{uv}$、$R_{vw}$和$R_{wu}$分别为出线端 u 与 v、v 与 w 和 w 与 u 之间测得的电阻值(Ω)；

R_u、R_v 和 R_w 分别为各相的相电阻(Ω)。

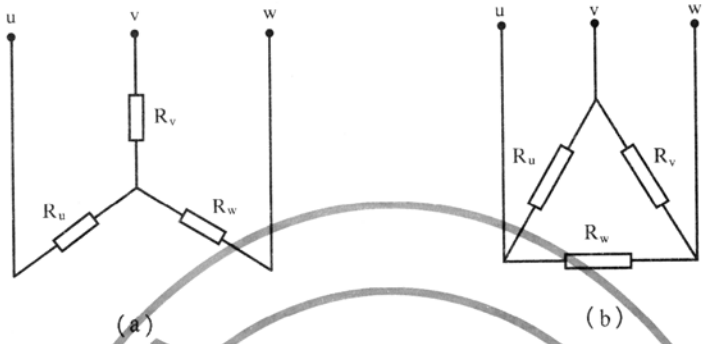


图 2

4.2.2.5 励磁绕组的直流电阻应在绕组引至集电环的接线端或集电环表面测量，自励恒压发电机励磁装置绕组的直流电阻应在绕组的出线端上单独进行测量。

4.3 轴电压测定

被试电机应在额定电压、额定转速下空载运行。典型的测量示意图见图 3，用高内阻交流电压表先测定轴电压 U_1，然后将转轴没有绝缘的一端与其轴承座短接(双侧绝缘的转轴短接任意一侧)，测另一端对轴承座的电压 U_2(即油膜电压)，再测该轴承座对地的电压 U_3。测点表面与电压表引线应接触良好。试验前应分别检查轴承座与金属垫片、金属垫片与金属底座之间的绝缘电阻。

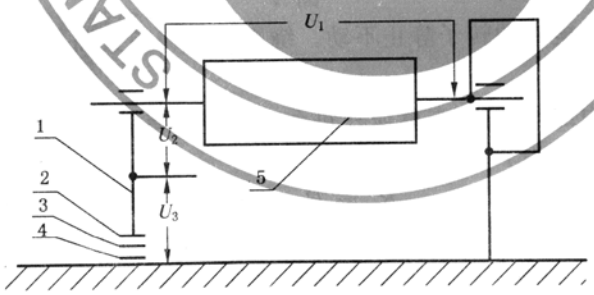
4.4 空载特性的测定

4.4.1 发电机法

试验时将被试电机拖动到额定转速，电枢绕组开路，在他励方式下进行。

调节励磁电流，如无其他规定，应使空载电枢电压达到额定值的 1.3 倍或额定励磁电流所对应的电压值作为空载特性的起始点。然后单方向逐步减小励磁电流到零，一般应量取 7～9 点(在额定电压值附近多测几点)，每点应读取三线电压，励磁电流、频率(或转速)。最后读取励磁电流为零时的剩磁电压。

如果三线电压对称，则除了在额定电压时读取三线电压外，其他各点可仅读取任一线电压值。



1——轴承座；

2——绝缘垫片；

3——金属垫片；

4——绝缘垫片；

5——转子。

图 3

试验时频率 f 与额定频率 f_N 有差异时，电枢空载电压按下式进行折算：

$$U_0 = \frac{f_N}{f}U \qquad \cdots\cdots(7)$$

式中：

U——试验时测得的空载电压(三相平均值)，V；

U_0——折算到额定频率时的空载电压，V。

关系曲线 $U_0 = f(I_f)$ 即为所求的空载特性曲线。若空载特性试验中剩磁电压较高，则应对空载特性曲线进行修正。修正方法为将特性曲线的直线部分延长与横轴相交，交点的横坐标绝对值 ΔI_f 为修正值，然后在所有试验测得的励磁电流数据上加上此值(ΔI_f)，即可得到被修正的曲线。空载特性曲线的直线部分及其延长线通常称为气隙线，见图 4。

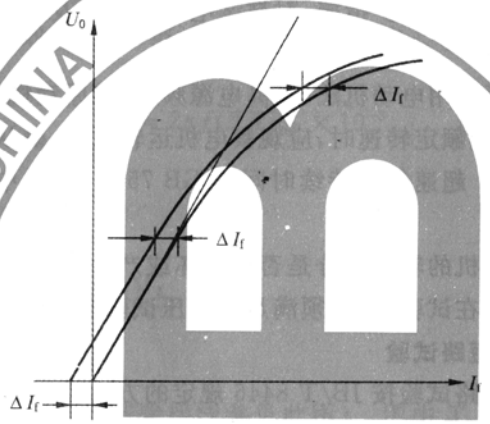


图 4

4.4.2 电动机法

被试电机接到额定频率、电压可调、实际对称的稳定电源上，使电机在他励方式下作空载运行。

调节电源电压，并相应调节被试电机的励磁电流，使电枢电流最小(此时电机的功率因数为 1.0，按二瓦计接法的两只功率表读数相等，方向相同)，这时对应的励磁电流即为该电压下的励磁电流。

如无其他规定，试验应从电枢额定电压的 1.3 倍开始，调节端电压及励磁电流，直至电机不致于失步的最低电压时为止，在整个过程中读取 7～9 点，每点应读取外施电压、励磁电流和频率(或转速)。

如果三线电压对称，则除在额定电压时读取三线电压外，其他各点可仅读一线电压。

若试验时的频率与额定频率有差异，则空载电枢电压按公式(7)进行修正。

4.4.3 对于 1 000 kVA 以下的同步电机，在检查试验中可尽量取额定电压时的励磁电流。

4.5 稳态短路特性的测定

4.5.1 测定三相稳态短路特性时应用低阻抗导体在尽可能接近电枢绕组出线端处将线端可靠短接。试验时，电机应在他励方式下运行。

4.5.2 发电机法

试验时将被试电机拖动到额定转速，调节励磁电流，使电枢电流在 1.2 倍额定电流左右，同时读取电枢电流和励磁电流。逐步减小励磁电流，使励磁电流降低至零为止，共读取 5～7 点，然后绘制短路特性曲线 $I_K = f(I_f)$。如果三相电流对称，则除了在额定电流时读取三线电流外，其他各点可仅读取一线电流。

4.5.3 电动机法(自减速法)

被试电机作空载电动机运行，切断电源后立即减少励磁电流到零并切断励磁电源，然后用事先准备好的开关将电枢绕组三相同时短接。

接通励磁电源，调节励磁电流使电枢电流为1.2倍额定值左右，同时读取电枢电流及励磁电流。逐步减小励磁电流，在仪器仪表精度允许的范围内读取5～7点，若在一次自减速中所读取的试验数据不够时，可重复上述操作直至取得足够的试验数据。然后绘制短路特性曲线 $I_K=f(I_f)$。

4.5.4 对于1 000 kVA以下的同步电机，在检查试验时可仅读取额定电枢电流时的励磁电流。

4.6 励磁机试验

励磁机试验按GB/T 7409.3、GB/T 10585和该类型电机规定的方法进行。

4.7 超速试验

如无其他规定，超速试验允许在冷态下进行。

超速试验前应仔细检查电机的装配质量，特别是转动部分的装配质量，防止转速升高时有杂物或零件飞出。

超速试验时应采取相应的安全防护措施，对被试电机的控制及对振动、转速和轴承温度等参数的测量应采用远距离测量方法。

超速试验可根据具体情况选用电动机法(提高电源频率)或原动机拖动法。

在升速过程中，当电机达到额定转速时，应观察电机运转情况，确认无异常现象后，再以适当的加速度提高转速，直至规定的转速。超速值及持续时间按GB 755—2000中8.5或该类型电机标准规定的方法进行。

超速试验后应仔细检查电机的转动部分是否有损坏或产生有害的变形，紧固件是否松动以及其他不允许的现象出现。转子绕组在试验后，必须满足耐电压试验的要求。

4.8 隐极式发电机转子匝间短路试验

隐极式发电机转子匝间短路试验按JB/T 8446规定的方法进行。

4.9 振动的测定

振动的测定按GB 10068规定的方法进行。

4.10 密封状态检查和漏氢测定

试验方法按JB/T 6227规定的方法进行。

4.11 匝间冲击耐电压试验

匝间冲击耐电压试验按JB/T 10098和JB/T 9615.1、JB/T 9615.2规定的方法进行。

4.12 短时升高电压试验

试验应在电机空载时进行，除下列规定外，试验的外施电压(电动机)或感应电压(发电机)为额定电压的130%。

对在额定励磁电流时的空载电压为额定电压130%以上的电机，试验电压应等于额定励磁电流时的空载电压。

若无其他有关标准或技术文件规定，试验时间为3 min，但以下规定除外。

对在130%额定电压下，空载电流超过额定电流的电机试验时间可缩短至1 min。对强行励磁的励磁机，在强行励磁时的电压如超过130%额定电压，则试验应在强行励磁时的极限电压下进行，试验时间为1 min。

提高试验电压至额定电压的130%时，允许同时提高频率或转速，但应不超过额定转速的115%或超速试验中所规定的转速。容许提高的转速值应在各类型电机标准中规定。

对磁路比较饱和的发电机，在转速增加至115%且励磁电流亦已增加至容许的限值时，如感应电压值达不到所规定的试验电压，则试验允许在所能达到的最高电压下进行。

4.13 工频耐电压试验

试验电压的频率为工频，电压波形应尽可能接近正弦波形。在整个耐电压试验过程中，要做好必要的安全防护措施，被试电机周围应有专人监护。

4.13.1 **试验要求**

4.13.1.1 除非另有规定，工频耐电压试验应在电机静止状态下进行。

4.13.1.2 试验前应先测量绕组的绝缘电阻，如电机需要进行超速、偶然过电流、短时过转矩试验及短路机械强度试验时，则工频耐电压试验应在这些试验后进行。型式试验时，工频耐电压试验应在温升试验后立即进行。

4.13.1.3 当电枢绕组、辅助绕组各相或各支路始末端单独引出时，应分别进行试验。

4.13.1.4 试验时被试绕组两端同时施加电压(对小型电机可在绕组一端施加电压)，此时，不参加试验的其他绕组和埋置检温元件等均应与铁心或机壳作电气连接，机壳应接地。如果三相绕组的中性点不易分开，三相绕组应同时施加电压。

4.13.1.5 对于水冷电枢绕组，试验在绕组通水的情况下进行时，此时汇水管应接地。在不通水的情况下进行时，但必须将绝缘引水管中的水吹干。

4.13.1.6 试验变压器应有足够的容量，如被试电机绕组的电容 C 较大时，则试验变压器的额定容量 S_N(kVA)应大于下式计算值：

$$S_N = 2\pi f C U U_{NT} \times 10^{-3} \qquad \cdots\cdots(8)$$

式中：

f——电源频率，Hz；

U——试验电压值，V；

U_{NT}——试验变压器的高压侧额定电压，V；

C——电机被试绕组的电容，F。

4.13.2 **工频耐电压试验方法**

试验接线原理图见图5(转子耐电压试验接线参见此图)。图中 T_1 为调压变压器，T_2 为高压试验装置，PT 为电压互感器，R 为限流保护电阻，其值一般为每伏(0.2～1)Ω，R_0 为球隙保护电阻(低压电机不接)，其值一般可用每伏 1Ω，QX 为过电压保护球隙(低压电机不接)，V 为电压表，TM 为被试电机，其中球隙和球径按高压电气设备绝缘试验电压和试验方法的规定选择，球隙的放电电压应调整到试验电压的 1.1～1.15 倍。如果需测量电容电流，可在试验装置高压侧接入电流表和与电流表并联的短路保护开关。如电流表接在低压侧则应注意杂散电流对读数的影响。

试验时，施加的电压应从不超过试验电压全值的一半开始，然后以不超过全值的 5%均匀地或分段地增加至全值，电压自半值增加至全值的时间应不少于 10 s。全值试验电压值应符合 GB 755—2000 表 14 的规定，并持续 1 min。

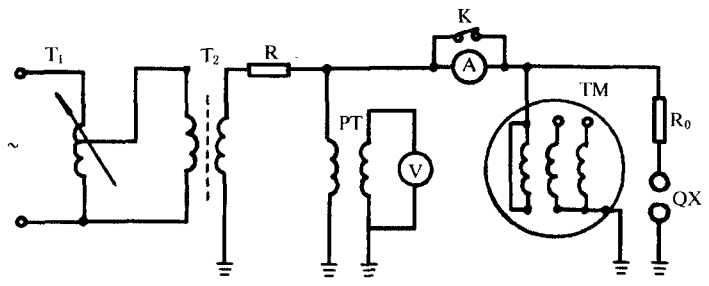


图 5

当对批量生产的 5 kW(或 kVA)及以下电机进行常规试验时，1 min 试验可用约 5 s 的试验代替，试验电压按 GB 755—2000 表 14 规定的正常值。也可用 1s 试验来代替，但试验电压应为 GB 755—2000 表 14 规定的 120%，试验电压用试棒施加。试验完毕，亦应均匀降压，待电压下降到全值的三分之一以下时，方可断开电源，并将被试绕组进行放电。

在试验过程中，如果发现电压表指针摆动很大，电流表指示急剧增加，绝缘冒烟或发生响声等异常

现象时，应立即降低电压，断开电源，将被试绕组放电后再对绕组进行检查。

4.14 电枢绕组绝缘直流泄漏电流试验及直流耐压试验

当电枢三相绕组各相或各支路始末端单独引出时，应分别对地进行泄漏电流试验。在绕组一相或一个支路进行试验前，其他两相绕组或其他支路均应接地，如果三相绕组的中性点连在一起不易分开时，则允许三相绕组一起试验。试验时应记录电枢绕组温度，环境温度和湿度。

直流泄漏电流试验的最高电压即为直流耐压试验值，该值由有关的技术文件规定。

4.14.1 试验方法

4.14.1.1 空冷或氢冷电枢绕组

试验接线如图6所示。图中 T_1 为调压器；T_2 为高压试验装置；R 为限流保护电阻，其值为每伏(0.1～1)Ω；D 为高压整流硅堆；V 为高电压测量装置；μA 为微安表；K 为闸刀开关；TM 为被试电机；C 为高压滤波电容。

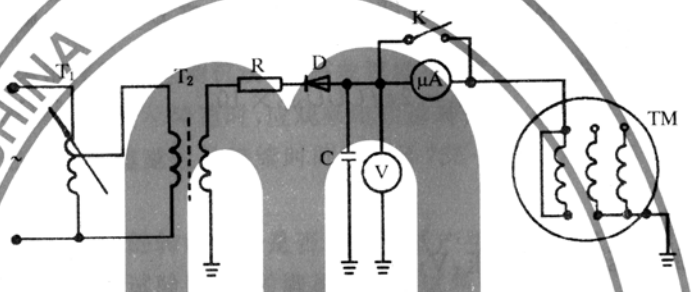


图 6

试验时，应使调压器电压在最低位置，通电后调节调压器，均匀升压。试验过程中电压应逐段上升。例如 $0.5U_N$、$1.0U_N$、$1.5U_N$……至规定值。每升到一个阶段停留一分钟，并记录每阶段电压开始和一分钟时微安表的电流值(即泄漏电流值)。试验完毕，将调压器退回原位，切断电源，并将绕组放电后接地。待放电完毕后，再对另一绕组进行试验。

在试验过程中，如发现泄漏电流随时间急剧增长或有异常放电现象时，应立即停止试验并断开电源，将绕组放电后接地再进行检查。

根据试验数据，绘制泄漏电流与试验电压的关系曲线。

在高压侧接入电流表与电流表并联的短路保护开关，测量时应保证人身安全。如电流表接在低压侧，则应注意杂散电流对读数的影响。

4.14.1.2 水内冷电枢绕组

试验接线如图7所示。图中 T_1 为调压变压器，T_2 为高压试验装置；R 为限流保护电阻，其值为每伏(0.1～1) Ω；D 为高压整流硅堆；μA 为微安表；K 为闸刀开关；TM 为被试电机；C 为高压滤波电容器；V 为高电压测量装置；C_1 为低压滤波电容器；L_1 为电感扼流圈；E 为 1.5V 电池；R_b 为 100 kΩ 炭膜电阻；R_a 为 500 kΩ 电位器，mA 为监视用毫安表。高压滤波电容器电容 C(F)的选择，应使时间常数满足下述条件：

$$T \approx CR_y \geqslant 0.3\text{s}$$

式中：

R_y——被试绕组与汇水管间的绝缘电阻，Ω。

电枢绕组在通水条件下进行试验时，水质电导率应不大于 1.5 μs/cm，每次试验前，先调节电位器 R_a，取得一个与极化电势极性相反，数值相等的补偿电势，使微安表指示为零。接着测量试验设备的空试直流泄漏电流(不接被试品时的微安表读数)。

接被试品后的操作方法见 4.13.1.1。实际直流泄漏电流 I(μA)按下式计算：

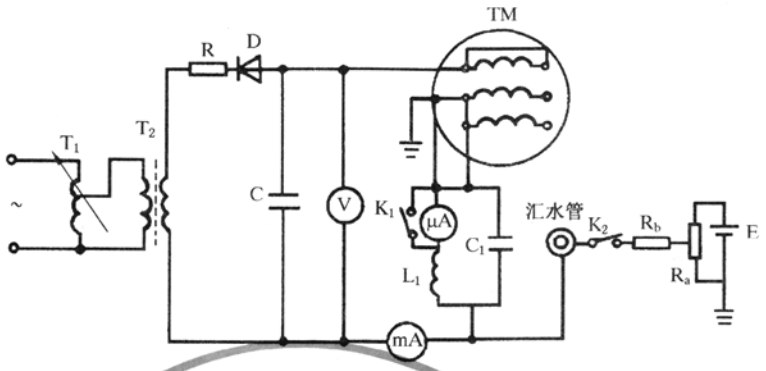


图 7

$$I = I_1\left(1+\frac{R_1}{R_2}\right) - I_0 \quad \cdots\cdots(9)$$

式中：

I_1——微安表读数，μA；

R_1——扼流线圈电阻和微安表内阻串联电阻值，Ω；

R_2——电枢绕组在试验状态接线时测出的汇水管对地电阻值，Ω；

I_0——试验设备空试直流泄漏电流，μA。

在电枢绕组吹水后进行试验时，试验方法与电枢绕组通水时基本相同，此时不需采用补偿电势。如进行水压试验，应在该试验后进行。

4.15 电压波形正弦性畸变率的测定

4.15.1 电机应在空载发电机状态下运行，调整转速、电压为额定值后测定。

4.15.2 根据试验条件，可选下面任一种方法测定。

4.15.2.1 用波形畸变测定仪测定。

4.15.2.2 用谐波分析仪测定出基波电压和各次谐波电压的数值，然后用公式(10)计算出畸变率。

$$K_u = \frac{\sqrt{U_2^2+U_3^2+U_4^2+\cdots\cdots+U_n^2}}{U_1}\times 100\% \quad \cdots\cdots(10)$$

