

前 言

为了积极采用国际标准,尽快地适应国际间经济贸易发展和技术交流的需要,鉴于国家标准 GB 755—2000《旋转电机 定额和性能》等同采用 IEC 60034-1 标准,涉及电机的损耗、效率的内容引用了 IEC 60034-2 标准。因此,本部分等同采用 IEC 60034-2《旋转电机(牵引电机除外)确定损耗和效率的试验方法》(1972 年第 3 版包括 1995 年第 1 号修改,1996 年第 2 号修改)。

本部分的附录 A 是资料性附录。

本部分由中国电器工业协会提出。

本部分由全国旋转电机标准化技术委员会归口。

本部分由上海电器科学研究所负责起草,哈尔滨大电机研究所、上海电机厂、兰州电机有限责任公司、北京毕捷电机股份有限公司、重庆赛力盟电机有限责任公司、上海联合电机(集团)有限公司、河北电机股份有限公司、江苏清江电机股份有限公司、济南生建电机厂等单位参加起草。

本部分主要起草人:金惟伟、郭钟璠、肖兆波、瞿祖方、李宝金、刘金琰、富立新、谢家清、马维林、才家刚、周奇、崔华建、卜云杰、周国保、李录法。

旋转电机(牵引电机除外)确定损耗 和效率的试验方法

1 范围

本部分适用于国家标准 GB 755—2000 规定范围以内的所有直流电机、交流同步电机以及交流感应电机。其原理也适用于其他型式的旋转电机,如旋转变流机、交流换向器电动机以及交流单相感应电动机,这些电机通常采用其他方法确定损耗。

2 规范性引用文件

下列文件中的条款通过《旋转电机》的本部分的引用而成为本部分的条款。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部分,然而,鼓励根据本部分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部分。

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

GB/T 2900.25—1994 电工术语 旋转电机(neq IEC 50(411)1984)

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

GB/T 7676.1—1998 直接作用模拟指示电测量仪表及其附件 第1部分:定义和通用要求(idt IEC 51-1:1984)

IEC 34-17:1992 变频器供电笼型感应电动机应用导则

3 总则

3.1 目的

本部分旨在为确定效率而确立试验方法,也为因其他目的需要求得某些特定损耗时规定试验方法。

3.2 概述

试验应在完好的电机上进行,所有盖板均应按正常运行状态装好。对不属于电机本身的自动电压调节器的一些器件,除非另有协议,应使之处于不起作用的状态。

试验中所使用的测试仪表及其附件,如仪用互感器、分流器以及电桥,除非另有协议,其准确度应不低于0.5级;三相功率表及低功率因数功率表的准确度应不低于1级。

选用仪表时应注意使读数在有效量程以内,小于一格的数值占实际读数的百分比应极小,且应易于估计。

有可调节电刷的电机,电刷应置于相应规定定额时的位置。空载试验时,电刷可以放在中性轴线上。

转速可以用闪光测频法、数字计数计或转速表测定。在测定转差时,其同步转速应根据试验电源的频率来确定。

如测定整套机组的总效率或其输入功率,例如有二台电机的机组、或一台电机一台变压器、或一台发电机和一台原动机、或一台电动机和一台被拖动的机器,则没有必要指出其各个单元的效率。若效率为分别给定,也只能作为近似值看待。

3.2.1 符号

本部分所用符号的一般含义如下:

C :自减速常数

I :电流

I_1 :额定电压时的负载电流

I_{1r} :降低电压时的初级主电流

I_0 :额定电压时的空载电流

I_{0r} :降低电压时的空载电流

J :转动惯量

n :转速, r/min

n_N :额定转速

N :转轴的转数

P :能直接测量的损耗

P_1 :额定电压时吸收的功率

P_{1r} :降低电压时初级主绕组吸收的功率

P_{Fe} :按 4.1.2 a)、5.1.1 a)及 6.1.1 a)规定的铁耗

P_f :按 4.1.2 b)、4.1.2 c)、5.1.1 b)、5.1.1 c)、6.1.1 b)及 6.1.1 c)规定的风摩耗(即机械损耗)