4.15.2.3 用记录仪将电压波形的瞬时值记录下来，再分解出基波电压和各次谐波电压的数值，并计算出畸变率。

4.15.3 被测电枢电压可用分压器或电压互感器降低电压后进行测量，在使用分压器、电压互感器时，要注意使波形不失真。

4.16 噪声的测定

噪声试验按 GB/T 10069.1 和 GB/T 10069.2 规定的方法进行。

4.17 电话谐波因数的测定

THF 的测定应在电机为空载额定电压和额定频率下进行，用专用仪表或谐波分析仪测出基波电压和各次谐波电压的数值，频率范围应包括从额定值至 5 000 Hz 的全部谐波。电话谐波因数按下式计算：

$$THF(\%) = \frac{100}{U}\sqrt{\sum_{i=1}^{n}(E_i\lambda_i)^2} \quad \cdots\cdots(11)$$

式中：

U——线电压的有效值，V；

E_i——i 次谐波电压的有效值，V；

λ_i——对应于 i 次谐波频率的加权系数，不同频率的加权系数可从加权系数表或加权曲线中查出，

见 GB 755—2000 中表 16 和图 13。

电机的电话谐波因数应采用三个线电压所得 THF 中的最大值。

5 效率测定

5.1 效率的直接测定法

测量被试电机的输出功率和输入功率以确定效率。

5.1.1 试验时，被试电机应在额定功率、额定电压、额定转速及额定功率因数下运行至热稳定后再进行测量。

在测量被试电机的输入功率和输出功率时，应同时测量被试电机的电枢电流、励磁电流及冷却介质温度。

当冷却介质温度不是 25℃时，还应同时测量各绕组温升及直流电阻(可紧接在试验后测量，但应修正到断能瞬间)。

5.1.2 用直接法测定电机效率时，应采用下述的任一种方法。

5.1.2.1 制动法

当被试电机作电动机运行时，与制动器或测功机联接，用制动器或测功机测量被试电机的转矩，同时测定其转速，以确定电机输出功率，输入功率用电气仪表测量。

当被试电机作发电机运行时，用测功机拖动被试电机，并用测功机测量被试电机的输入功率，用电气仪表测量被试电机的输出功率。

由于电机的转速直接影响功率的计算，因此要特别注意对转速的测量。

试验应在尽可能接近定额规定的时间终了时所达到的温度下进行，绕组电阻不需作温度换算。

5.1.2.2 校准电机法

被试电机与校准过的电机机械耦合，用校准电机测量被试电机的输入(对于发电机)或输出(对于电动机)功率，用电气仪表测量被试电机的输出(对于发电机)或输入(对于电动机)功率。

试验应在尽可能接近定额规定的时间终了时所达到的温度下进行，绕组电阻不需作温度换算。

5.1.2.3 对拖法

把两台相同的电机机械耦合，一台作电动机运行，另一台作发电机运行。用电气仪表测量电动机的输入功率和发电机的输出功率，当两台电机的运行工况基本相同时，可假定损耗是平均分担的，则电动机的输出功率为输入功率与总损耗之半的差，而发电机的输入功率为输出功率与总损耗之半的和。

试验应在尽可能接近定额规定的时间终了时所达到的温度下进行，绕组电阻不需作温度换算。

5.1.3 总损耗测定

5.1.3.1 回馈法

把两台相同的电机机械和电气耦合在一起，一台作电动机，另一台作发电机运行，这两台电机的损耗由它们所联接的电网来提供，或由机械耦合的测功机或校准过的电机供给。

当两台电机运行工况基本相同时，可假定损耗是平均分担的，则被试电机的输入、输出功率可按5.1.2.3的方法确定。

试验应在尽可能接近定额规定的时间终了时所达到的温度下进行，绕组电阻不需作温度换算。

由于两台电机间的功率转移的大小随其功角的大小而不同，故两台电机机械耦合时应有一个正确的功角关系。

5.1.3.2 零功率因数试验

被试电机在额定电压、额定转速下作空载电动机运行，功率因数在零左右，调节励磁电流使初级绕组电流达到额定值。其总损耗即等于试验时输入的功率，其中励磁损耗应按实际励磁电流损耗与额定负载时励磁电流损耗之差进行修正。

供电电压要与额定电压空载运行时使电机具有相等的铁耗数值。除非供电电压将使铁心损耗比满

载时损耗增加很多，通常供电电压与额定电压相等。原则上无功功率应该是正的(过励)。如由于励磁电压不够而做不到时，试验也可在吸收无功功率(欠励)工况下进行。

5.1.4 效率的求取

5.1.4.1 被试电机在试验状况下的效率按下式计算：

$$\eta = \frac{P}{P_{in}} \times 100\% \qquad \cdots\cdots(12)$$

式中：

P——电机的输出有功功率，kW；

P_{in}——电机的输入有功功率，kW。

5.1.4.2 用直接法测定电机效率时，如冷却介质温度不为25℃，则应按下列公式换算到25℃：

$$\eta_{(25)} = \frac{P}{P_{in(25)}} \times 100\% \qquad \cdots\cdots(13)$$

式中：

$P_{in(25)} = P_{in} + \Delta P_{cua} + \Delta P_{cuf}$(kW)

$$\Delta P_{cua} = 3I_a^2 R_a \left(\frac{k+\Delta\theta_a+25}{k+\theta_a}-1\right) \text{(kW)}$$

$$\Delta P_{cuf} = I_f^2 R_f \left(\frac{k+\Delta\theta_f+25}{k+\theta_f}-1\right) \text{(kW)}$$

I_a——效率测定时的电枢相电流，A；

I_f——效率测定时的励磁电流，A；

R_a——效率测定时电枢绕组一相的直流电阻值，Ω；

R_f——效率测定时励磁绕组直流电阻值，Ω；

$\Delta\theta_a$——效率测定时电枢绕组温升值，K；

$\Delta\theta_f$——效率测定时励磁绕组温升值，K；

θ_a——效率测定时电枢绕组温度，℃；

θ_f——效率测定时励磁绕组温度，℃；

k——铜绕组取235，非铜绕组按GB 755—2000中7.6.2.2规定取。

5.2 效率的间接测定法

5.2.1 电机效率用损耗分析法求取时，分别测定或计算下列各项损耗。

5.2.1.1 恒定损耗，记为P_0，包括：

a) 铁损耗(包括空载杂散损耗)，记为P_{Fe}；

b) 轴承摩擦损耗；

c) 风耗；

d) 电刷摩擦损耗。

以上b)、c)、d)三项损耗之和称为机械损耗，记为P_{fw}。

5.2.1.2 负载损耗

电机电枢绕组中I^2R损耗，记为P_{cua}。

5.2.1.3 励磁损耗，记为P_f，包括：

a) 励磁绕组的I^2R损耗，记为P_{cuf}；

b) 变阻器损耗，记为P_R；

c) 电刷电损耗，记为P_{rs}；

d) 励磁机损耗，记为P_E；

e) 自带励磁装置的损耗，记为P_{ZE}；

f) 自带辅助绕组的I^2R损耗。

5.2.1.4 杂散损耗，记为 P_d，包括：

a) 电枢绕组导线内的杂散损耗；

b) 磁路及其他金属部分(导线除外)内的杂散损耗。

5.2.2 电机的效率按下式确定：

$$\eta = \left(1 - \frac{\sum P}{P + \sum P}\right) \times 100\% \quad \cdots\cdots (14)$$

式中：

$\sum P$——总损耗，即 $\sum P = P_0 + P_{cua} + P_f + P_d$(kW)；

P——输出功率，kW。

为了确定各绕组的 I^2R 损耗，绕组的直流电阻应按下式换算到对应于电机铭牌上标明的绝缘等级的基准工作温度时的数值：

$$R_j = \frac{k + \theta_j}{k + \theta_1} R_1 \quad \cdots\cdots (15)$$

式中：

R_j——基准工作温度时的绕组直流电阻，Ω；

R_1——在实际冷状态下绕组的直流电阻，Ω；

θ_1——对应于 R_1 测量时的绕组温度，℃；

θ_j——基准工作温度，℃；基准工作温度见表 2；

k——见公式(13)。

表 2

绝缘结构的热分级	基准工作温度/℃
A,E	75
B	95
F	115
H	130

注：如按照低于结构使用的热分级来规定额定温升或额定温度，则应按较低的热分级规定其基准工作温度。

5.3 量热法

如不能用 5.1 或 5.2 规定的方法测定损耗时，可用量热法测量，试验方法见 GB/T 5321。

5.4 对应于额定负载时各种损耗的测定

5.4.1 恒定损耗的测定

5.4.1.1 空载发电机法 被试电机的励磁电流由独立的直流电源供给，作空载发电机运行，拖动机应是分析过的电动机或其他能准确测量或计算其输出功率的原动机(如测功机)。试验时，转速应为被试电机的额定转速，待轴承摩擦损耗和电刷摩擦损耗稳定后，在发电机的不同电压下量取原动机的输出功率，此输出功率即为被试电机在对应电压下的恒定损耗(P'_0)。

为了把铁耗和机械损耗分开，把各种电压测得的恒定损耗对应电压标么值平方画曲线如图 8 所示。对应于 $\left(\frac{U_0}{U_N}\right)^2 = 0$ 的损耗即为被试电机的机械损耗，对应额定电压的损耗即为被试电机在额定电压下的恒定损耗，二者之差为被试电机在额定电压下的铁耗(P_{Fe})，亦作为被试电机在额定负载时的铁耗。

5.4.1.2 空载电动机法 被试电机接到额定频率电压可调实际对称的稳定电源上作空载电动机运行。励磁电流由独立的直流电源供给，调节被试电机的励磁电流使电枢电流为最小，待轴承摩擦损耗和电刷摩擦损耗稳定后，在不同电压下测量输入功率 P_{in} 及电枢电流 I_0，并测量电枢绕组的直流电阻 R_a(可紧接在试验后立即测取，但应修正到断能瞬间)，被试电机在对应电压下的恒定损耗 P'_0(kW)为：

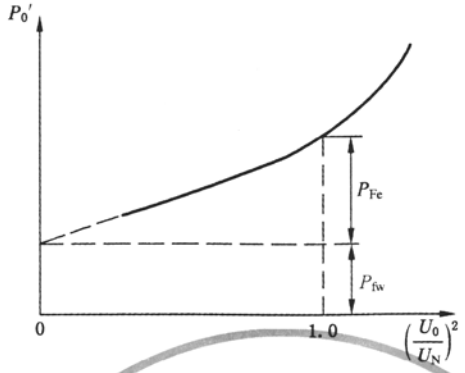


图 8

$$P_0' = P_{in} - 3I_0^2 R_a \times 10^{-3} \quad \cdots\cdots (16)$$

式中：

P_{in}——被试电机的输入功率，kW；

I_0——电枢相电流（三相平均值），A；

R_a——电枢相绕组的直流电阻（三相平均值），Ω。

按照 5.4.1.1 所作的那样，将对应电压下的恒定损耗对电压标么值的平方作曲线。将曲线的直线部分延长与纵轴相交，交点的纵坐标即为机械损耗，对应于 $\left(\frac{U_0}{U_N}\right)^2 = 1$ 的损耗即为额定电压下的恒定损耗，二者之差即为额定电压下的铁损耗。

5.4.1.3 自减速试验法见 5.5

5.4.2 电枢绕组的 I^2R 损耗（kW）按下式计算：

$$P_{cua} = 3I_N^2 R_{aj} \times 10^{-3} \quad \cdots\cdots (17)$$

式中：

I_N——额定电枢电流，A；

R_{aj}——基准工作温度时电枢绕组的直流电阻平均值，Ω。

对于自励恒压发电机，由于励磁方式引起电枢电流与额定负载电流有差别时，电枢绕组的 I^2R 损耗（kW）应按下式计算：

$$P_{cua} = R_{aj}(I_u^2 + I_v^2 + I_w^2) \times 10^{-3} \quad \cdots\cdots (18)$$

式中：

I_u、I_v、I_w 为额定工作状态时测得的各相电枢电流，A。

5.4.3 励磁损耗的求取

5.4.3.1 励磁绕组的 I^2R 损耗（kW）按下式计算：

$$P_{cuf} = I_{fN}^2 R_{fj} \times 10^{-3} \quad \cdots\cdots (19)$$

式中：

I_{fN}——额定励磁电流，A；

R_{fj}——基准工作温度时的励磁绕组的直流电阻，Ω。

5.4.3.2 变阻器损耗 P_R（kW）由下式计算：

$$P_R = I_{fR} U_R \times 10^{-3} \quad \cdots\cdots (20)$$

式中：

I_{fR}——额定工况时，流经变阻器的电流，A；

U_R——对应上述电流的主变阻器两端压降，V。

若主励磁回路中有其他辅助设备时，则应与主变阻器处理方法一致，若被试电机励磁绕组与直流励

磁机电枢回路直接连接时此项损耗为零。

5.4.3.3 电刷电损耗 P_{rs}(kW)由下式计算：

$$P_{rs} = 2I_{fN} \times \Delta U_s \times 10^{-3} \quad \cdots\cdots(21)$$

式中：

I_{fN}——额定励磁电流，A；

ΔU_s——每极电刷上的压降，对于碳-石墨及电化石墨电刷 $\Delta U_s = 1$ V；对金属石墨电刷 $\Delta U_s = 0.3$ V。

5.4.3.4 励磁机损耗

如励磁机不是由被试电机本身拖动，且为被试电机专用的励磁机，则此项损耗为零。

如励磁机可从被试电机轴上拆下能单独进行试验时，该励磁机的损耗应按有关的试验方法标准单独进行测定。

如励磁机不能拆下，则可用分析过的电机法，空载电动机法或自减速法测定整个机组在励磁机带有5.4.3中前三条之和的等效负载和不带负载两种情况下的损耗。两者之差即为励磁机的输入功率。励磁的负载即为输出功率。励磁机的输入功率与输出功率之间的差值为励磁机损耗。如尚需将励磁机的励磁损耗与其他损耗分开时，励磁机应由独立的直流电源他励，此时励磁机的输入功率应等于上面两种情况下所测得的损耗差值加上励磁机的励磁损耗。

如上述方法都无法采用时，则励磁机的损耗可依照该类型电机的损耗分析法确定，但已计入在被试电机损耗中的机械损耗不应再计入。

5.4.3.5 电机自带的励磁装置损耗

a) 整流元件的电气损耗 P_z(kW)按下式计算：

$$P_z = \Delta U_z \times I \times 10^{-3} \quad \cdots\cdots(22)$$

式中：

I——整流装置的输出电流，A；

ΔU_z——整流元件的工作压降，V，若无法测定，可取设计值或1.2 V。

b) 各绕组的 I^2R 损耗用在额定工作方式时流经该绕组的电流平方乘以该绕组在基准工作温度时的电阻计算。

c) 励磁装置各部分的铁耗可按设计值计算。

5.4.3.6 辅助绕组的 I^2R 损耗：

用在额定工作方式时流经该绕组的电流平方乘以绕组在基准工作温度时的电阻计算。

5.4.4 杂散损耗可由下列方法测定

5.4.4.1 短路法

将被试电机电枢绕组短路，由原动机拖动到额定转速，原动机应是分析过的电机或其他能准确测量或计算其输出功率的原动机(如测功机)。调节励磁电流使电枢电流为额定值，测定电枢绕组的直流电阻 R_a(Ω)，直流电阻紧接在试验后测取。从被试电机的输入功率 P_{in}(即原动机的输出功率，kW)中减去被试电机的机械损耗 P_{fN}(kW)和电枢绕组 I^2R 损耗，即得额定电枢电流时的杂散损耗 P_d(kW)：

$$P_d = P_{in} - P_{fN} - 3I_N^2 R_a \times 10^{-3} \quad \cdots\cdots(23)$$

5.4.4.2 过欠励法

被试电机作空载电动机运行，由独立的电源励磁，电枢绕组外施实际对称的额定频率的额定电压，待轴承和电刷摩擦损耗稳定后，即可进行试验，试验时电机分别在过励和欠励方式下调节励磁电流使电枢电流为额定值，读取电枢电压、电枢电流、输入功率、励磁电流和转速，并测出电枢绕组的直流电阻(可紧接在试验后测取)。

将被试电机输入功率减去恒定损耗、电枢绕组 I^2R 损耗，即得被试电机分别在过励，欠励运行时的杂散损耗，取其平均值作为电机的杂散损耗。如在欠励方式下不能将电枢电流调到额定值，允许将过励方式下测得的杂散损耗作为被试电机的杂散损耗。

测量输入功率应采用低功率因数瓦特表，在采用两瓦特表法测定输入功率时，两瓦特表的读数应同时读取。

5.4.4.3 自减速法见 5.5。

5.5 自减速试验

此法主要适用于转动惯量较大以及其他方法测定各项损耗有困难的电机。

试验时被试电机接到频率可调的电源上，也可由其他动力机拖动并由独立的直流电源供电他励。先将被试电机加速，使其转速略高于额定转速，对于隐极机应不低于 $105\%n_N$。对凸极机应不低于 $110\%n_N$，然后切断能源，在电机转速通过上述转速以前，建立所需的工作状态，使电机自减速。对隐极机量取从 $105\%n_N$ 降到 $95\%n_N$ 所需的时间，对凸极机量取从 $110\%n_N$ 降到 $90\%n_N$ 所需的时间，上下两个速度点之间的时间测量准确度要求达到±2%以内。为了测定各种损耗，需在下列工作状态下进行试验。

a) 电枢绕组开路，电机不励磁，在此试验中测得自减速时间为 Δt_1。

b) 电枢绕组开路，调节励磁电流使额定转速时的电枢电压为额定值，在此试验中测得自减速时间 Δt_2，电机减速通过额定转速时应同时量取电枢电压和励磁电流。

c) 电枢绕组三相短路，调节励磁电流使额定转速时的电枢电流为额定值，在此试验中测得自减速时间为 Δt_3。在自减速过程中量取电枢电流及励磁电流，根据测得的数据计算：

机械损耗

$$P_{fN} = 10.97Jn_N \frac{\Delta n}{\Delta t_1} \times 10^{-6} \quad \cdots\cdots (24)$$

恒定损耗

$$P_0 = 10.97Jn_N \frac{\Delta n}{\Delta t_2} \times 10^{-6} \quad \cdots\cdots (25)$$

负载损耗、杂散损耗与机械损耗之和

$$P_{cua} + P_d + P_{fN} = 10.97Jn_N \frac{\Delta n}{\Delta t_3} \times 10^{-6} \quad \cdots\cdots (26)$$

式中：

J——电机转动惯量，$kg \cdot m^2$；

n_N——额定转速，r/min；

Δn——对隐极机为 $1.05n_N - 0.95n_N = 0.10n_N$，对凸极机为 $1.10n_N - 0.90n_N = 0.20n_N$。

为了获得比较准确的结果，上述各项自减速试验均应重复进行三次，取三次试验的平均值作为实际值。

在电站进行水轮发电机试验时，如有可能应将水轮机脱开，否则应将转轮室的水全部排除，并从各次测得的损耗中减去用计算法确定的水轮机在空气中的机械损耗。

如果电机的转动惯量未知，可用下列方法测定：将被试电机接到已知损耗 P 的负载（如已知空载损耗或短路损耗的变压器），然后进行自减速试验，确定自减速时间 Δt_4。

带有空载变压器时：

$$J = \frac{P}{10.97n_N\left(\frac{\Delta n}{\Delta t_4} - \frac{\Delta n}{\Delta t_2}\right)} \times 10^6 \quad \cdots\cdots (27)$$

带有短路变压器时：

$$J = \frac{P}{10.97n_N\left(\frac{\Delta n}{\Delta t_4} - \frac{\Delta n}{\Delta t_3}\right)} \times 10^6 \quad \cdots\cdots (28)$$

也可事先用空载电动机法测定恒定损耗，然后进行上述自减速试验中的第 b)项试验，则 J 由下式求得：

$$J = \frac{P_{fN} + P_{Fe}}{10.97 n_N \dfrac{\Delta n}{\Delta t_2}} \times 10^6 \qquad \cdots\cdots (29)$$

在自减速试验中，如果用定时计数的数字测速仪记录转速时，可作出转速对时间的关系曲线，然后在曲线上求取对应于额定转速时的斜率$\left(\frac{dn}{dt}\right)$以代替上述方法中的$\frac{\Delta n}{\Delta t}$。

5.6 其他负载时效率的求取

如需要求取其他负载下的效率时，可按下述方法进行，恒定损耗保持不变，负载损耗按电枢电流平方换算，杂散损耗按 5.4.4 方法确定或按电枢电流平方换算，励磁损耗根据该负载下所需励磁电流按 5.4.3 中相应的公式换算。

6 温升试验

6.1 温度测量方法

电机绕组或其他部分的温度测量方法有以下三种：电阻法、温度计法和埋置检温计法，不同的方法不应作为相互校核用。

6.1.1 电阻法

测量被试绕组的直流电阻并根据直流电阻随温度变化而相应变化的关系来确定绕组的平均温度。

6.1.1.1 铜绕组

铜绕组的温升 $\Delta\theta$(K)由下式确定：

$$\Delta\theta = \frac{R_2 - R_1}{R_1}(235 + \theta_1) + \theta_1 - \theta_0 \qquad \cdots\cdots (30)$$

式中：

R_2——试验结束时的绕组电阻，Ω；

R_1——实际冷态时的绕组电阻，Ω；

θ_1——对应实际冷态测定 R_1 时的绕组温度，℃；

θ_0——试验结束时的冷却介质温度，℃。

6.1.1.2 非铜绕组

对铜以外的其他材料，应采用该材料在 0℃时电阻温度系数的倒数来代替上列公式的 235，对铝绕组除另有规定外应采用 225。

6.1.2 温度计法

此法是用温度计贴附在电机可接触到的表面来测量温度，温度计包括膨胀式温度计(例如水银、酒精等温度计)和半导体温度计及非埋置的热电偶或电阻温度计。测量时温度计应紧贴在被测点表面，并用绝热材料覆盖好温度计的测量部分，以免受周围冷却介质的影响，对有强交变磁场的地方不能采用水银温度计。

6.1.3 埋置检温计法

此法用埋入电机内部的检温计(如电阻检温计，热电偶或半导体热敏元件等)来测定温度，检温计是在电机制造过程中埋置于电机制成后不能触及的部位。

测量埋入式电阻温度计的电阻时，应控制测量电流的大小和通电流时间使电阻值不致因测量电流引起的发热而有明显的改变。

6.2 温升试验时冷却介质温度的测定

6.2.1 对采用周围环境空气或气体冷却的电机(开启式电机或无冷却器的封闭式电机)，环境空气或气体的温度应采用几个温度计来测量，温度计应分布在电机周围不同的地点，距离电机(1～2)m，球部处于电机高度的二分之一位置，并应防止一切辐射和气流的影响。

采用强迫通风或具有闭路循环冷却系统的电机，应在电机的进风口处测量冷却介质的温度。

绕组采用水内冷的电机，应取进水温度作为绕组冷却介质温度。

对非水直接冷却的铁心和其他部分应取进风温度为其冷却介质的温度。

6.2.2 试验结束时冷却介质温度的确定

试验结束时的冷却介质温度，应取在整个试验过程最后的四分之一时间内，按相等时间间隔测得的几个温度计读数的平均值。

6.3 温升试验时电机各部分温度的测定

6.3.1 绕组温度的测定

电机绕组温度的测量可用电阻法、埋置检温计法，但在使用电阻法时，冷热态电阻必须在相同的出线端测量。对既不能采用埋置检温计法又不能采用电阻法的场合，可采用温度计法，此法亦适用于GB 755—2000中的7.6.1a)、b)、c)、d)中规定的场合。

6.3.2 励磁绕组温度的测定

用电阻法测量励磁绕组的温度时，电压应在集电环上测量。

6.3.3 励磁装置绕组和辅助绕组温度测定

采用电阻法和温度计法。

6.3.4 定子铁心温度的测定

采用埋置检温计时用检温计测量，否则用温度计(对大、中型电机不少于两支)测量，取其最高值作为铁心温度。

6.3.5 集电环、极靴、阻尼绕组温度的测定

电机停转后立即采用温度计或点温计测量。

6.3.6 轴承和密封瓦温度的测量

采用温度计和埋置检温计测定，测定方法见GB 755—2000中的7.9。

6.4 电机各部分在切离电源后所测得的温度修正

6.4.1 用电阻法测量断能停转后的电机温度时，要求在温升试验结束后就立即使电机停转，电机断能后如能在表3时间内测得第一点读数，则以读数计算电机的温升而不需外推至断能瞬间。

表3

电机的额定功率P kW(kVA)	断能后间隔的时间 s
$P\leqslant 50$	30
$50<P\leqslant 200$	90
$200<P\leqslant 5\,000$	120
$P>5\,000$	按专门协议

6.4.2 如在上述间隔时间内不能测得第一点读数，则应尽快测得它。以后每隔1 min读取一次读数，直至这些读数开始明显地从最高值下降为止。绘成电阻(或温度)与时间关系的冷却曲线并根据电机的额定功率，将此曲线外推至表3中相应的间隔时间，所获得的温度即作为电机断能瞬间的温度。绘制曲线时，推荐采用半对数坐标，温度标在对数坐标轴上。如停转后测得的温度连续上升，则应取测得的温度最高值作为电机断能瞬间的温度。

6.4.3 如电机断能后测得第一点读数的时间超过上述相应间隔时间的两倍，则6.4.2所规定的方法只有在制造厂与用户取得协议后才能采用。

6.5 短路保温制动法

在需要用停机测量电枢绕组电阻，而又难以迅速制动时，应采用短路保温制动法。

当被试电机温升达到稳定后迅速减少负载并切离线路(对发电机应立即切除原动机的输入)，同时减少励磁电流至零。如电机无异常情况，将接到电枢绕组上的三相短路开关合上，再加上励磁，并迅速

增加励磁电流使电枢电流为90%额定值，从电机切离线路到电枢电流调到90%额定值所需的时间应不超过30 s，当电机停转时，立即开始记录时间，尽快减少励磁电流并切断，同时断开电枢绕组三相短路开关迅速测量电枢绕组电阻，并记录时间，以后继续测取4～5点，作电枢绕组电阻与时间的关系曲线。

6.6 温升试验方法

根据试验设备条件可采用直接负载法；低功率因数负载法；空载短路法。

6.6.1 直接负载法

6.6.1.1 试验时被试电机应根据其用途保持在额定工作方式下进行，在试验过程中冷却介质温度应符合GB 755—2000中5.3、5.4、5.5的规定，并尽量防止突变，每隔30 min记录一次各点数据，在电机各部分温度渐趋稳定阶段，要求每15 min或30 min记录一次。当电机各部分温度变化在最后1h内不超过2K时认为电机发热已达稳定状态。取稳定阶段中几个时间间隔温度的平均值作为该电机在额定负载下的温度，如采用停机外推法确定负载下温度时见6.4.2。

当温升试验时的电流与额定值相差在±5%以内时，电机绕组温升 $\Delta\theta_N$ 可按下式修正：

$$\Delta\theta_N = \Delta\theta\left(\frac{I_N}{I}\right)^2 \qquad \cdots\cdots(31)$$

式中：

I——温升试验过程中最后1 h内几个相等时间间隔的电流读数的平均值，A；

$\Delta\theta$——对应于试验电流 I 时的绕组温升，K。

6.6.1.2 从0.6倍额定功率开始到试验条件允许的最大可能功率范围内，在3～4个不同负载下进行温升试验，功率因数应接近额定值。

当进行每一负载温升试验时应确定相对于冷却介质温度的绕组和铁心的温升，根据不同负载下的试验结果，绘制电机该部分温升与绕组电流平方或者与该部分相应损耗的关系曲线，对应于额定负载的温升应用所得的曲线外推确定。

6.6.2 低功率因数负载法

因设备条件限制无法采用直接负载法进行温升试验时可采用低功率因数负载法，对调相机零功率因数负载就是直接负载。

此方法中被试电机可作发电机或电动机运行，可不带有功负载或带一部分有功负载。

试验时电机调到额定频率，额定励磁电流和额定电枢电流，试验过程中的要求与直接负载法相同，如果此时电枢电压不低于95%额定值，则电枢绕组温升 $\Delta\theta_a$，定子铁心温升 $\Delta\theta_{Fe}$ 不作修正，否则应按下列方法修正。

6.6.2.1 做两次空载温升试验

a) 电机空载，电枢电压等于上述试验中的电压，此时测得的电枢绕组温升为 $\Delta\theta_{a1}$，定子铁心温升为 $\Delta\theta_{Fe1}$。

b) 电机空载，电枢电压等于额定电压，此时测得的电枢绕组温升为 $\Delta\theta_{a2}$，定子铁心温升为 $\Delta\theta_{Fe2}$。

额定工作方式下的温升按下式计算：

电枢绕组：

$$\Delta\theta_{aN} = \Delta\theta_a + (\Delta\theta_{a2} - \Delta\theta_{a1}) \qquad \cdots\cdots(32)$$

定子铁心：

$$\Delta\theta_{FeN} = \Delta\theta_{Fe} + (\Delta\theta_{Fe2} - \Delta\theta_{Fe1}) \qquad \cdots\cdots(33)$$

6.6.2.2 经验公式

电枢绕组温升：

$$\Delta\theta_{aN} = \Delta\theta_a\left(1 + \frac{\Delta P_{Fe}}{K_a P_{cua}}\right) \qquad \cdots\cdots(34)$$

式中：

$\Delta\theta_a$——低功率因数负载温升试验时电枢绕组温升，K；

ΔP_{Fe}——额定电压时的铁耗 P_{Fe} 与低功率因数负载温升试验电压所对应的铁耗 P_{Fe} 之差，kW；

P_{cua}——低功率因数负载温升试验时电枢绕组中的 I^2R 损耗，kW；

K_a——系数，小型电机取 6，中型电机取 3。

定子铁心温升：

$$\Delta\theta_{FeN}=\Delta\theta_{Fe}\left(1+\frac{\Delta P_{Fe}}{P_{cua}+P'_{Fe}}\right) \qquad \cdots\cdots(35)$$

$\Delta\theta_{Fe}$——低功率因数负载温升试验时定子铁心温升，K。

6.6.3 **空载短路法**

6.6.3.1 被试电机作发电机运行并进行以下四次温升试验：

a) 电机空转，不加励磁，测得温升为 $\Delta\theta_0$；

b) 电机空载，电枢电压等于 105%额定值，测得温升为 $\Delta\theta_{U1}$；

c) 电机空载，在铁心温升不超过规定值的情况下，电枢电压尽可能接近 120%额定值，测得温升为 $\Delta\theta_{U2}$；

d) 电机三相对称短路，电枢电流等于额定值，测得温升为 $\Delta\theta_K$。

6.6.3.2 额定工作方式的电枢绕组温升按下式确定：

汽轮发电机

$$\Delta\theta_{aN}=\Delta\theta_K\left(1+\frac{40-\theta_c+\Delta\theta_{U1}-\Delta\theta_0}{k+\theta_c+\Delta\theta_K}\right)+\Delta\theta_{U1}-\Delta\theta_0 \qquad \cdots\cdots(36)$$

其他电机

$$\Delta\theta_{aN}=\Delta\theta_K\left(1+\frac{\Delta\theta_{U1}-\Delta\theta_0}{k+\theta_c+\Delta\theta_K}\right)+\Delta\theta_{U1}-\Delta\theta_0 \qquad \cdots\cdots(37)$$

式中：

θ_c——三相对称短路温升试验时冷却介质的温度，℃；

k——见公式(13)。

6.6.3.3 额定工作方式下定子铁心温升按下式确定：

$$\Delta\theta_{FeN}=\Delta\theta_k+\Delta\theta_{U1}-\Delta\theta_0 \qquad \cdots\cdots(38)$$

6.6.3.4 额定工作方式下励磁绕组温升按下列作图方法求得：

a) 汽轮发电机：先按 $\Delta\theta'_f=\Delta\theta_f+\Delta\theta$（$\Delta\theta$ 见附录 A）

将 6.6.3.1 中 b)、c)、d)三项试验的励磁绕组温升换算到对应于冷却介质温度 40℃时的温升，然后将 b)、c)、d)三项温升试验中测得的励磁绕组热态直流电阻 R_f 按下式换算到冷却介质温度为 40℃时的电阻值。

$$R'_f=\frac{k+40+\Delta\theta_f}{k+\theta_c+\Delta\theta_f}\cdot R_f \qquad \cdots\cdots(39)$$

式中：

θ_c——温升试验时冷却介质的温度，℃。

计算 $I_f^2R'_f$ 值并作 $\Delta\theta'_f=f(I_f^2R'_f)$ 的关系曲线如图 9 中曲线(1)。再标出冷却介质温度为 40℃，温升分别为 0 K 和 35 K(即绕组温度分别为 40℃和 75℃)时所对应的 $I_{fN}^2R'_{f40}$ 和 $I_{fN}^2R'_{f75}$ 值，并在图 9 上通过($I_{fN}^2R'_{f40}$，0)与($I_{fN}^2R'_{f75}$，35)点作直线(2)交曲线(1)的延长线于 A 点，则 A 点所对应的温升 $\Delta\theta_{fN}$ 即为所求的励磁绕组在额定工作方式下的温升。

b) 其他电机：确定额定工作方式时励磁绕组温升的方法类似于 a)，不同的是温升值 $\Delta\theta_f$ 和电阻值

R_f 均不必换算，直接采用实测值，而图 9 直线(2)是通过($I_{fN}^2 R_{f_{Q_c}}$，0)与($I_{fN}^2 R_{f75}$，$75-\theta_c$)两点作出的。θ_c 为 6.6.3.1 中的 b)、c)、d)三次温升试验时冷却介质温度(℃)的平均值。

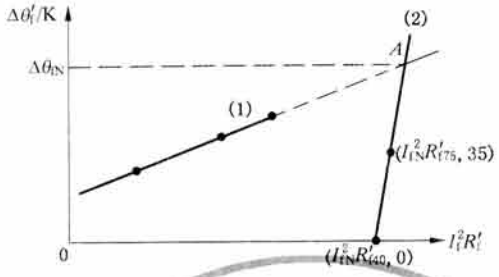


图 9

6.6.3.5 空载低转速法

这是励磁绕组温升试验的另一种间接方法，电机固定在某一励磁电流，在三种低于额定值的转速下进行空载温升试验，将三次试验所测得的励磁绕组温升值($\Delta\theta_{f1}$、$\Delta\theta_{f2}$、$\Delta\theta_{f3}$)与转速的关系绘制于图 10，并将曲线外推到额定转速得到 $\Delta\theta_f$，即为在此励磁电流时的励磁绕组温升，对于汽轮发电机 $\Delta\theta_{f1}$、$\Delta\theta_{f2}$、$\Delta\theta_{f3}$，应换算到冷却介质温度为 40℃(换算方法见 6.6.3.4 中的 a)然后再作曲线外推求得 $\Delta\theta_f$。