P_k :短路损耗,等于符合 6.1.2 的负载状态下运行绕组的 I^2R 损耗及符合 6.1.4 的负载杂散损耗之和

P_t :自减速试验期间损耗之总和

S :转轴角位移

s :转差率

U :主变阻器端子间的励磁电压

U_e :总励磁电压

U_N :额定电压

U_r :负载试验时降低的电压

δ :转速与额定转速之差的标么值

φ :额定电压时的负载相位角

φ_r :降低电压时的负载相位角

φ_0 :额定电压时的空载相位角

φ_{0r} :降低电压时的空载相位角

3.3 定义

本部分中所用一般术语的定义应参照 GB/T 2900.25—1994《电工术语 旋转电机》。

本部分所用的主要术语,定义如下:

3.3.1

效率 efficiency

以同一单位表示的输出功率与输入功率之比称之为效率,通常以百分率表示。

3.3.2

总损耗 total losses

输入功率与输出功率之差

3.3.3

制动试验 braking test

当电机作为电动机运行时,用制动器或测功机测定轴上的转矩,同时测定其转速以确定该电机的输

出功率。当电机作为发电机运行时,用测功机确定输入的机械功率。

3.3.4

校准电机试验 *calibrated driving machine test*

将一台校准过的电机与被试电机机械耦合,由前者的输出或输入电功率来计算被试电机的输出或输入机械功率。

3.3.5

对拖试验 *mechanical back-to-back test*

将两台完全相同的电机机械耦合,根据一台电机的电输入与另一台电机的电输出之差(见图 1)计算两台电机的总损耗。

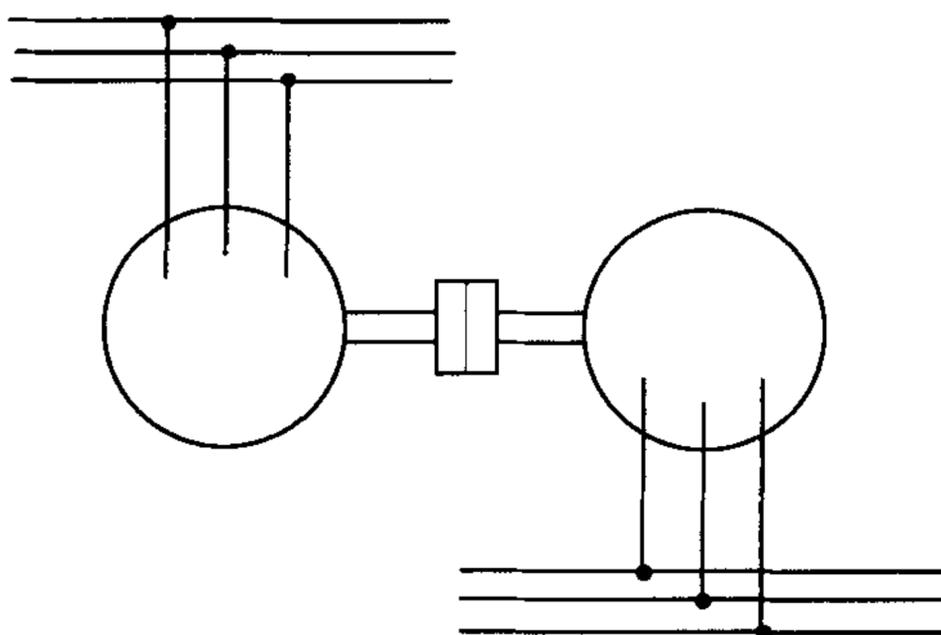


图 1 对拖试验

3.3.6

回馈试验 *electrical back-to-back test*

将两台完全相同的电机机械耦合并接在同一电源上,根据从电源吸收的功率输入确定两台电机的总损耗(见图 2)。

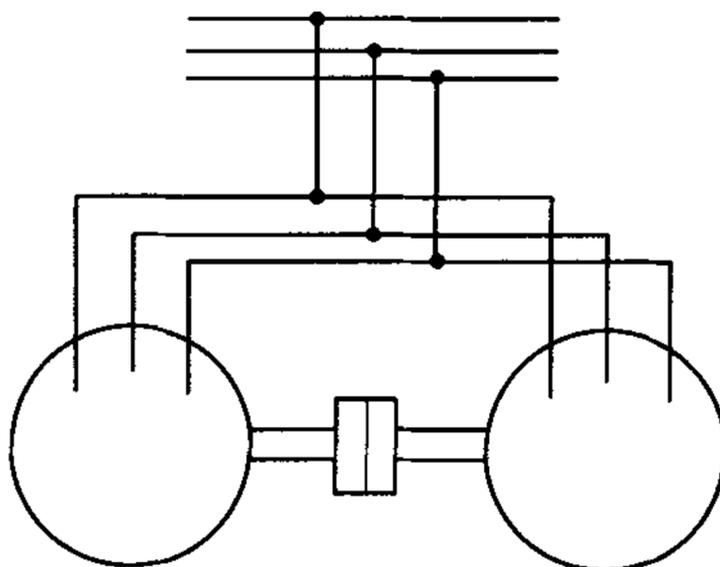


图 2 回馈试验

3.3.7

自减速试验 *retardation test*