额定励磁电流时的励磁绕组温升为：

a) 汽轮发电机

$$\Delta\theta_{fN} = \Delta\theta_f\left(\frac{I_{fN}}{I_f}\right)^2\left[1+\frac{\Delta\theta_f\left(\frac{I_{fN}}{I_f}\right)^2-\Delta\theta_f}{k+40+\Delta\theta_f-\Delta\theta_f\left(\frac{I_{fN}}{I_f}\right)^2}\right] \quad \cdots\cdots(40)$$

b) 其他电机

$$\Delta\theta_{fN} = \Delta\theta_f\left(\frac{I_{fN}}{I_f}\right)^2\left[1+\frac{\Delta\theta_f\left(\frac{I_{fN}}{I_f}\right)^2-\Delta\theta_f}{k+\theta_c+\Delta\theta_f-\Delta\theta_f\left(\frac{I_{fN}}{I_f}\right)^2}\right] \quad \cdots\cdots(41)$$

式中：

θ_c——为三次试验时冷却介质温度的平均值，℃。

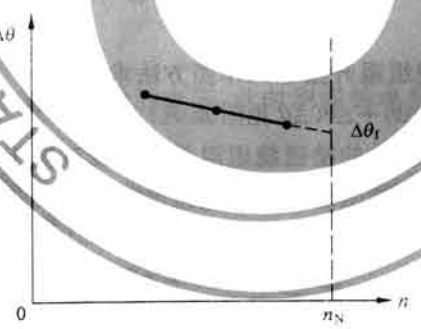


图 10

试验时最低转速选择不宜低于 $50\%n_N$。一般可选 $70\%n_N$，$80\%n_N$，$90\%n_N$ 三种转速，但应避开机组的临界转速。励磁电流的选择应尽可能大些，但必须保证在最高转速时的电枢电压不超过额定值的 120%，同时还应考虑到在试验中，由于铁心的高度饱和以及风量减少，铁心温度和定位筋、端盖、机壳、齿压板，紧固螺栓以及其他漏磁所经过的结构件的温度将较高，励磁绕组由于风量减少引起温升增高，因此在试验中要严密监视各部分的温升，使其不超过允许值，铁心温度可控制在低于允许温度

(5～10)℃，结构件的温度控制在不超过150℃，励磁绕组温度控制在相应的允许温度范围内，否则应进一步降低试验时的励磁电流。

7 自励恒压时电压调整性能测定

7.1 稳态电压调整率的测定

7.1.1 检查电压整定范围

7.1.1.1 检查空载时的电压整定范围

检查时发电机为空载，处于冷态或热态下，其转速为该类电机标准规定值，调节电压整定装置，测定发电机电压的最大值和最小值，此范围即为发电机冷态或热态空载时的电压整定范围。

7.1.1.2 检查满载时的电压整定范围

检查时，发电机应保持满载功率和额定运行时的功率因数，转速为额定转速，分别在发电机冷态和热态两种情况下，调节电压整定装置，测定发电机电压的最大值和最小值，此范围即为发电机冷态或热态满载时的电压整定范围。

7.1.2 稳态电压调整率的测定

测定发电机稳态电压调整率时应在冷态或热态下，按标准规定的电压，功率因数和转速进行。

试验前发电机为空载，调节转速到规定值。调整电压整定装置将电压整定在规定的电压调整率范围之内。对不可控相复励发电机允许在测定前将负载及功率因数调整至额定值，而后将负载逐渐减小至零，再重复将电压整定在电压调整率范围内。在试验过程中，电压调节装置应恒定不变，试验时，保持功率因数不变，将三相对称负载从零逐渐增加至额定功率，再从额定功率减小到零，测取各点电压，逐点的负载变化约为25%额定功率，在检查试验时测量点可酌情减少。

根据发电机励磁系统的不同类型，以及不同的运行方式，稳态电压调整率可用式(42)或(43)计算，具体选用由该类型电机标准规定。

$$\delta_{stu}=\frac{U_t-U_N}{U_N}\times 100\% \qquad \cdots\cdots(42)$$

式中：

U_t——从空载至额定负载与额定电压U_N相差最大的稳态电压(按三相平均值)，V；

U_N——额定电压，V。

$$\delta_{stu}=\pm\frac{U_{st\,max}-U_{st\,min}}{2U_N}\times 100\% \qquad \cdots\cdots(43)$$

式中：

$U_{st\,max}$、$U_{st\,min}$——分别为规定条件下，负载自空载至满载之间变化时，端电压(有效值)的最大值和最小值，V。

7.1.3 冷热态电压变化测定

试验时，先将发电机调整至额定工作方式，将电压整定装置固定不动，保持额定频率、额定功率与额定功率因数运行，从冷态至实际稳定温度时的电压偏差，即为发电机的冷热态电压变化值。试验时环境温度的变化应不大于10 K。

7.2 发电机在不对称负载工作时电压偏差程度的测定

试验时发电机在空载额定转速和额定电压下，先加25%额定功率的三相对称负载，功率因数为0.8(滞后)，然后在任一相再加25%额定相功率的阻性负载，对可控硅整流器励磁方式的自励恒压发电机，应加在有可控硅整流器的相测定线电压的最大(或最小)值。此最大(或最小)值与三相线电压平均值之差再与三相电压平均值之比即为电压偏差程度。

对三相三线制发电机的加载方法按该类型电机的标准规定进行。

7.3 瞬态电压变化率的测定

瞬态电压变化率的测定按GB/T 15548规定的方法进行。

8 转矩和转动惯量的测定

8.1 堵转电流和堵转转矩测定

8.1.1 堵转试验

试验前，应用低电压确定对应于最大堵转电流和最小堵转转矩的转子位置，并将转子堵住。试验时，电机励磁回路的接线方式应和实际使用时的起动接线方式一致。励磁回路中所需接入的起动电阻值在有关被试电机的技术文件中无规定时宜为10倍励磁绕组的电阻值，被试电机的电枢绕组应接到额定频率，电压可调实际平衡的电源上。当电源电压在额定值的20%以下时，将被试电机接入，然后尽快地升高电源电压，使电枢电流为额定值的200%左右(小型电机和使用电机自动测试装置进行试验时，电流可更大些)，并迅速同时读取三相线电压、三相线电流、输入功率或转矩(当直接测量时)为了避免电机过热，试验必须从速进行。然后逐渐降低电源电压(此时频率应保持额定)，用上述同样方法共读8～9点，在最大电流至额定电流范围内均匀测取不少于4点读数。如限于设备不能实测转矩时，当读完最后一点的试验数据并切断电源时，应立即测量电枢绕组的直流电阻值。

8.1.2 堵转电流和堵转转矩的确定

根据试验数据，绘制三相电流平均值对三线电压平均值的关系曲线如图11所示，并将曲线上的最高试验电压处顺曲线的直线部分延长，与横轴交于电压U'点。

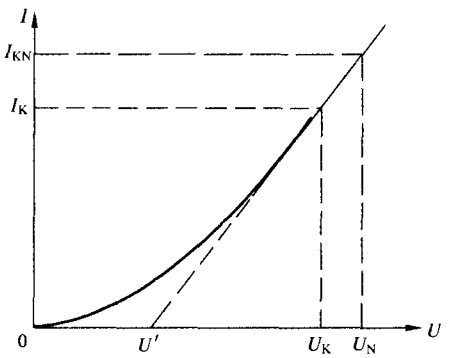


图11

被试电机的堵转电流I_{KN}按下式确定：

$$I_{KN}=\frac{U_N-U'}{U_K-U'}I_K \qquad \cdots\cdots(44)$$

式中：

U_K——最高试验电压值，V；

I_K——对应U_K的电流，A。

被试电机的堵转转矩T_{KN}(N·m)，按下式确定：

$$T_{KN}=\left(\frac{U_N-U'}{U_K-U'}\right)^2 T_K \qquad \cdots\cdots(45)$$

式中：

T_K——最高试验电压时测得的转矩，N·m。

如在试验时无法直接测得转矩，则堵转转矩可按下述方法计算，先计算转子堵住时输入转子的电磁功率P_M(kW)

$$P_M=P_{in}-P_{Fe}-3I_K^2R_{a1}\times10^{-3} \qquad \cdots\cdots(46)$$

式中：

P_{in}——最高试验电压时的输入功率，kW；

P_{Fe}——对应于最高试验电压时的铁耗，kW，由图 8 确定；

I_K——最高试验电压时的三相电流平均值，A；

R_{a1}——紧接试验后测得的电枢绕组任意相的直流电阻，Ω。

根据 P_M 确定堵转转矩 T_K(N·m)

$$T_K = 9\,550\frac{P_M}{n_N} \qquad \cdots\cdots(47)$$

式中：

P_M——输入转子的电磁功率，kW；

n_N——被试电机的额定转速，r/min。

用标么值表示时：

$$t_K = \frac{P_M}{P_N} \qquad \cdots\cdots(48)$$

如果图 11 中的电压电流关系曲线无明显的直线部分时(如实心转子电机等)，可作曲线 $\lg I_K = f(\lg U_K)$，如图 12 所示。从试验的最高电压处按直线延长，从延长线上查出对应于额定电压时的堵转电流 I_{KN}。

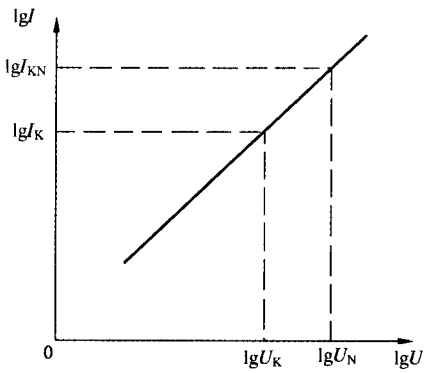


图 12

堵转转矩 T_K 由下式确定：

$$T_{KN} = \left(\frac{I_{KN}}{I_K}\right)^2 T_K \qquad \cdots\cdots(49)$$

8.2 标称牵入转矩的测定

测定标称牵入转矩时，被试电机的励磁回路应符合 8.1 的规定，标称牵入转矩可用直接负载法或加速法测定。

8.2.1 直接负载法

被试电机应接到额定频率，电压可调实际平衡电源上作异步电动机运转，被试电机的试验电压，应在阻尼绕组及磁极的整个极不过热的情况下尽可能提高，一般应在额定值的 50%以上，调节被试电机的负载，使其转差率为 0.05，同时读取被试电机的电枢电压、电枢电流、转速或转差率、输入功率，若负载为测功机还应读取转矩。如果采用分析过的直流电机作为负载时，应同时量取分析过直流电机的端电压、电枢电流和励磁电流。试验时还应记录被试电机励磁回路的连接情况和短路电阻的数值。

被试电机在转差率为 s 时的电磁转矩 T_M(N·m)，按下式计算：

$$T_M = 9\,550\frac{P + P_{fws}}{(1-s)n_N} \qquad \cdots\cdots(50)$$

式中：

P——被试电机的输出功率，即负载电机的输入功率，kW；

P_{fws}——被试电机在转差率为 s 时的机械损耗，kW，如无此数据时，可近似取 P_{fw} 值（见 5.2.1.1）。

被试电机在额定电压时的标称牵入转矩 T_{pin}（N·m）按下式计算：

$$T_{pin}=\left(\frac{U_N-U'}{U-U'}\right)^2 T_M \qquad \cdots\cdots(51)$$

式中：

U——求得 T_M 时的试验电压，V；

U'——由图 11 确定的电压值，V；

T_M——转差率 $s=0.05$ 时求得的电磁转矩，N·m。

标称牵入转矩的标么值 t_{pin} 按下式计算：

$$t_{pin}=\left(\frac{U_N-U'}{U-U'}\right)^2 \cdot \frac{P+P_{fws}}{(1-s)P_N} \qquad \cdots\cdots(52)$$

试验中如果转差率为 0.05 的点不易准确建立时，则可调节被试电机的负载，使转差率为 0.05 左右取 4～5 点，按上述方法计算转矩，然后作出转矩对转差的曲线。从曲线上确定转差率为 0.05 时的转矩值。

8.2.2 加速法

被试电机接到额定频率，电压可调实际平衡的稳定电源上，使电机作空载电动机起动，电源电压应调节到能使电机由 $30\%n_N$ 到 n_N 的时间约为 1.5 min 左右。在加速过程中，电源电压、频率保持不变，如果电机能从静止状态起动的最低电压尚不能满足上述要求，则应进一步降低电源电压，直到上述要求满足为止。但此时电机应采用其他方法帮助起动（例如用吊车帮助起动或先用较高电压起动，然后切断电源使电机降速，待电机转速降到 $30\%n_N$ 以下时，再加所需电压进行试验等）。在转速为 $30\%n_N$～$80\%n_N$ 范围内，每间隔（5～10）s 测量一次转速并记录时间。在转速为 $80\%n_N$～$100\%n_N$ 范围内宜每隔（3～5）s 记录一次，在试验过程中应注意电机是否过热。

当使用快速记录仪试验时，加速到全值的时间可以比上述规定快些。

由试验数据作转速对时间的曲线，如图 13 所示，并求取 $95\%n_N$ 处的曲线斜率 $\frac{dn}{dt}$，该斜率可用下述方法确定：以曲线上 $95\%n_N$ 处 a 点为中心，取曲线上离 a 等距离的 b、c 两点（b 点的纵坐标不应超过 n_N）这两点的纵坐标之差为 Δn，横坐标之差为 Δt，所求的曲线斜率为 $\frac{\Delta n}{\Delta t}$。

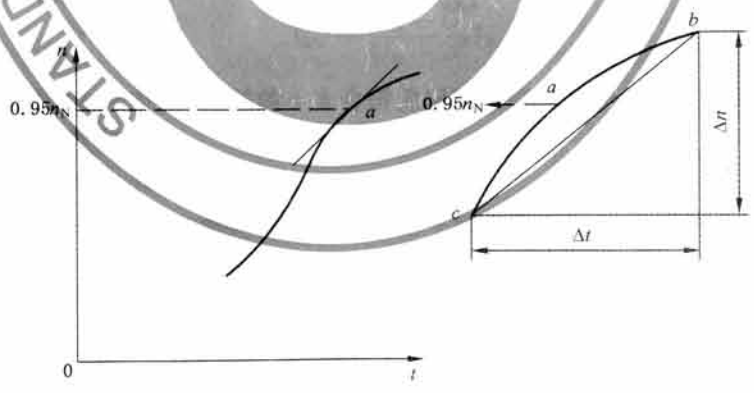


图 13

电机在试验电压下转矩 T_{pi}（N·m）按下式计算：

$$T_{pi}=\frac{J}{9.55}\cdot\frac{\Delta n}{\Delta t} \qquad \cdots\cdots(53)$$

式中：

J——被试电机的转动惯量，kg·m^2。

如用标么值计算，则：

$$t_{pi}=\frac{Jn_N\dfrac{\Delta n}{\Delta t}}{91.2\times10^3P_N} \qquad \cdots\cdots(54)$$

额定电压时的标称牵入转矩 T_{piN}(N·m)为：

$$T_{piN}=\left(\frac{U_N-U'}{U-U'}\right)^2T_{pi} \qquad \cdots\cdots(55)$$

如用标么值计算，则：

$$t_{piN}=\left(\frac{U_N-U'}{U-U'}\right)^2t_{pi} \qquad \cdots\cdots(56)$$

式中：

U'——由图 11 确定。

8.3 同步电动机失步转矩的测定

同步电动机的失步转矩可用直接负载法测定或用分析法确定。

8.3.1 直接负载法

试验时宜用负载均匀可调的制动器、转矩测量仪、测功机或分析过的直流发电机作负载。被试电动机应接到额定频率、额定电压实际平衡的电源上，将被试电机调到额定负载状态下运转，然后保持励磁电流不变，逐渐增加被试电机的负载使之失步，在失步瞬间从制动器、测功机或转矩测量仪上测量得的转矩数值，即为被试电机的失步转矩。

如果被试电机的负载为分析过的直流发电机时，则被试电机的失步转矩，可由失步瞬间测得的直流发电机输出功率，并根据效率曲线求出其输入功率，即为被试电机的输出功率 P，用下式确定被试电机的失步转矩 T_{po}(N·m)：

$$T_{po}=9\,550\frac{P+P_{fw}}{n_N} \qquad \cdots\cdots(57)$$

式中：

P_{fw}——被试电机的机械耗，kW。

8.3.2 分析法

如被试电机不能用直接负载法测定失步转矩时，可用分析法确定，同步电动机的失步转矩的标么值 t_{po} 按下式计算：

$$t_{po}=\frac{I_{fN}}{I_{f\delta}}\cdot\frac{1+f(\varepsilon)}{x_d\cos\varphi_N} \qquad \cdots\cdots(58)$$

$$\varepsilon=\frac{I_{f\delta}}{I_{fN}}\cdot\left(\frac{x_d}{x_q}-1\right) \qquad \cdots\cdots(59)$$

式中：

I_{fN}——被试电机的额定励磁电流，A；

$I_{f\delta}$——对应于额定电压时的空载气隙励磁电流，A，见图 18；

x_d——被试电机的直轴同步电抗的不饱和值，标么值(见 12.2.1)；

x_q——被试电机的交轴同步电抗，标么值(见 12.10)。

$f(\varepsilon)$取自图 14。

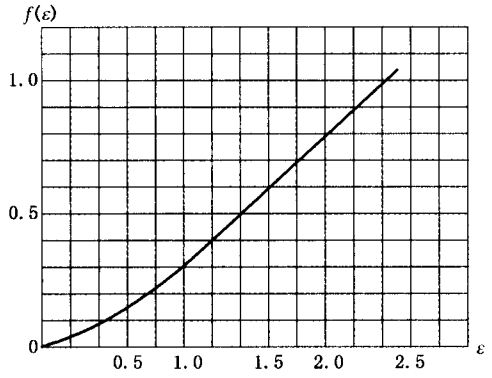


图 14

8.4 电动机的短时过转矩试验

同步电动机的短时过转矩，宜采用负载可调的制动器、测功机、分析过的直流发电机或其他能直接测量电机轴上输出功率的仪器、设备进行测量，过转矩倍数及持续时间按 GB 755—2000 或该类型电机标准的规定。

试验时被试电机应接到额定频率、额定电压、实际对称的电源上，并调节到额定功率附近运转，使电机温度接近工作温度(也可紧接在温升试验后进行)然后保持励磁电流不变，增加被试电机的负载，使其转矩达到规定值，试验中被试电机不应产生失步、冒烟、臭味和有害变形等异常情况。

8.5 转动惯量的测定

转动惯量的测定按参数测定中 12.35～12.44 规定的方法进行。

转动惯量与储能常数之间的关系为：

$$J = \frac{2S_N}{\omega_N^2} \cdot H = \frac{1\,800S_N}{\pi^2 n_N^2} \cdot H;\mathrm{kg \cdot m^2} \qquad \cdots\cdots(60)$$

式中：

ω_N——额定角速度，$\omega_N = \frac{2\pi}{60} n_N$，rad/s；

n_N——额定转速，r/min；

S_N——额定视在功率，kVA；

H——储能常数，s。

9 过电流和机械强度试验

9.1 偶然过电流试验

同步电机进行偶然过电流试验时，应处于接近热状态。试验时应迅速调节电机电枢电流至规定的电流倍数，偶然过电流的倍数及持续时间按 GB 755—2000 或该类型电机标准的规定。此时电机的频率为额定值，电枢电压尽可能接近额定值。

如因条件限制，不能按上述方法进行试验时，允许按该类型电机标准规定，在短路情况下进行试验。

在偶然过电流试验中，电机应不产生冒烟、异味和有害变形等异常情况。对水内冷电机及高电磁负荷电机，要注意端部结构过热。

9.2 过载试验

过载试验时电机处于接近热状态下，并保持额定频率、额定电压及额定功率因数不变。过载数值及试验时间按该类型电机标准的规定。在规定的试验时间内，发电机及励磁装置应不发生任何异常情况。

9.3 短路机械强度试验

本试验系破坏性试验，试验前必须仔细检查电机装配及安装质量，如电枢绕组端部绑扎是否牢固；

转子紧固螺母是否旋紧；电机基础是否处于良好状态；底脚螺栓及螺母是否旋紧等。试验前，应测定绕组对机壳及相互间的绝缘电阻。

在进行突然短路时，不允许有人留在被试电机、短路开关及引线（尽可能短）附近，以保证人身安全。

试验时电机应接近工作温度，如无其他规定，试验应在电机空载而励磁（他励）相应于 1.05 倍额定电压下进行，短路共历时 3 s。

消除短路后，应不产生有害变形且能承受耐电压试验。

10 负序电流承受能力试验

负序电流承受能力试验按 JB/T 8445 规定的方法进行。

11 定子绕组端部动态特性测定

定子绕组端部动态特性测定按 JB/T 8990 规定的方法进行。

12 参数测定（本章等同采用 IEC 60034-4）

12.1 说明

12.1.1 试验时，绕组的接线方法应与正常运行时相同。

各种参数的测定都是按电枢绕组为星形接法考虑（除非规定了特殊接法，如开口三角形）。若电枢绕组实际接成三角形，则按本章测得的参数对应于一个等效的星形绕组。

12.1.2 所有参数和特性都应用标么值表示，此时取额定电压（U_N）及视在功率（S_N）为其基值。在这种情况下，基值电流为

$$I_N = \frac{S_N}{\sqrt{3}U_N}, \text{A} \qquad \cdots\cdots(61)$$

基值阻抗为

$$Z_N = \frac{U_N^2}{S_N} = \frac{S_N}{3I_N^2}, \Omega \qquad \cdots\cdots(62)$$

如果方便的话，中间计算可用物理值运算，然后再换算成标么值。建议时间用秒表示。在特性计算中和绘制图形时，取空载特性曲线上对应额定电压的励磁电流为励磁电流基值。

若电机有若干额定值，则应说明哪些被取为基值。

除非另有说明，本章均采用上述规定。小写字母表示参数的标么值，大写字母表示参数的物理值。

12.1.3 在本章给出的确定同步电机电抗的公式中，除非另有规定，否则认为正序电枢电阻可忽略不计。

当正序电阻大于被测电抗 0.2 倍时，应把这些公式视为近似公式。

12.1.4 本章中给出的大部分参数的测定试验方法，是符合广泛采用的同步电机双轴反应理论的。把励磁绕组以外的所有回路，近似地用两个等效回路来表示，并相对励磁绕组静止不动。其中一个沿直轴，另一个沿交轴，并把电枢绕组电阻忽略不计，或只是近似地加以考虑。

由于对电机采用这种近似表示方法，因此本章在对电机瞬变过程的研究中，沿直轴考虑有三个电抗（同步电抗、瞬变电抗和超瞬变电抗）和两个时间常数（瞬态和超瞬态时间常数）；沿交轴考虑有两个电抗（同步电抗和超瞬变电抗）和一个时间常数（超瞬态时间常数）以及一个电枢短路时间常数。

这些时间常数是以有关参数（电压、电流等）的特定分量按指数曲线衰减的假设为基础的。若以实际测得分量画出的曲线并不单纯按指数曲线衰减，例如实心转子电机的实际曲线，则通常应把时间常数理解为该分量自初始值衰减至 $1/\varepsilon \approx 0.368$ 初始值时所需时间，而与这些时间常数对应的指数衰减曲线应视为是代替实际测定曲线的等效曲线。

12.1.5 同步电机参数随磁路饱和程度变化，在实际计算中，饱和值与非饱和值两者都用。

若无其他说明，本章中除同步电抗未被定义为饱和电抗外，将其他电抗及电阻的“饱和值”取为其额定电枢电压下的值，“非饱和值”取为其额定（电枢）电流下的值。

参数的额定（电枢）电压值对应于电机在额定转速时从空载额定电压运行中电枢绕组突然短路时的电机磁状况。

参数的额定（电枢）电流值对应于确定此参数的电枢电流基波分量等于额定电流时的状况。

12.2 用空载饱和特性与三相稳态短路特性确定参数

12.2.1 直轴同步电抗用空载饱和特性与三相稳态短路特性确定，取在同一励磁电流下气隙线上的空载电压值与短路特性上的稳态短路电流值之比（图 15）。

$$X_d = \frac{U_N}{\sqrt{3}\,I_{BC}},\Omega;\left[x_d = \frac{AC}{BC} = \frac{OH}{OC} = \frac{i_{ik}}{i_{fg}}\right] \qquad \cdots\cdots(63)$$

这样确定的 X_d 值为非饱和值。

12.2.2 短路比用空载饱和特性与三相稳态短路特性确定，取空载饱和特性上对应于额定电压时的励磁电流值与短路特性上对应于额定电流时的励磁电流值之比（图 15）。

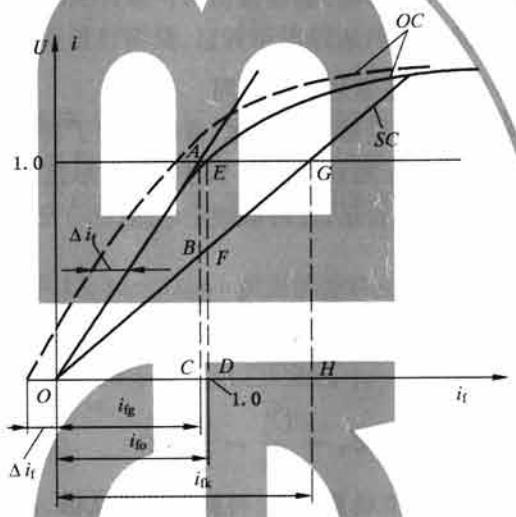


图 15

$$K_c = \frac{OD}{OH} = \frac{i_{fo}}{i_{fk}} \qquad \cdots\cdots(64)$$

12.3 零功率因数过励试验

零功率因数过励试验可在被试电机作发电机或电动机运行时进行。作发电机运行时，有功功率应等于零。作电动机运行时，轴上负载应该为零。

试验时，在过励零功率因数下，测定励磁电流，它对应的电压和电枢电流值最好与额定值的偏差不大于±0.15（标么值）。

12.4 零功率因数过励时，对应额定电压和额定电枢电流时的励磁电流的确定

在零功率因数过励试验时，如果电压与额定值偏差不大于±0.15（标么值），则可以利用试验的数据以及空载饱和特性和三相稳态短路特性，用作图法确定对应于额定电压和电流时的励磁电流。

将对应于零功率因数以及电压 u、电枢电流 i 和励磁电流 i_f 实测值的试验点（图 16 中的 C 点）画在有被试电机空载饱和特性的图上。在横轴上，取向量 OD，使其等于三相稳态短路曲线上对应电枢电流 i 的励磁电流。由 C 点向空载饱和特性作一直线 CF 平行于横轴，使其长度等于 OD。然后作直线 FH 平行于空载饱和特性的延伸直线部分，并与该特性相交于 H 点。连接 HC 并延长到 N 点，使其长度符合下式。

$$\frac{HN}{HC}=\frac{1}{i} \qquad \cdots\cdots(65)$$

式中：

i——对应 C 点的电枢电流。

然后把空载饱和特性平行其本身向右下方移动，移动距离为 HN。

在此曲线上可求得对应于额定电压的 A 点。该点的横坐标(OB)就是零功率因数(过励)时对应额定电压和额定电枢电流的励磁电流。

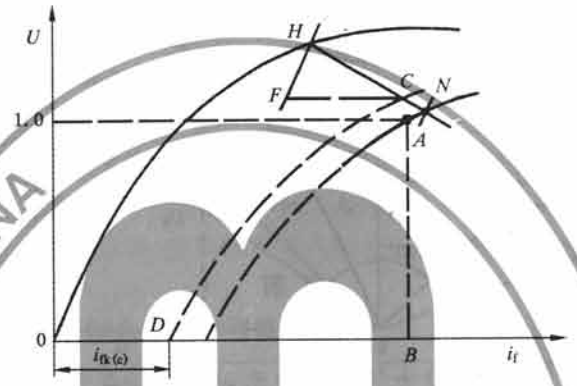


图 16

12.5 用空载特性、三相稳态短路特性和零功率因数(过励)时对应额定电压和额定电枢电流的励磁电流确定保梯电抗

保梯电抗用作图法确定。将空载特性和三相稳态短路特性绘在同一图上(图 17)，同样将纵坐标为额定电压、横坐标为额定电枢电流和零功率因数(过励)下测得的励磁电流的点 A 也绘在该图上。

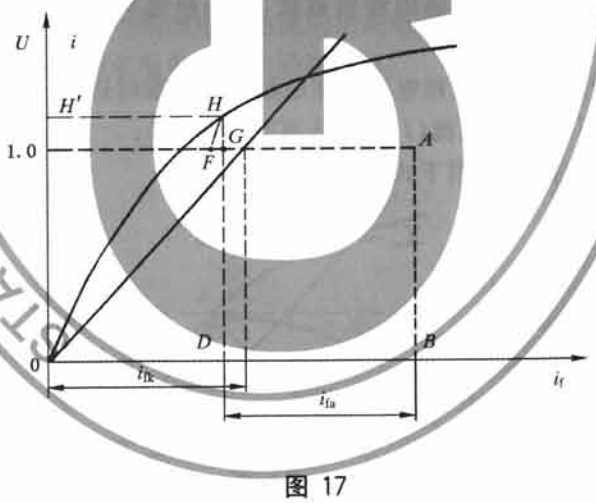


图 17

由 A 点向左作一直线平行于横坐标，取 AF 长度等于对应于额定电枢稳态短路电流时的励磁电流(i_{fk})，过 F 点作一直线平行于空载特性的延伸直线部分至空载特性的上部相交(H 点)，自 H 点到 G 点(与 AF 线的交点)的垂线长度即为额定电枢电流时在电抗 x_p 上的压降。用标么值表示 $x_p=HG$。

12.6 用保梯图确定额定励磁电流

为了用保梯图确定额定励磁电流，要用到空载饱和特性、三相稳态短路特性和保梯电抗 x_p。

沿横坐标量取被试电机额定电枢电流(i_N)的向量与它构成功率因数角 φ_N(对过励发电机取正)绘出额定电压向量(u_N)(图 18)。

由电压向量终端作一额定电流时的保梯电抗压降($i_N x_p$)向量与电枢电流向量相垂直。通常忽略电

枢绕组的电阻压降不计。如有必要，可由电压向量终端作一平行于电流向量的正序电枢绕组电阻压降向量。

在图 18 中，对发电机，该向量应与电枢电流同相；对电动机，则为反向。

额定电压与电抗 x_p 的电压降的向量和即为电势 e_p 向量；由空载曲线求得对应于电势 e_p 的励磁电流 i_{fp}，然后由原点作向量 i_{fp} 垂直于向量 e_p。

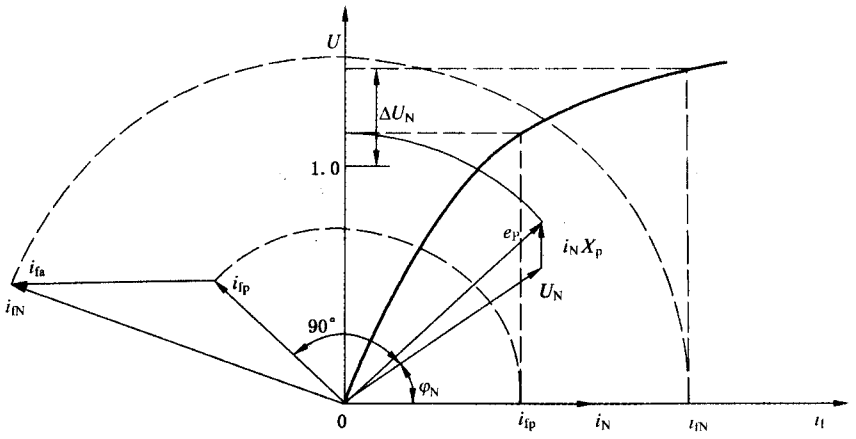


图 18

补偿额定电枢电流时电枢反应的励磁电流分量(i_{fa})应为三相稳态短路特性上对应额定电枢电流的励磁电流与空载饱和特性上对应额定电枢电流在 x_p 上压降的励磁电流之差(图 17)。由向量 i_{fp} 终端平行于电枢电流向量的向量 i_{fa}。额定励磁电流 i_{fN} 即为 i_{fp} 和 i_{fa} 的向量和。

若保梯电抗 x_p 未知，则在作图 18 时可用(αx_a)代替 x_p，此时 x_a 为抽出转子时测得的电枢电抗，α 为系数，若无过去类似结构电机更加准确的经验数据，则凸极电机可采用 1.0，隐极电机可采用 0.6(0.65)。

12.6.1 抽出转子试验在额定频率的三相电压加在电枢绕组线端时进行。外施电压选得使电枢电流接近额定值，试验时测量端电压(U)、线电流(I)和输入有功功率(P)。

12.6.2 抽出转子后的电枢电抗(X_a)用下式求得。

$$X_a = \sqrt{Z^2 - R^2}, \Omega \qquad \cdots\cdots(66)$$

式中：

$$Z = \frac{U}{\sqrt{3}I}, \Omega; R = \frac{P}{3I^2}, \Omega;$$

$$\left[x_a = \sqrt{z^2 - r^2}; z = \frac{u}{i}; r = \frac{p}{i^2}\right]。$$

12.7 用 ASA 图确定额定励磁电流

为了用 ASA 图(图 19)确定额定励磁电流，要利用空载饱和特性、三相稳态短路特性和保梯电抗。

按 12.6 确定电势 e_p。由空载饱和特性确定额定电枢电压时对应气隙线的励磁电流(i_{fg})。由原点沿横坐标轴量取 i_{fg} 向量。从其终端与垂直线向右成额定功率因数角 φ_N(过励发电机取正)作在三相稳态短路特性上对应额定电枢电流的励磁电流向量 i_{fk}。

(Δi_f)为空载饱和特性上对应电压 e_p 的励磁电流(i_{fp})与其气隙线上对同一个 e_p 的励磁电流(i_{fep})之差(图 19)，在两个励磁电流(i_{fg}，i_{fk})的向量和延长线上加上对应 Δi_f 的向量，则这三个向量的和即为额定励磁电流。

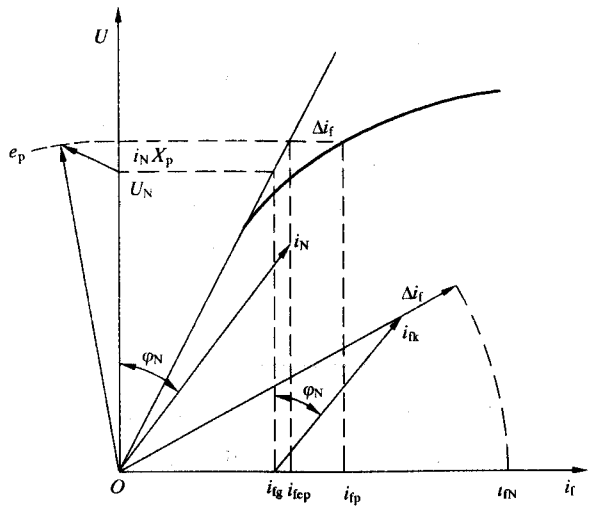


图 19

额定励磁电流也可用下式(按标么值或物理值)确定

$$i_{fN} = \Delta i_f + \sqrt{(i_{fg} + i_{fk}\sin\varphi_N)^2 + (i_{fk}\cos\varphi_N)^2} \quad \cdots\cdots(67)$$

若保梯电抗未知,则在作图 19 时可用 αx_a 来代替。

12.8 用瑞典图确定额定励磁电流

为了用瑞典图确定额定励磁电流,要用到空载饱和特性、三相稳态短路特性和零功率因数(过励)时对应额定电压和额定电枢电流的励磁电流。

在横坐标轴上量取三个励磁电流值(图 20):

OD 为空载特性上对应额定电压的励磁电流;

OB 为对应零功率因数时额定电压和电枢电流的励磁电流;