当试验时只有某几项损耗存在,则这些损耗可从它的减速率推导出来。

3.3.8

热量法试验 calorimetric test

电机损耗由它产生的热量推导出来。由冷却介质的温升与流量之积,以及在周围介质中散出的热量,计算电机损耗。

3.3.9

空载试验 no-load test

电机作为电动机运转,轴上的有效机械输出为零。

3.3.10

开路试验 open-circuit test

电机作发电机运转,线端开路。

3.3.11

持续短路试验 sustained short-circuit test

电机作发电机运转,线端短路。

3.3.12

零功率因数试验 zero power factor test

同步电机作过励磁空载试验,功率因数接近于零。

3.4 基准温度

如无其他规定,所有 I^2R 损耗应换算到下述温度:

绝缘结构的热分级	基准温度/°C
A, E	75
B	95
F	115
H	130

如按照低于结构使用的热分级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温度。

4 直流电机

4.1 各项损耗

下列各项损耗之和为电机的总损耗。

4.1.1 励磁回路损耗

- a) 并励或他励绕组及励磁变阻器中的 I^2R 损耗。
- b) 励磁机损耗。

由主轴拖动并成为整台电机一个组成单元,专门作为主机励磁用的励磁机,它所产生除风摩耗以外的全部损耗,包括励磁回路中变阻器损耗,均属于励磁机损耗。

当励磁由独立电源供给时,如蓄电池、整流器或电动发电机组,则励磁电源内部的损耗或连接电源与电刷的接线中的损耗均不计入。

注:如需要他励系统的损耗,则应另行列出。可用励磁功率除以励磁系统效率,然后减去励磁功率而得。

4.1.2 恒定损耗

- a) 磁路中的铁耗以及其他金属件中的空载杂散损耗。
- b) 摩擦(轴承、电刷)耗,但不包括独立润滑系统中的损耗。公用轴承,不论是否随机供应,应单独列出其损耗。

注:如需要独立润滑系统中的损耗,则应单独列出。

- c) 总风耗,包括与电机成为一体的风扇及其他辅机(如有)所消耗的功率。其他与电机并不成为一体的辅机,如风机、水泵、油泵的损耗,虽然专供此电机使用,仅在协议有规定时才计入作为