OC 为稳态短路特性上对应额定电枢电流的励磁电流。

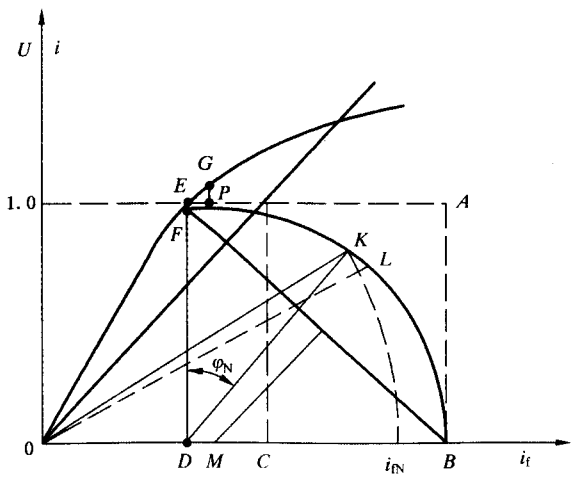


图 20

由 D 点作横坐标的垂线 FD,并量取其长度等于 $1.05OC$。连接 F 点和 B 点,作 FB 的垂直平分线,与横坐标交于 M 点。以 M 点为圆心,画一圆弧通过 F 和 B 点。

由 D 点并与 FD 成功率因数角 φ_N(对过励发电机取正)引一直线,与弧 FB 相交于 K 点。OK 的长度即为该电机的额定励磁电流。

必要时，可按下列方法计及电枢电阻压降的影响。

PG 为额定电流下正序电枢电阻压降，EP 为空载电压增加 PG 所需的励磁电流分量。沿 FKB 圆弧量取 KL，使其长度等于 EP。OL 的长度即为所求的励磁电流。

当被试电机作为电动机运行时，正序电枢电阻压降应由 E 点向下量取，L 点在 K 点的左侧量取。

如果没有零功率因数下额定电压及额定电流所对应的励磁电流，则使用瑞典图时，可用下述方法确定其数值。沿纵坐标轴将额定电枢电流下的压降 αx_a 加在额定电枢电压上(见图 17 中 H 点)。

由 H 点作一直线平行于横坐标轴，与空载特性交于 H 点。由 H 点向横坐标轴作垂线交于 D 点(图 17)。由 D 点沿横坐标轴加向量 i_{fa}(其长度为 DB)。这样，OB 长度所表示的励磁电流就是用瑞典图作图时所要用到的电流。

12.9 反励磁试验

进行此试验时，电机与电网并联，作空载运行。励磁电流平稳地降低到零，变换其极性，然后再逐渐增加，直到电机滑行一个极距。在试验过程中测量电压、电枢电流和励磁电流值，直到电机开始滑行。

12.10 用反励磁试验确定 X_q

用反励磁试验确定 X_q 时，应用下列公式(标么值或物理值)确定：

$$x_q = (x_d)\frac{u_r}{u_r + (e)} \qquad \cdots\cdots (68)$$

式中：

(e)——电机滑行一个极距时励磁电流 i_{fr} 所对应的空载电势；它由通过对应于滑行瞬间电压那点所作的直线化空载特性确定(图 21)；

u_r——滑行瞬间的电压；

x_d——由同一直线化空载饱和特性所确定的直轴同步电抗。

若在试验时测得电机滑行一个极距那个瞬间的电枢电流(i_r)，则用下式确定 x_q

$$X_q = \frac{U_r}{\sqrt{3}I_r},\Omega;\left[x_q = \frac{u_r}{i_r}\right] \qquad \cdots\cdots (69)$$

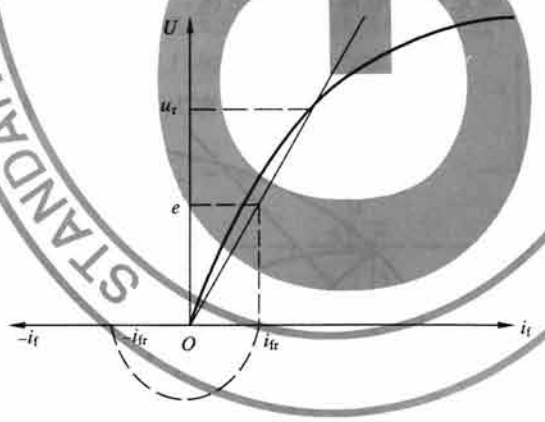


图 21

由于饱和的影响，用此试验求得的 x_q 值，随 u_r 值而变化。为求得非饱和值，外施电压往往需要降低到 0.6 倍额定值，或者更低。

12.11 低转差率试验

做低转差率试验时，在被试电机的电枢出线端外施三相对称低电压($0.01U_N \sim 0.2U_N$)。所选电压应使电机不致被牵入同步。励磁绕组应开路，转子应由原动机拖动，转差率小于 0.01，对实心转子电机，则应远小于此值，这样使电机在异步运行时，阻尼回路中感生的电流对测量的影响忽略不计。当电源合闸和断开时，励磁绕组应当是闭合的(短路或通过放电电阻)，以免可能引起的损坏。用指示式仪表

测量或用录波器记录电枢电流、电压、集电环电压和转差率。若试验前测得的剩磁电压超过试验电源电压的 0.3 倍，则应对转子去磁。去磁方法：可以把励磁绕组接到一个低频电源上，电流约为被试电机空载额定电压励磁电流的 0.5 倍左右，并逐渐降低幅值和频率(如果后者有可能的话)。

12.12 用低转差率试验确定 X_q

用低转差率试验确定 X_q 时，应在最大励磁绕组电压(U_{fo})下测定电枢电流和电压，并用下式计算 X_q

$$X_q = \frac{U_{min}}{\sqrt{3}I_{max}},\Omega;\left[x_q = \frac{u_{min}}{i_{max}}\right] \quad \cdots\cdots(70)$$

注：若 I_{max} 与 U_{min} 不在同一时刻发生，则计算中用 I_{max} 为基点及与它相对的电压。

试验时，若电机的剩磁电压(U_{res})在试验电源电压的 0.1～0.3 倍范围内，则用下式确定电流值

$$I_{max} = \sqrt{I_{av}^2 - \left(\frac{U_{res}}{\sqrt{3}X_d}\right)^2},A;\left[i_{max} = \sqrt{i_{av}^2 - \left(\frac{u_{res}}{x_d}\right)^2}\right] \quad \cdots\cdots(71)$$

式中，I_{av} 为电流包络线上两个相邻最大值之和的一半(图 22)。

可用下述方法对测得值进行校核，即由同一试验，利用开路励磁绕组电压为零时的电压和电流测量结果计算 X_d，并将它与其真实值相比。此时

$$X_d = \frac{U_{max}}{\sqrt{3}I_{min}},\Omega;\left[x_d = \frac{u_{max}}{i_{min}}\right] \quad \cdots\cdots(72)$$

当剩磁电压小于试验电源电压的 0.3 倍时，I_{max} 为包络线两个相邻最小值之和的一半。

用低转差率试验求得的 X_q，只有在从这个试验中求得的 X_d 值与按 12.2 所得的 X_d 值基本相符时，才能认为是准确的。否则，试验应在几个不同的低转差率值下反复进行，然后用外推法求得零转差率时的 X_q 值。用此方法求得的交轴同步电抗实际上是非饱和值。

12.13 用负载试验测定功角 δ

试验在电机与电网并联运行时进行。额定功率因数时电机的负载不应小于额定有功功率的 0.5 倍。试验时，测量电枢电流(i)、电压(u)、电压和电流间夹角 φ(用两瓦特表法)以及功角 δ(端电压与电势间夹角)。功角可用闪光测频法或其他准确方法测量。

12.14 用负载试验测定功角法确定 X_q

用测功角法确定 X_q 时，用下列公式

$$X_q = \frac{U\mathrm{tg}\delta}{\sqrt{3}I(\cos\varphi - \sin\varphi\mathrm{tg}\delta)},\Omega;\left[x_q = \frac{u\mathrm{tg}\delta}{i(\cos\varphi - \sin\varphi\mathrm{tg}\delta)}\right] \quad \cdots\cdots(73)$$

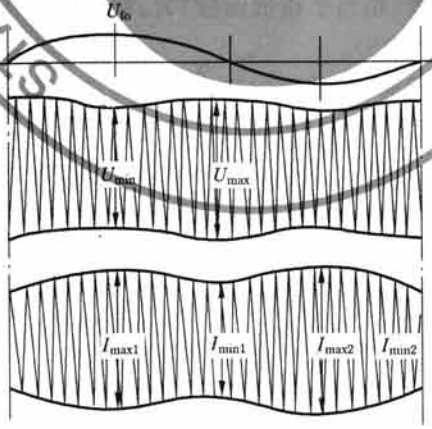


图 22

12.15 三相突然短路试验

为测定同步电机参数而做的三相突然短路试验在额定转速下进行。电机在所需空载电压下运行时，将电枢绕组短路。电机的励磁通常是由配套励磁机供给的，该励磁机必须采用他励。若不能采用它的配套励磁机，则可用另外的励磁机，但其额定电流值至少应为被试电机空载励磁电流的两倍，而电枢电阻不大于主机励磁机电枢电阻，该励磁机应为他励。

应使三相基本上在同一时刻短路，各相触头应在彼此不超过 15°电角度内闭合。当电枢直流分量无关紧要时，也可超过上述值。要用无感分流器、空心互感器或其他合适的电流互感器测量短路电流。后者在只涉及交流电流分量时应用，并应选得使短路电流的超瞬态分量初始值在互感器特性的线性部分。

通过积分放大器把空心互感器接到录波器上。若仅需确定短路电流分量的最大非周期值与周期值，则可用积分示波式检流计。

测量仪器及其接到电流互感器次级回路引线的总电阻不应超过该互感器所容许的额定值。

在短路前瞬间测定电机端电压、励磁电流和励磁绕组温度。

为求得对应电机非饱和状态下的参数，应在 0.1～0.4 倍额定值的几个不同电枢电压下完成本试验。每次试验都求出各种参数，并绘出对它们交流瞬态或超瞬态电枢电流初始值的关系曲线。由这个关系求得额定电枢电流时所需的各种参数。

为求得对应电机饱和状态下的参数，试验应在短接电枢绕组前电机端电压为额定值时进行。

若突然短路不能在额定电压下，则建议在几个不同电枢电压（例如 0.3、0.5 和 0.7 倍额定电压）下进行试验并对每次试验求得各种参数。绘出它们对短路前开路电压的关系曲线，并用外推法求得额定电枢电压下参数的近似值。

为测定电机参数，应录取每相电枢电流和励磁电流的波形。

短路后录波器的连续记录时间不应小于 $T_d'+0.2s$。待稳定工况建立后应再起动录波器记录稳定值。标定用的最终值应用仪表测定。若根据类似电机的试验已知电流按指数函数衰减，则录波图可取得短一些。

用三相短路录波图求得每相非周期性与周期性电枢电流分量随时间的变化关系，即分别以各相短路电流上下包络线纵坐标的代数和之半与代数差之半求得。

短路时电枢电流周期性分量按三个相电流的周期性分量的算术平均值求得。

为求得瞬态（$\triangle i_k'$）和超瞬态（$\triangle i_k''$）分量，由电枢电流周期性分量曲线上减去稳态短路电流值 $i(\infty)$。余数是 $\triangle i_k'+\triangle i_k''$ 之和，将它画在半对数坐标线上。画出的线可能是直线也可能是曲线。

a) 当该线的下半部分为直线（相当于指数函数）时，将该直线外推至 $t=0$，即得短路电流中瞬态分量的初始值 $\triangle i_k'(0)$（图 23）。

b) 当该线的下半部分为曲线时，先是取时间 OA' 所对应得电流 i_A 的幅值，OA' 取为 0.2 s 或取超瞬态影响开始可以忽略不计的那个时间，再量取 $i_B=i_A/\varepsilon$ 所对应的时间 OB'。时间常数 T_d' 取为（$OB'-OA'$）s。通过 i_B 和 i_A 两电流值的直线即是 $\triangle i_k'$ 的等值线，把该直线外推到 $t=0$ 时，即得短路电流瞬态分量的初始值 $\triangle i_k'(0)$（图 24）。

把超瞬态短路电流分量定义为 $\triangle i_k'+\triangle i_k''$ 曲线与 $\triangle i_k'$ 等值衰减曲线之间的差值。把超瞬态电流分量随时间的变化也绘制在半对数坐标纸上（图 23）。

把各相非周期电流分量与时间的关系画在半对数坐标纸上。外推各曲线至 $t=0$ 得到各对应电流的初始值。

为求得非周期性分量的最大可能值，把用外推法求得的各相非周期性分量初始值画成自原点出发的三个向量（图 25），其中最大的一个向量位于中间，其他两个向量与它各成 60°夹角。由各向量的终端画一垂线，三个垂线相互相交，构成一个三角形。由原点向三角形中心引一向量。该向量即为非周期性分量的最大可能值，它等于周期性分量幅值的初始值。

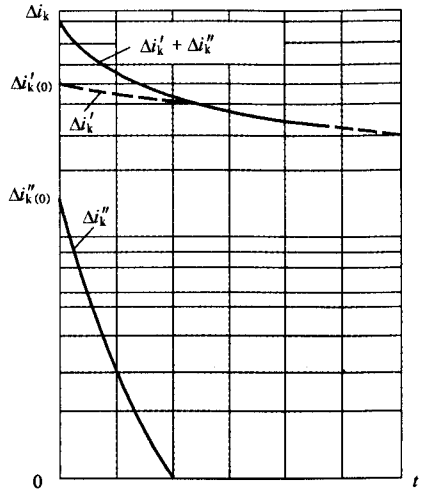


图 23

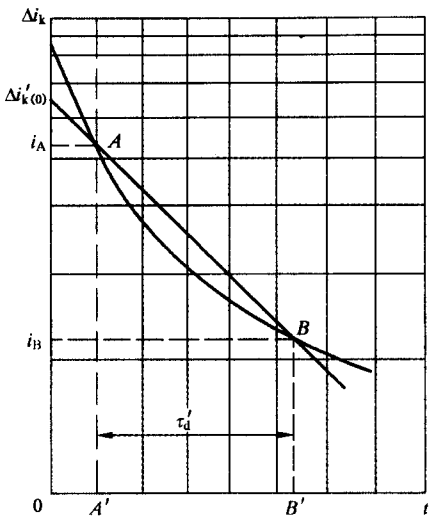


图 24

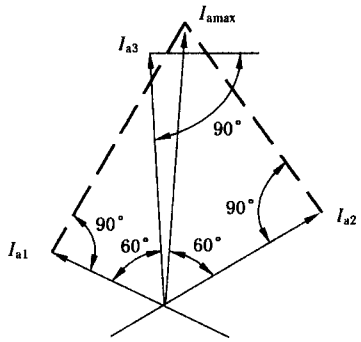


图 25

可用下式求得电流非周期性分量的最大可能值(标么值或物理值)

$$i_{a\,max} = \frac{2}{\sqrt{3}} \sqrt{i_{a2}^2 + i_{a3}^2 + i_{a2}\, i_{a3}} \qquad \cdots\cdots\cdots\cdots (74)$$

式中，i_{a3}为试验求得的电流非周期性分量的最大初始绝对值(即不管其正负)，i_{a2}为其余两相中任意一相电流非周期性分量的初始绝对值。励磁电流中周期性分量随时间变化的函数由励磁电流录波图确定，并画在半对数坐标纸上，外推曲线至$t=0$，得到周期性分量初始值。

12.16 由三相突然短路试验确定参数

当用突然短路试验确定直轴瞬态电抗时，它是短路前瞬间测得的空载电压[$u(0)$]与忽略超瞬态分量后短路电流周期性分量初始值之比(见图23)

$$X_d' = \frac{U(0)}{\sqrt{3}[I(\infty)+\Delta I_k'(0)]},\Omega;\left[x_d' = \frac{u(0)}{i(\infty)+\Delta i_k'(0)}\right] \quad \cdots\cdots(75)$$

12.16.1 当用突然短路试验确定直轴超瞬态电抗时，它是短路前瞬间测得的空载电压与录波图分析得到的短路电流周期性分量初始值之比(图23)

$$X_d'' = \frac{U(0)}{\sqrt{3}[I(\infty)+\Delta I_k'(0)+\Delta I_k''(0)]},\Omega;\left[x_d'' = \frac{u(0)}{i(\infty)+\Delta i_k'(0)+\Delta i_k''(0)}\right] \quad \cdots\cdots(76)$$

12.16.2 当用三相突然短路试验确定直轴瞬态短路时间常数时，它是瞬态电枢电流分量自初始值衰减到$1/\varepsilon\approx0.368$初始值时所需的时间。

12.16.3 当用三相突然短路试验确定直轴超瞬态短路时间常数时，它是超瞬态电枢电流分量自初始值衰减到$1/\varepsilon\approx0.368$初始值时所需的时间。

12.16.4 电枢短路时间常数是按照励磁电流周期性分量自初始值衰减到$1/\varepsilon\approx0.368$初始值时所需的时间来确定。

12.16.5 当用各相电枢电流非周期性分量的衰减来确定电枢短路时间常数时，取它为各相非周期性分量自初始值衰减到$1/\varepsilon\approx0.368$初始值时所需时间的平均值。若某一相的非周期性分量初始值小于求得的最大初始值的0.4倍时，则在确定电枢短路时间常数时不予考虑。

若在突然短路试验中电枢电流是用无感分流器测量的，则允许用非周期性电枢电流分量的衰减来确定电枢短路时间常数。

12.16.6 当用三相突然短路试验确定最大可能瞬时初始短路电流值时，它等于短路瞬间以后半个周波时的周期性分量与非周期性分量之和。

这个瞬间的周期性分量值等于突然短路电流的稳态分量、瞬态分量及超瞬态分量之和。

后两个分量直接由图23对相应瞬间取得。

非周期性分量用下式确定(标么值或物理值)

$$i_a = i_{a\max}e^{-\frac{0.5}{f\tau_a}} \quad \cdots\cdots(77)$$

式中：

$i_{a\max}$——突然短路非周期性分量的最大可能值；

e——自然对数的底数；

τ_a——电枢短路时间常数；

f——频率，Hz(每秒周波数)(0.5/f相当于半个周波)。

12.17 电压恢复试验

切除三相稳态短路后的电压恢复试验在额定转速下运行的电机上进行，在试验开始阶段，电枢绕组被断路器短路着。

电机在电枢短路时运行，励磁电流限定在一个对应空载饱和特性直线部分的值，通常不超过空载额定电压的0.7倍，并且在操作断路器瞬间各种条件均处于稳定。

由该试验获得的各种参数对应电机的不饱和状态。对励磁系统的要求与第12.15节相同。

应基本上在同一时刻切除三相稳态短路，各电流在不超过180°电角度或半周期内切断。需摄录一线电压恢复过程和一电枢电流的录波图(起始部分要用高速档)。

把稳态电压与用恢复电压包络线确定的电压之间的差值随时间变化的关系曲线画在半对数坐标纸上，并把曲线外推到短路切除的瞬间(图26，曲线1)。

把曲线 1 的直线部分外推到纵坐标轴，得到电压瞬态分量的初始值$\triangle u'(0)$。

用曲线 1 确定的电压与瞬态电压分量($\triangle u'$)之间的差值给出各相应时刻的超瞬态电压分量($\triangle u''$)。

12.18 用电压恢复试验确定参数

当用电压恢复试验确定直轴瞬态电抗时，它是稳态电压$U(\infty)$和瞬态电压分量的初始值$\triangle u'(0)$之差与短路切除前瞬间测得的电枢电流(i_k)之比(图 26)

$$X_d' = \frac{U(\infty) - \Delta U'(0)}{\sqrt{3} I_k}, \Omega; \left[x_d' = \frac{u(\infty) - \Delta u'(0)}{i_k} \right] \quad \cdots\cdots (78)$$