损耗。

注：如需要独立通风系统的损耗，因为它不属于电机本身损耗的一部分，故应单独列出。

4.1.3 负载损耗

- a) 电枢绕组以及电枢电流流过的其他绕组(如换向绕组、补偿绕组、串励以及其他串接的绕组)所产生的 I^2R 损耗。
- b) 电刷的电损耗。

4.1.4 负载杂散损耗

- a) 由于负载而在铁心以及导线以外的其他金属件中引起的损耗。
- b) 电枢导线中由于与电流有关的磁通脉动和换向所引起的涡流损耗。
- c) 电刷中由换向引起的损耗。

注：这些损耗有时就称为杂散损耗。但并不包括第 4.1.2 a) 中所述及的空载杂散损耗。

4.2 效率确定

4.2.1 各项损耗的确定

根据下列各项损耗之和计算效率。确定各项损耗的方法如下：

4.2.1.1 励磁损耗

4.2.1.1.1 励磁绕组 I^2R 损耗

此损耗等于 I^2R 。其中 R 为并励绕组(或他励绕组)换算到基准温度的电阻； I 为励磁电流。除本节中 c) 项外，励磁电流均指额定转速、额定负载时的电流。对 c) 项，则指空载额定转速时的励磁电流。

如负载试验期间励磁电流无法测定，则应按下述方法取值：

- a) 对并励或他励发电机(不论有无换向极)，取电机的空载电压等于额定电压加电枢回路在额定电流时的电阻压降(包括电枢绕组、电刷，再加换向绕组(如有)，并参看 4.2.1.3.2)之和所对应的励磁电流的 110%。
- b) 对带有补偿绕组的并励或他励发电机，取电机的空载电压等于额定电压加电枢回路在额定电流时的电阻压降(包括电枢绕组、电刷、换向绕组和补偿绕组，并参看 4.2.1.3.2)之和所对应的励磁电流。
- c) 对平复励发电机，取空载额定电压时的励磁电流。
- d) 对过复励、欠复励、以及 a) 项到 c) 项所没有包括的特种型式发电机，由制造厂与用户协商决定。
- e) 对并励电动机，取额定电压时的空载励磁电流。

4.2.1.1.2 主变阻器损耗

此损耗等于 I^2R 。 R 为所考虑的定额情况下主变阻器在回路内的电阻， I 为 4.2.1.1.1 中所述的励磁电流，损耗也等于 IU ，即励磁电流 I 乘以主变阻器端子间的电压降 U 。

4.2.1.1.1 和 4.2.1.1.2 损耗之和为 IU_0 ， I 为励磁电流， U_0 为总励磁电压。

注：如励磁回路中有永久性串接电阻，则应视同主变阻器一样处理。

4.2.1.1.3 励磁机损耗

注：本节仅适用于由电机主轴拖动并专为电机励磁之用的励磁机。

励磁机从电机轴上吸收的功率减去其线端输出的有效功率(等于主机中 4.2.1.1.1 和 4.2.1.1.2 两项损耗之和)，即为励磁机损耗。如励磁机由独立电源励磁，则损耗中还要包括此励磁机的励磁损耗。

如励磁机可与主电机脱开并分别试验，则它所消耗的功率可用校准电机法测定。

如励磁机不能与主电机脱开，则测定励磁机吸收的功率可将主电机作为电动机空载运行，或用校准电机法试验(见 7.2)，或作自减速法试验(见 7.4)。在上述三种方法中，励磁机吸收功率等于该整台机组在下列两种相同的条件下所测得总损耗之差。一种使励磁机带负载，另一种励磁机不加励磁，主电机由独立电源供给励磁。