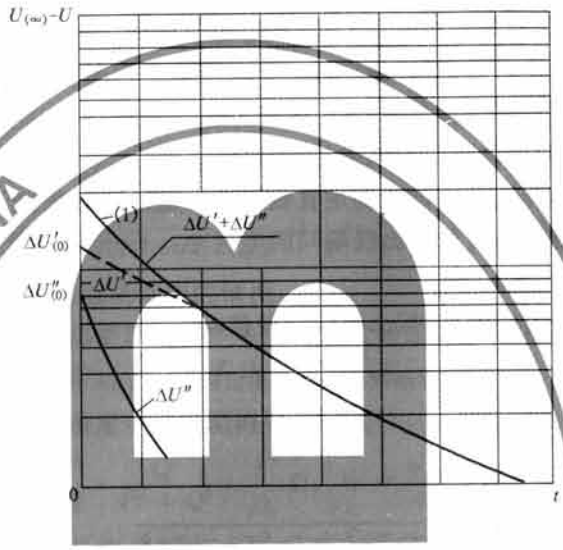


图 26

12.18.1 当用电压恢复试验确定直轴超瞬态电抗时，它是稳态电压$U(\infty)$与瞬态电压初始值$\triangle u'(0)$和超瞬态电压初始值$\triangle u''(0)$之和的差对短路切除前瞬间测得的电枢电流(i_k)之比(图 26)。

$$X_d'' = \frac{U(\infty) - [\Delta U'(0) + \Delta U''(0)]}{\sqrt{3} I_k}, \Omega; \left[x_d'' = \frac{u(\infty) - [\Delta u'(0) + \Delta u''(0)]}{i_k} \right] \quad \cdots\cdots (79)$$

12.18.2 当用电压恢复试验确定直轴瞬态开路时间常数时，它是瞬态电压分量$\triangle u'$自初始值衰减到$1/\varepsilon \approx 0.368$初始值时所需时间。

12.19 转子相对电枢绕组磁场处于直轴和交轴位置时的外施电压试验

试验时，在电枢绕组的任意两个端子间外施额定频率的交流电压。

励磁绕组应短接。应限制加电压时间，以免实心部分严重过热。

慢慢转动转子，以找出最大励磁电流及励磁电流基本为零的转子位置。前者为直轴位置，后者为交轴位置。当转子停在上述两个位置时，分别测量电源电压、电枢电流和输入功率。励磁绕组电流是为判断转子位置(直轴和交轴)而测量的，因此不必选用很高精度的仪表来测量它。

若不能在额定电枢电流或电压下进行试验，则必须用不同的电源电压$(0.2 \sim 0.7)U_N$做几次试验，以确定被试电机在非饱和或饱和状态下的参数。

把各参数对外施电压或电枢电流绘制曲线，然后用外推法求得各所需值。

对采用闭口或半闭口电枢槽和闭口阻尼绕组槽的电机，外施电压不应低于额定值的 0.2 倍。

12.20 用转子相对电枢绕组磁场直轴和交轴位置时的外施电压试验测定参数

用外施电压法确定直轴超瞬态电抗用下式计算

$$X_d'' = \sqrt{Z_d''^2 - R_d''^2}, \Omega \quad \cdots\cdots (80)$$

式中：

$$Z_d'' = \frac{U}{2I}, \Omega; R_d'' = \frac{P}{2I^2}, \Omega$$

$$\left[x_d'' = \sqrt{z_d''^2 - r_d''^2};z_d'' = \frac{\sqrt{3}}{2}\frac{u}{i};r_d'' = \frac{3}{2}\frac{p}{i^2}\right]$$

电压 U、电流 I 和输入功率 P 各值是在转子处于最大励磁电流位置时测得的。

12.20.1 用外施电压法确定交轴瞬态电抗，用第 12.20 节的公式，但注脚 d 应一律改为 q。

电压、电流及输入功率各值是在转子处于励磁电流基本为零的位置所测得的。

12.21 当转子处于任意位置时的外施电压试验

试验时，电机处于静止状态，在电枢绕组每对端子间依次外施交流电压。

励磁绕组应短接。在三次加电压时转子位置应保持不变。

必要时，应堵转转子。应限制加电压时间，以免实心部分严重过热。

在每对端子间外施交流电压时，测量外施电压、电流、输入电枢的功率及励磁电流。

求电机在非饱和或饱和状态下各参量所需条件与第 12.19 节相似。

12.22 用转子处于任意位置时的外施电压试验确定参数

用转子处于任意位置时的外施电压试验确定直轴超瞬态电抗的方法如下：

按第 12.20 节公式计算电枢绕组每对出线端间的电抗 x_{12}、x_{23} 和 x_{31}（原式中注脚“d”根据外施电压的出线端分别以 12、23 和 31 代替）。

然后可用下式计算直轴超瞬态电抗（标么值或物理值）

$$x_d'' = x_{med} \pm \Delta x \qquad \cdots\cdots(81)$$

式中：

$$x_{med} = \frac{x_{12} + x_{23} + x_{31}}{3}$$

$$\Delta x = \frac{2}{3}\sqrt{x_{12}(x_{12} - x_{23}) + x_{23}(x_{23} - x_{31}) + x_{31}(x_{31} - x_{12})}$$

按下述关系确定 $\triangle x$ 前的符号：若在励磁回路中测得的三个电流中的最大值与测得的最大电枢电抗相对应，则取正号（+）；若在励磁回路中测得的三个电流中的最大值与在一对电枢绕组端子间测得的最小电抗值相对应，则取负号（−）。

12.22.1 用转子处于任意位置的静止阻抗试验确定交轴超瞬态电抗的方法与第 12.22 节所述的方法类似。

按下列关系确定 $\triangle x$ 前的符号：若在励磁回路中测得的三个电流中的最小值与测得的最大电枢电抗相对应，则取正号（+）；若在励磁回路中测得的三个电流中的最小值与测得的最小电抗值相对应，则取负号（−）。

12.23 两相稳态短路试验

为进行两相稳态短路试验，将任意两个端子短接（图 27），并用某种原动机把被试电机驱动到额定转速下运行。

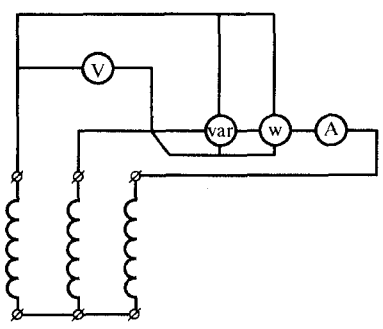


图 27

测量短路电流 I_{k2}、励磁电流和开路相与任一短路相间的电压 U_{k2}。

当存在谐波电压或电流时，为提高测量的准确度，建议测量有功功率 P 和无功功率 Q。

在几个短路电流值下进行测量。

为避免实心部分过热，当试验电流超过 $0.3I_N$ 时，两相稳态短路试验的时间应限制到测量仪表读数所需的时间。

对凸极电机，若其振动不超过允许值，则电流可一直增加到额定值。对隐极电机，则通常把电枢电流限制在 0.5 倍额定电流。

12.24 用两相稳态短路试验确定参数

用两相稳态短路试验确定负序电抗时，用下列公式

$$X_2 = \frac{P}{\sqrt{3}I_{k2}^2},\Omega;\left[x_2 = \sqrt{3}\frac{p}{i_{k2}^2}\right] \quad \cdots\cdots(82)$$

上式适用于当电压和电流谐波可以忽略不计的情况。

$$X_2 = \frac{U^2}{P}\cdot\frac{P^2}{P^2+Q^2}\cdot\frac{1}{\sqrt{3}},\Omega;\left[x_2 = \frac{u^2}{p}\cdot\frac{p^2}{p^2+q^2}\cdot\frac{1}{\sqrt{3}}\right] \quad \cdots\cdots(83)$$

上式适用于必须考虑电压和电流谐波的情况。

对测得的每一个短路电流，都要算出负序电抗。用这些试验数据画出 X_2 与电流的关系曲线。

注：取电流等于$\sqrt{3}$倍额定电流时的 X_2 值作为额定电流时的负序电抗值。

12.24.1 用两相稳态短路试验确定负序电阻时可用下式

$$R_2 = \frac{U^2}{Q}\cdot\frac{Q^2}{P^2+Q^2}\cdot\frac{1}{\sqrt{3}},\Omega;\left[r_2 = \frac{u^2}{q}\cdot\frac{q^2}{p^2+q^2}\cdot\frac{1}{\sqrt{3}}\right] \quad \cdots\cdots(84)$$

对测得的每个短路电流都要算出负序电阻。用这些试验数据画出负序电阻 R_2 与电流的关系曲线。

注：取电流等于$\sqrt{3}$倍额定电流时的 R_2 值作为额定电流时的负序电阻值。

12.25 逆相序试验

试验时把被试电机接到外施对称电压为$(0.02\sim0.2)U_N$ 的逆相序的外部电源并拖动到额定转速，此时，被试电机以转差率等于 2 的电磁制动方式运行。

励磁绕组应短接。

若被试电机的剩磁电压超过 0.3 倍电源电压，则试验前应把转子去磁。试验时测量所有三相电压、电流和输入功率。

12.26 用逆相序试验确定参数

用逆相序试验确定负序电抗和电阻时，用下列公式

$$X_2 = \sqrt{Z_2^2 - R_2^2},\Omega;Z_2 = \frac{U}{\sqrt{3}I},\Omega;R_2 = \frac{P}{3I^2},\Omega;$$

$$\left[x_2 = \sqrt{z_2^2 - r_2^2};z_2 = \frac{u}{i};r_2 = \frac{p}{i^2}\right] \quad \cdots\cdots(85)$$

式中：

P ——输入功率；

I ——所测电流平均值；

U ——所测电压平均值。

对每一个测得的电源电压算出负序电抗和电阻，用这些试验数据画出 X_2 和 R_2 与电流的关系曲线。

12.27 三相绕组外施单相电压试验

被试电机在额定转速或其附近运行，并在串联或并联的三相端子上外施单相电压，以进行该试验。

把电枢绕组出线端连接使得三相电流在任意瞬间均按同一方向流过，即按零序定义从中性点流向端子方，或相反。励磁绕组短接。

在几个电源电压值下测量电压、电流和输入功率。所选电源电压应能使电枢电流约为额定值。

12.28 用三相绕组外施单相电压试验确定参数

用在端子上外施单相电压试验确定零序电抗和电阻时，用下式

$$X_0 = \sqrt{Z_0^2 - R_0^2}\,,\Omega;\left[x_0 = \sqrt{z_0^2 - r_0^2}\right] \qquad \cdots\cdots(86)$$

在三相串联时

$$Z_0 = \frac{U}{3I}\,,\Omega;R_0 = \frac{P}{3I^2}\,,\Omega;\left[z_0 = \frac{1}{\sqrt{3}}\cdot\frac{u}{i};r_0 = \frac{p}{i^2}\right] \qquad \cdots\cdots(87)$$

在三相并联时

$$Z_0 = \frac{3U}{I}\,,\Omega;R_0 = \frac{3P}{I^2}\,,\Omega;\left[z_0 = 3\sqrt{3}\,\frac{u}{i};r_0 = \frac{9p}{i^2}\right] \qquad \cdots\cdots(88)$$

12.29 两相对中性点稳态短路试验

做两相对中性点稳态短路试验时，把电枢绕组接成星形且两个端子对中性点短接，把被试电机驱动到额定转速并加励磁(图 28)。

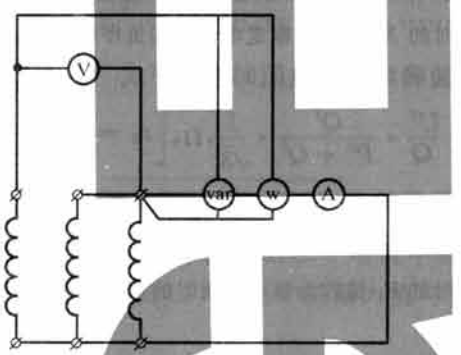


图 28

测量开路端子与中性点间的电压 U_0 和短路相端子与中性点间的电流 i_0。

为考虑谐波影响，测量有功功率和无功功率。

在几个中性线电流值下进行测量。电流值和试验时间要由转子过热或振动来加以限制。

12.30 用两相对中性点稳态短路试验确定参数

用两相对中性点稳态短路试验确定零序电抗时，用下式

$$X_0 = \frac{U_0}{I_0}\,,\Omega;\left[x_0 = \frac{3u_0}{i_0}\right] \qquad \cdots\cdots(89)$$

上式适用于当电压或电流谐波可以忽略不计的情况。

$$X_0 = \frac{U_0^2}{Q}\cdot\frac{Q^2}{P^2+Q^2}\,,\Omega;\left[x_0 = \frac{u_0^2}{q}\cdot\frac{q^2}{p^2+q^2}\right] \qquad \cdots\cdots(90)$$

上式适用于必须考虑电压或电流谐波情况，式中 U、P 和 Q 分别为测得的电压、有功功率、无功功率。

对几个中性线电流值计算零序电抗值。用这些试验数据画出 X_0 与中性线电流的关系曲线。

注：取中性线电流等于 3 倍额定相电流时的 X_0 值作为额定电流时的零序电抗值。

12.30.1 用两相对中性点稳态短路试验确定零序电阻时，用下列公式对几个中性线电流值计算：

$$R_0 = \frac{U_0^2}{Q}\cdot\frac{P^2}{P^2+Q^2}\,,\Omega;\left[r_0 = \frac{u_0^2}{p}\cdot\frac{p^2}{p^2+q^2}\right] \qquad \cdots\cdots(91)$$

用这些试验数据画出 R_0 与中性线电流的关系曲线。

注：取中性线电流等于3倍额定相电流时的 R_0 值作为额定电流时的零序电阻值。

12.31 电枢绕组开路时的励磁电流衰减试验

进行绕组开路时的励磁电流衰减试验，用某种原动机把被试电机驱动到额定转速，加励磁到额定电压。此时突然短接励磁绕组。必要时励磁绕组电源应在0.02 s内切除。

在试验时，可用一个限流电阻与励磁绕组相串联，以限制直流电源短路电流。

摄录电枢绕组电压、励磁电流和集电环电压的录波图。后者用于精确确定励磁电流衰减的起始瞬间(零时间)及此刻的初始电压值。

把由录波图量得的瞬态电压和电机剩磁电压间的差值与时间的关系绘在半对数坐标纸上。

12.32 用电枢绕组开路时的励磁电流衰减试验确定 T'_{do}

当用电枢绕组开路时的励磁电流衰减试验确定直轴瞬态开路时间常数时，它是第12.31节所述电压差自初始值衰减到 $1/\varepsilon\approx0.368$ 初始值时所需时间。

12.33 电枢绕组短路时的励磁电流衰减试验

进行电枢绕组短路时的励磁电流衰减试验时，用某种原动机把被试电机驱动到额定转速并使电枢电流为额定值，此时突然短接励磁绕组。稳态时间和电源短路电流值的限制按12.31。

摄录任一线电流和励磁电流或集电环电压的波形。

把由录波图量得的瞬态电流和剩磁电压产生的电流之间的差值与时间的关系绘在半对数坐标纸上。

12.34 用电枢绕组短路时的励磁电流衰减试验确定 T'_d

用电枢绕组短路时的励磁电流衰减试验确定直轴瞬态短路时间常数时，它是12.33中所述电流差自初始值衰减到 $1/\varepsilon\approx0.368$ 初始值时所需时间。

12.35 悬挂转子扭摆试验

进行此试验时把转子用一根或两根平行的钢丝悬挂起来，使其轴线铅直。扭动转子使它绕轴线扭摆。记录几次扭摆所需的时间，并计算一个扭摆周期所需的平均时间。

若只用一根钢丝悬挂，应做两次试验，一次用转子本体做，一次用转子与一个飞轮或一个起飞轮作用的皮带轮一起做。

单弦悬挂时的单向扭转角度不应超过45°，双弦悬挂时不超过10°。

12.36 用悬挂转子扭摆试验确定 T_j 和 H

应用悬挂转子扭摆试验时，用下式算出加速时间和储能常数

$$T_j = \frac{J\omega^2}{P_N}\times10^{-3},\text{s} \qquad \cdots\cdots(92)$$

$$H = \frac{J\omega^2}{2S_N}\times10^{-3},\text{s} \qquad \cdots\cdots(93)$$

式中：

J——转动惯量，$\text{kg}\cdot\text{m}^2$；

ω——$\pi n/30$，rad/s(角速度)；

n——额定转速，r/min；

P_N——额定有功功率，kW；

S_N——额定视在功率，kVA。

用下式计算转动惯量

单弦悬挂时

$$J = J_p\frac{T^2}{T_p^2-T^2},\text{kg}\cdot\text{m}^2 \qquad \cdots\cdots(94)$$

双弦悬挂时

$$J = \frac{T^2 a^2}{L} \cdot \frac{mg}{(4\pi)^2}, \text{kg} \cdot \text{m}^2 \quad \cdots\cdots (95)$$

式中：

J_P——已知的皮带轮转动惯量，$\text{kg} \cdot \text{m}^2$；

g——重力加速度，m/s^2；

T——转子扭摆周期，s；

T_p——带飞轮或皮带轮时的转子扭摆周期，s；

a——悬挂点之间的距离，m；

L——悬挂长度，m；

m——转子质量，kg。

12.37 辅助摆摆动试验

把一个辅助摆(一端固定一重物的杠杆)装在与平放的电机轴线成直角的平面内。摆的质量愈小愈好，是已知值。也可以把一个已知质量的重物附加在转子或皮带轮圆周上，以代替辅助摆。

把辅助摆从它的稳定位置偏移约 5°。测定摆动一次所需的时间。

本试验适用于装有滚珠或滚柱轴承的电机。

12.38 用辅助摆摆动试验确定 T_j 和 H

用辅助摆摆动试验确定加速时间和储能常数时，用 12.36 列出的公式计算。

用下式计算转动惯量

$$J = m_p L\left(\frac{T_p^2 g}{4\pi^2} - L\right), \text{kg} \cdot \text{m}^2 \quad \cdots\cdots (96)$$

式中：

m_p——辅助摆的质量，kg；

L——由转轴中心到辅助摆重心或到附在转子或皮带轮圆周上的重物重心的距离，m；

g——重力加速度，m/s^2；

T_p——摆动一个周期的时间，s。

12.39 空载自减速试验

进行空载自减速试验时，被试电机轴上没有额外的飞轮质量。被试电机由独立电源励磁，试验时，励磁保持恒定。

提高供电频率或用带离合器的原动机把被试电机升速到高于额定转速，然后切断电源。

本试验是测量当电机减速通过两个测定的相差$\triangle\omega$的转速间[比如说从 1.10～0.9(标么值)或从 1.05～0.95(标么值)]的自减速时间$\triangle t$。

12.40 用空载自减速试验确定 T_j 和 H

用空载自减速试验确定电机的加速时间和储能常数时，用下式计算

$$T_j = \omega_N \frac{\Delta t}{\Delta\omega} \cdot \frac{P_{mech} + P_{Fe}}{P_N}, \text{s} \quad \cdots\cdots (97)$$

$$H = \frac{\omega_N}{2} \cdot \frac{\Delta t}{\Delta\omega} \cdot \frac{P_{mech} + P_{Fe}}{S_N}, \text{s} \quad \cdots\cdots (98)$$

式中：

P_{mech}——额定转速时的机械损耗，kW；

P_{Fe}——额定转速下与试验电压相对应的铁心损耗，kW；

P_N——额定有功功率，kW；

ω_N——额定角速度，rad/s；

S_N——额定视在功率，kVA。

12.41 机械联结机组的有载自减速试验，而同步电机作电动机运行

进行试验时，电机作电动机运行。从电网断开前机组转速应为额定值。断开前的输入功率不应低于0.6倍额定功率，功率因数应接近1.0。在试验过程中，保持励磁恒定。

断开电源后，测定最初几秒钟内机组转速的变化。

画出转速与时间的关系曲线，在曲线的初始点画一切线。用该切线确定$\triangle t$间隔的转速变化$\triangle\omega$。

12.42 用同步电机作电动机运行的有载自减速试验确定 T_j 和 H

用同步电机作电动机运行的有载自减速试验确定电机连带负载在一起的加速时间和储能常数时，用下式计算

$$T_j = \omega_N \frac{\Delta t}{\Delta\omega} \cdot \frac{P_1 - (P_d + P_{cu})}{P_N}, s \quad \cdots\cdots (99)$$

$$H = \frac{\omega_N}{2} \cdot \frac{\Delta t}{\Delta\omega} \cdot \frac{P_1 - (P_d + P_{cu})}{S_N}, s \quad \cdots\cdots (100)$$

式中：

P_1——从电源切断前瞬间供给电动机的功率，kW；

$P_d + P_{cu}$——电源切断前瞬间的电枢绕组损耗(杂散损耗和铜耗)，kW；

ω_N——额定角速度，rad/s。

本方法的精度不高。

12.43 电机作发电机运行时的甩负载加速试验

进行试验时，用原动机拖动电动机作发电机运行。

试验前，把发电机负载设定在0.1～0.2倍额定负载(功率因数接近1.0)，原动机的调速器退出运行。

试验期间。应保持发电机励磁不变。发电机由电网突然被解列后，测定转速随时间变化的曲线。当转速约为1.07～1.1倍额定转速时，投入原动机调速器，或切断蒸汽供给。画出加速曲线。

在加速曲线上对应额定转速处画一切线，并确定间隔内的转速变化。

12.44 用电机作发电机运行时的甩负载加速试验确定 T_j 和 H

用电机作发电机运行时的甩负载加速试验确定电机及其原动机的加速时间和储能常数时，用下式计算

$$T_j = \omega_N \frac{\Delta t}{\Delta\omega} \cdot \frac{P_1}{P_N}, s \quad \cdots\cdots (101)$$

$$H = \frac{\omega_N}{2} \frac{\Delta t}{\Delta\omega} \cdot \frac{P_1}{S_N}, s \quad \cdots\cdots (102)$$

式中：

P_1——从电网断开前瞬间由发电机供给的功率，kW。

此方法的精度不高。

12.45 额定电压调整率 ΔU_N

在转速与励磁电流不变的条件下，由空载工况到额定负载工况发电机电枢端电压的变化。用额定电压的百分数表示。

额定电压调整率用以下方法确定：

直接测定法；用空载特性与试验得到的额定励磁电流作图求得。

12.46 用已知试验参数通过计算确定参数

参数 x_d'、x_d、T_{d0}'和 T_d'由下列关系式相互关联

$$x_d T_d' = x_d' T_{d0}' \quad \cdots\cdots (103)$$

此关系式用于根据 x_d和另外两个参数的已知值，确定 x_d'或 T_d'或 T_{d0}'。

12.46.1 用已知的试验数据 x_d''和 x_q''，用下式计算负序电抗 X_2

$$X_2 = \frac{X_d'' + X_q''}{2}, \Omega \qquad \cdots\cdots (104)$$

12.46.2 根据 IEC 60034-2《旋转电机，第二部分：损耗与效率的试验方法（牵引电机除外）》，在额定电流下测得的电枢绕组中 $3I^2R$ 损耗（P_{cu}）和杂散损耗（P_d），用下式计算电枢绕组的正序电阻

$$R_1 = \frac{P_{cu} + P_d}{3I_n^2}, \Omega; [r_1 = p_{cu} + p_d] \qquad \cdots\cdots (105)$$

式中：

R_1——值为测量损耗时绕组温度下的电阻。

12.46.3 根据已知的 x_2 和 r_a，用下式确定频率 f_N 时的电枢短路时间常数

$$T_a = \frac{x_2}{2\pi f_N r_a}, s \qquad \cdots\cdots (106)$$

注：用 x_2 的饱和值。

表 4 试验方法和相互关系

参数	试验名称	条号	饱和值和非饱和值	备注
X_d	空载饱和与三相短路试验	12.2	非饱和值	
K_c	空载饱和与三相短路试验	12.2		
X_q	反励磁试验	12.9	饱和值 非饱和值	优先采用
	低转差率试验	12.11	非饱和值	
	负载试验测定功角法	12.13	饱和值	
X_d'	三相突然短路试验	12.15	非饱和值 饱和值	优先采用
	电压恢复试验	12.17	非饱和值	
X_d''	三相突然短路试验	12.15	非饱和值 饱和值	优先采用
	电压恢复试验	12.17	非饱和值	
	转子处于直轴和交轴位置时外施电压试验	12.19	非饱和值 （饱和值）	
	转子任意位置外施电压试验	12.21	非饱和值 （饱和值）	
X_q''	转子处于直轴和交轴位置时外施电压试验	12.19	非饱和值 （饱和值）	
	转子任意位置外施电压试验	12.21	非饱和值 （饱和值）	
X_2	两相稳态短路试验	12.23	非饱和值	优先采用
R_2	两相稳态短路试验	12.23	非饱和值	优先采用
	逆相序试验	12.25	非饱和值	
X_0	三相绕组外施单相电压试验	12.27	非饱和值	优先采用
	两相对中性点稳态短路试验	12.29	非饱和值	
R_0	三相绕组外施单相电压试验	12.27	非饱和值	优先采用
	两相对中性点稳态短路试验	12.29	非饱和值	

表 4(续)

参数	试 验 名 称	条 号	饱和值和非饱和值	备 注
X_p	空载饱和试验、三相稳态短路试验和零功率因数时的过励试验	12.2 12.3		
R_a	电流表、电压表法或电桥法	4.2		
R_f	电流表、电压表法或电桥法	4.2		
R_1	正序电枢绕组电阻	12.45.2		见 IEC 60034-2
T_{do}'	电枢绕组开路时励磁电流衰减试验 电压恢复试验	12.32 12.17		优先采用
T_d''	三相突然短路试验 电枢绕组短路时励磁电流衰减试验	12.15 12.34		优先采用
T_d''	三相突然短路试验	12.15		
T_a	三相突然短路试验	12.15		
T_j	悬挂转子扭摆试验 辅助摆摆动试验 空载自减速试验 有载自减速试验-同步电机作电动机运行 甩负载加速试验-电机作发电机运行	12.35 12.37 12.39 12.41 12.43		
H	悬挂转子扭摆试验 辅助摆摆动试验 空载自减速试验 有载自减速试验-同步电机作电动机运行 甩负载加速试验-电机作发电机运行	12.35 12.37 12.39 12.41 12.43		
i_{fN}	直接测量法 向量作图法:保梯法 ASA 法 瑞典法	12.6 12.7 12.8		优先采用
ΔU_N	直接测量法 由空载饱和曲线和已知的 i_{fN} 作图	12.6 12.7,12.8		

附 录 A
（规范性附录）
空载短路法求取励磁绕组温升时的 $\Delta\theta$ 值

$\Delta\theta$ 值可近似按式(A.1)计算：

$$\Delta\theta = \frac{\Delta\theta_f(40-\theta_c)}{k+\Delta\theta_f+\theta_c} \qquad \text{(A.1)}$$

式中：

$\Delta\theta_f$——试验时测得的励磁绕组的温升，K；

θ_c——对应于 $\Delta\theta_f$ 时的冷却介质温度，℃；

k——见公式(13)。

$\Delta\theta$ 值也可由图 A.1 或 A.2 中取得，图 A.1 适用于铜绕组；图 A.2 适用于铝绕组。

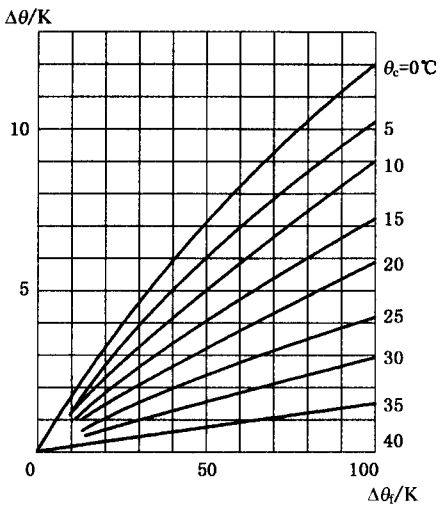


图 A.1

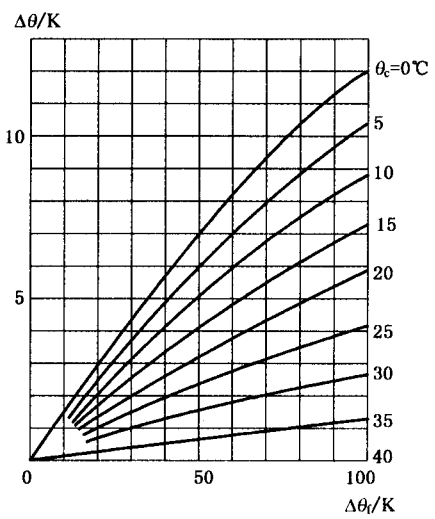


图 A.2

附 录 B
（资料性附录）
物理量的符号及单位

a_1——电枢绕组的并联支路数
a_2——励磁绕组的并联支路数
b_s——通风沟轴向宽度，m(米)
C——电容量，F(法)
f——频率，Hz(赫)
f_N——额定频率，Hz(赫)
H——储能常数，s(秒)
I——电流，A(安)
I_f——励磁电流，A(安)
I_{fN}——额定励磁电流，A(安)
I_{fo}——空载励磁电流，A(安)
$I_{f\sigma}$——额定电压时对应于气隙线的励磁电流，A(安)
I_K——短路电流，A(安)
I_N——额定电枢电流，A(安)
$\Delta I_K'$——短路电流瞬变分量，A(安)
$\Delta I_K''$——短路电流超瞬变分量，A(安)
J——转动惯量，$kg \cdot m^2$(千克·米)
k——温度系数
K_a——系数
K_c——短路比
K_{wa}——电枢绕组的绕组系数
K_{wf}——励磁绕组的绕组系数
L_c——悬丝长，m(米)
L_{Fe}——定子铁心总长，m(米)
m——质量，kg(千克)
N_c——测试线圈匝数
n——转数，r/min(转每分)
n_N——额定转速，r/min(转每分)
n_v——定子通风沟数
P——输出有功功率，kW(千瓦)
P_{cua}——电枢绕组中的 I^2R 损耗，kW(千瓦)
P_{cuf}——励磁绕组的 I^2R 损耗，kW(千瓦)
P_d——杂散损耗，kW(千瓦)
P_E——励磁机损耗，kW(千瓦)
P_f——励磁损耗，kW(千瓦)
P_{Fe}——额定电压时的铁耗，kW(千瓦)
P_{fw}——机械损耗，kW(千瓦)
P_{in}——输入有功功率，kW(千瓦)

P_M——电磁功率，kW(千瓦)
P_N——额定功率，kW(千瓦)
P_0——恒定损耗，kW(千瓦)
P_R——变阻器损耗，kW(千瓦)
P_{rs}——电刷的电损耗，kW(千瓦)
P_Z——整流元件的电气损耗，kW(千瓦)
P_{ZE}——自带励磁装置的损耗，kW(千瓦)
P——极对数
Q——无功功率，kvar(千乏)
q——每极每相分数槽数
q'——每一极距最大的整数槽数
R——电阻，Ω(欧)
R_0——零序电阻，Ω(欧)
R_1——正序电阻，Ω(欧)
R_2——负序电阻，Ω(欧)
R_a——电枢绕组的直流电阻，Ω(欧)
R_f——励磁绕组电阻，Ω(欧)
R_J——基准工作温度时的绕组直流电阻，Ω(欧)
S_N——(1)额定视在功率，kVA(千伏安)
(2)试验变压器的额定容量，kVA(千伏安)
T——(1)转矩，N·m(牛·米)，1kgf·m(千克力·米)=9.806 65N·m(牛·米)
(2)周期，s(秒)
(3)时间常数，s(秒)
T_a——电枢绕组短路时的非周期分量时间常数，s(秒)
T_d'——电枢绕组短路时的直轴瞬变时间常数，s(秒)
T_d''——电枢绕组短路时的直轴超瞬变时间常数，s(秒)
T_{do}'——直轴瞬变开路时间常数，s(秒)
T_j——加速时间，s(秒)
T_K——最高试验电压时测得的转矩，N·m(牛·米)
T_M——电磁转矩，N·m(牛·米)
T_{pi}——标称牵入转矩，N·m(牛·米)
T_{po}——失步转矩，N·m(牛·米)
THF——电话谐波因数
t——时间，s(秒)
U——电压，V(伏)
U_C——测试线圈电压，V(伏)
U_i——i 次谐波电压的有效值，V(伏)
U_N——额定电枢电压，V(伏)
U_{NT}——试验变压器的高压侧额定电压，V(伏)
U_0——折算到额定频率时的空载电压，V(伏)
ΔU——电压调整率
ΔU_N——额定电压调整率
ΔU_S——电刷上的压降，V(伏)

GB STANDARDS PRESS OF CHINA

ΔU_Z——整流元件的工作压降，V(伏)
$\Delta U'$——开路电压瞬变分量，V(伏)
$\Delta U''$——开路电压超瞬变分量，V(伏)
W——电枢绕组每相匝数
W_f——励磁绕组总匝数
X_0——零序电抗，Ω(欧)
X_2——负序电抗，Ω(欧)
X_d——直轴同步电抗，Ω(欧)
X_d'——直轴瞬变电抗，Ω(欧)
X_d''——直轴超瞬变电抗，Ω(欧)
X_p——保梯电抗，Ω(欧)
X_q——交轴同步电抗，Ω(欧)
X_q''——交轴超瞬变电抗，Ω(欧)
X_σ——电枢漏抗，Ω(欧)
Z_0——零序阻抗，Ω(欧)
Z_2——负序阻抗，Ω(欧)
Z_N——基值阻抗，Ω(欧)
θ——温度，℃(摄氏度)
$\Delta\theta$—— 温升，K(开)
$\Delta\theta_a$——电枢绕组温升，K(开)
$\Delta\theta_f$——励磁绕组温升，K(开)
$\Delta\theta_{Fe}$——定子铁心温升，K(开)
$\Delta\theta_K$——短路温升，K(开)
$\Delta\theta_0$——空转温升，K(开)
$\Delta\theta_U$——空载温升，K(开)
η——效率
φ——电压与电流间夹角
φ_N——额定功率因数角
δ——负载角，端电压与电势间夹角
δ_{stu}——自励恒压发电机稳态电压调整率
λ_i——相当于 i 次谐波频率的加权系数

STANDARDS PRESS OF CHINA
GB

中 华 人 民 共 和 国
国 家 标 准
三相同步电机试验方法
GB/T 1029—2005
*
中国标准出版社出版发行
北京复兴门外三里河北街16号
邮政编码:100045
网址 www.bzcbs.com
电话:68523946 68517548
中国标准出版社秦皇岛印刷厂印刷
各地新华书店经销
*
开本 880×1230 1/16 印张 3.75 字数 105 千字
2006年2月第一版 2006年2月第一次印刷
*
书号:155066·1-27040 定价 23.00 元

如有印装差错 由本社发行中心调换
版权专有 侵权必究
举报电话:(010)68533533

GB/T 1029-2005