如上述方法都不适用,则可按 4.1 确定各项损耗,加上励磁机线端测得的功率而得励磁机所吸收的功率。但此时与主电机同时测得的机械摩擦耗与风耗不必计入。

4.2.1.2 恒定损耗

4.2.1.2.1 额定电压下空载试验

电机作为电动机空载运行,在额定电压下,调节励磁使转速保持额定值,然后测定其恒定损耗。励磁最好由独立电源供电。

电机吸收的总功率,减去电枢绕组和励磁绕组的 I^2R 损耗,即得全部恒定损耗。如带有同轴励磁机,励磁绕组 I^2R 损耗一项应由励磁机吸收的功率代替。

4.2.1.2.2 开路试验

恒定损耗可用一台校准电机拖动被试电机到额定转速而获得。被试电机作为发电机,调节其励磁(最好由独立电源供给)使空载电压等于额定电压,此时可由校准电机所吸取的功率求得被试电机轴上的输入功率,即为恒定损耗之总和。切除励磁,用上述同样方法即可获得摩擦耗与风耗。铁耗可从总恒定损耗减去风摩擦耗而得。从前述切除励磁时测得的损耗减去提升电刷后所得的损耗即得电刷摩擦耗。

4.2.1.2.3 自减速法试验

被试电机如具有大转动惯量,则总恒定损耗以及单项恒定损耗均可由自减速法试验求取。

4.2.1.3 负载损耗

4.2.1.3.1 电枢回路 I^2R 损耗

此损耗可由电流与测得并换算至基准温度的电阻计算而得。如因电阻太小不能测定时,可用计算法求得。

注:在本标题下电阻应包括补偿绕组、换向极绕组及分流电阻。如串励绕组与分流电阻并联,则 I^2R 损耗应用总电流和总电阻计算。

4.2.1.3.2 电刷电损耗

此损耗可由电枢电流乘一个固定压降而得。

所有炭质或石墨电刷每一极性的压降取 1 V;如系金属与炭混合的电刷取 0.3 V;即前者总压降为 2 V,后者为 0.6 V。

4.2.1.4 负载杂散损耗

除非另有规定,假定负载杂散损耗与电流平方成正比。在最大额定电流时其总损耗值为:

无补偿绕组电机:

电动机为额定输入的 1%;

发电机为额定输出的 1%;

有补偿绕组电机:

电动机为额定输入的 0.5%;

发电机为额定输出的 0.5%;

对恒速电机,合理的额定输入或输出值应取最大额定电流和最大额定电压时的输入或输出值。

对调压变速电动机,每一特定转速时的额定输入应取该转速时最大额定电流乘以此时的电压。

对削弱磁场以提高转速的变速电动机,则额定输入应取额定电压与最大额定电流时的输入。对用调节励磁保持恒压的变速发电机,额定输出应取额定电压与最大额定电流时的线端输出。相当于满磁场转速时的杂散损耗值应按前述规定,其他转速时的杂散损耗值用表 1 所列系数与其相乘计算。

表 1 不同速比时的系数

速比	系数
1.5 : 1	1.4
2 : 1	1.7
3 : 1	2.5
4 : 1	3.2

表 1 中第 1 栏速比指某一实际转速与连续运行的最低额定转速之比。

表 1 中没有列出的速比其相应的系数可用插入法求得。

注:负载杂散损耗可从输入-输出试验或回馈试验中求取,把所有已知损耗从总损耗中减除而得。

4.2.1.4.1 负载引起的铁耗变化

这种变化通常可以忽略不计。对特低电压电机,按专门协议,可按前述测定铁心中恒定损耗的方法测定 4.1.2a)和 4.1.4a)两项损耗之和。4.1.2a)项损耗可用下述两种方法之一测定:即作为空载电动机或空载发电机运行,但试验时不用额定电压,而用额定电压加(作为发电机时)或减(作为电动机时)因相关负载电流所引起的电枢压降。

4.2.1.4.2 静止电力变流器供电直流电动机的负载杂散损耗

当电枢电流的纹波因数(见 GB 755—2000 中 2.29)大于 0.1 时,除考虑 4.2.1.4 规定的杂散损耗外,还应考虑由电枢电流的交流成分所引起的附加损耗。

此附加损耗按上述交流成分的基波分量所引起的涡流损耗计算。

计算方法应按制造厂与用户协议规定。

4.2.2 总损耗测定

4.2.2.1 回馈试验(见 7.5)

两台相同的电机基本上按同样的额定状态运行,由电源供给的损耗可假定是平均分担的,故可按

4.2.2.2 计算效率

试验应在尽可能接近定额规定的时间终止时所达到的温度下进行。绕组电阻不必作温度修正。

4.2.3 直接测定效率

4.2.3.1 制动试验

当电机在额定转速、额定电压、额定电流下运行时,输出功率与输入功率之比就是效率。

试验应在尽可能接近定额规定的时间终止时所达到的温度下进行。绕组电阻不必作温度修正。

4.2.3.2 校准电机试验(见 7.2)

当电机在额定转速、额定电压、额定电流下运行时,输出功率与输入功率之比就是效率。

试验应在尽可能接近定额规定的时间终止时所达到的温度下进行。绕组电阻不必作温度修正。

4.2.3.3 对拖试验

两台相同的电机,在基本上同样的额定状态下运转,可认为损耗是平均分担的,故效率可根据总损耗之半和电输入(如系电动机)或电输出(如系发电机)求得。

试验应在尽可能接近定额规定的时间终止时所达到的温度下进行。绕组电阻不必作温度修正。

5 多相感应电机

5.1 各项损耗

下列各项损耗之和为电机的总损耗:

5.1.1 恒定损耗

a) 磁路中的铁耗以及其他金属件中的空载杂散损耗。

b) 摩擦耗(轴承、运行时不提升的电刷),但不包括独立润滑系统中的损耗。公用轴承,不论是否随机供给,应单独列出其损耗。

注:如需要独立润滑系统中的损耗,则应单独列出。

c) 总风耗,包括与电机成为一体的风扇以及辅机(如有)所消耗的功率。其它与电机并不成为一体的辅机,如风机、水泵、油泵的损耗,虽然专供此电机使用,仅在协议有规定才计入作为损耗。

注:如需要独立通风系统的损耗,应单独列出。

5.1.2 负载损耗

- a) 初级绕组的 I^2R 损耗。
- b) 次级绕组的 I^2R 损耗。
- c) 电刷中的电损耗(如有)。

5.1.3 负载杂散损耗

- a) 由于负载而在铁心以及导线以外的其他金属件中引起的损耗。
- b) 初级、次级绕组导线中由于与电流有关的磁通脉动所引起的涡流损耗。

注1:5.1.3 a)及 b)项中损耗有时称为杂散损耗,但并不包括 5.1.1 a)项的空载杂散损耗。

注2:对于由主轴拖动的进相机等辅助电机,其损耗可用与同步电机的励磁机损耗同样方法计算,单独驱动的进相机或调控设备的损耗应根据主电机的额定情况单独列出,这些损耗可根据有关设备的标准试验方法确定。

5.2 效率确定

5.2.1 各项损耗的确定

效率可由下列各项损耗之和计算求得。确定各项损耗的方法如下:

5.2.1.1 恒定损耗

5.2.1.1.1 额定电压下空载试验

5.1.1 a)、b)、c)三项恒定损耗之和可从电机作为电动机空载试验中求得。电机以额定电压与额定频率运行,从输入功率中减去初级绕组的 I^2R 损耗即得总恒定损耗,次级绕组中 I^2R 损耗可忽略不计。

5.2.1.1.2 校准电机试验(见 7.2)

各项恒定损耗可采用校准电机拖动被试电机到额定转速的方法(见 5.2.3.2)分别确定,被试电机与电源断开,如有电刷,应安置就位。此时被试电机轴上吸收的功率(由校准电机的输入电功率计算求得)即为被试电机 5.1.1 b)、c)两项损耗之和。如有电刷,提升后用同样方法再试,则可得轴承摩擦耗与全部风耗之和。5.1.1 a)项损耗可按 5.2.1.1.1 款试验所得的总损耗减去风摩耗求得。

5.2.1.1.3 调压空载试验

也可用另一试验方法将 5.1.1 a)项损耗与 5.1.1 b)、5.1.1 c)两项损耗之和分离。被试电机在额定频率,不同电压下作电动机运行,将电机的输入功率减去初级绕组中的 I^2R 损耗后的差值对电压平方作曲线。该曲线在电压较低部分为一直线,延伸该直线至电压为零,此时的损耗即为 5.1.1 b)和 5.1.1 c)两项损耗之和。

应注意,电压很低时,由于转差率增加,次级绕组损耗有所增加,因而所表现出来的损耗也偏高,在画直线时,这些点应舍弃。

如电动机启动时次级绕组短路并提升电刷(这是可能的,只要把供电发电机与被试电动机同时启动即可),则用上述同样的外推法,即可获得轴承损耗与总风耗之和。

注:绕线型异步电动机可仿照同步电机,将转子的两相(必要时三相)用直流励磁,则电机可作为同步电动机作空载试验。

5.2.1.2 负载损耗

5.2.1.2.1 负载试验

5.1.2 a)项损耗是用测得的初级绕组直流电阻换算到基准温度后的数值和相应的负载电流计算求得。

如用负载试验来确定 5.1.2 b)项损耗,则次级绕组损耗等于转差率乘以次级绕组的全部输入功率,也就是电机的输入功率减去 5.1.1 a)项的铁耗和 5.1.2 a)项初级绕组的 I^2R 损耗。采用这一方法,对绕线型电机,直接得出 5.1.2 b)、5.1.2 c)两项损耗之和,对笼型电机,直接求出 5.1.2 b)项损耗。对后一型式电机,因为无法直接测量其次级绕组的电阻和电流,所以这是唯一可行的办法。使用这一方法时,转差率可由闪光测频法测定,或在两滑环间(对绕线型电机),或在辅助线圈的线端间(对次级绕组短路的电机),或轴的两端间,接一永磁式毫伏计数其摆动次数而得。

5.2.1.2.2 计算值

对绕线型电机,5.1.2 b)项损耗可用换算到基准温度的直流电阻和由圆图或等效电路计算出来的电流计算求得,计算时要用电机的实际变比。所用的圆图型式应按制造厂与用户协议。

负载试验时,5.1.2 c)项电刷损耗是无法直接测量的,此损耗应以流过电刷的电流乘以一固定的压降而得,对炭质或石墨电刷,各相压降取 1 V,金属与炭混合制成的电刷则取 0.3 V。

5.2.1.2.3 降低电压时的负载试验

此法同样适用于笼型电机。

当降低电压时,如电机的转速保持不变,则电流约与电压成正比降低,功率约与电压平方成正比,当电压降低至额定值的一半时,电流也大约降为额定值一半,功率大约降为额定值的四分之一。

异步电机在降低后的电压 U_r 下带负载运行,测量电机输入功率 P_{1r} 、初级主电流 I_{1r} 和转差率 s ,以及在电压 U_r 下的空载电流 I_{0r} ,并测定额定电压 U_N 下的空载电流 I_0 。

按下述方法作向量图(图 3)可获得额定电压下负载电流 I_1 的向量,电流向量 I_{1r} 应乘以下列比值:

$$\frac{\text{额定电压}}{\text{降低的电压}} = \frac{U_N}{U_r}$$

加上下列向量:

$$\Delta I_0 = I_0 \sin \varphi_0 - I_{0r} \left(\frac{U_N}{U_r} \right) \sin \varphi_{0r}$$

其向量和即代表在额定电压下的电流,输入功率为:

$$P_1 = P_{1r} \left(\frac{U_N}{U_r} \right)^2$$

采用此方法确定的 I_1 和 P_1 ,以及降压后测得的转差率 s ,就可按 5.2.1.2.1 计算负载损耗。

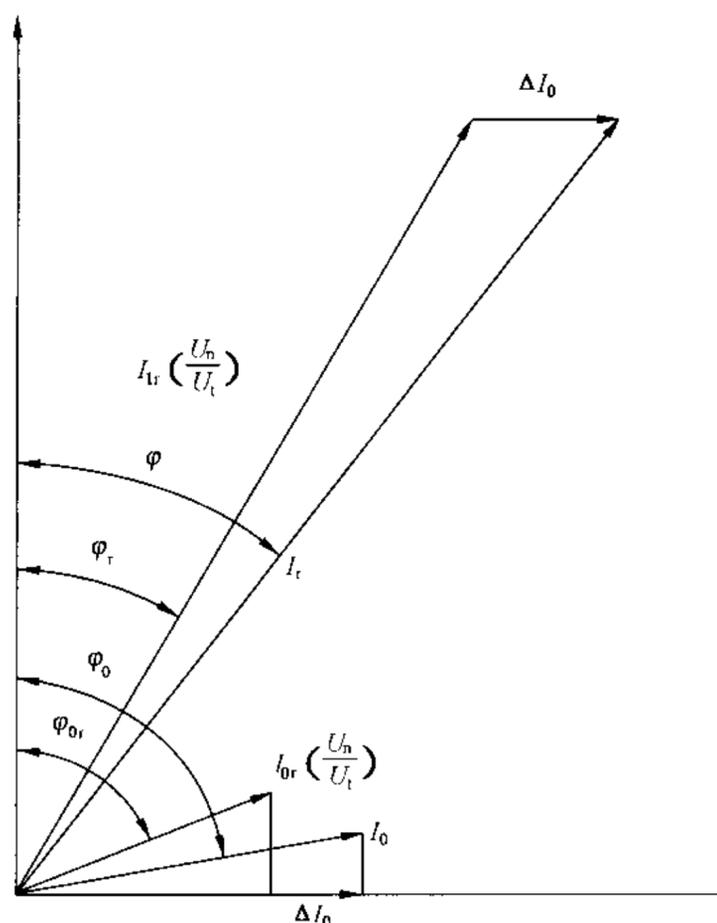


图 3 求取额定电压时负载电流 I_1 的向量图

5.2.1.3 负载杂散损耗

除非另有规定,否则 5.1.3a)和 b)两项损耗均假定按初级绕组电流平方而变化,其满载时总值:电动机时为额定输入的 0.5%,发电机时为额定输出的 0.5%。

注:对小型电机的某些设计来说,上述损耗可能大于额定输入的 0.5%。在特定情况下如认为该值重要,该损耗应

用直接测定效率的方法来确定。

5.2.2 总损耗测定

5.2.2.1 回馈试验(见 7.5)

两台相同的电机基本上按同样的额定状态运行,由电源供给的损耗可假定是平均分担的,故可由总损耗之半和一台电机的输入电功率求得效率。

试验应在尽可能接近定额规定的时间终了时达到的温度下进行,绕组电阻不必作温度修正。

注:如在感应电动机回馈试验中需用齿轮箱,则齿轮箱的损耗应在确定电机损耗前从输入电功率中减除。

5.2.3 直接测定效率

5.2.3.1 制动试验

当电机在额定转速、额定电压和额定电流下运行时,其输出与输入之比即为效率。

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,绕组电阻不必作温度修正。

5.2.3.2 校准电机试验(见 7.2)

当电机按 7.2 在额定转速、额定电压及额定电流状态下运行时,输出功率与输入功率之比即为效率。

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。绕组电阻不必作温度修正。

5.2.3.3 对拖试验

两台相同的电机基本上在同样的额定状态下运行,可假定损耗是平均分担的,故可从总损耗之半和输入电功率求得效率。如无功功率由电源提供,被拖动电机作感应发电机运行,端子上连接适当的负载。

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,绕组电阻不必作温度修正。

6 同步电机

6.1 各项损耗

下列各项损耗之和为电机的总损耗:

6.1.1 恒定损耗

a) 磁路中的铁耗以及其他金属件中的空载杂散损耗。

b) 摩擦耗(轴承、电刷),但不包括独立润滑系统中的损耗。公用轴承,不论是否随机供给,应单独列出其损耗。对水轮发电机和抽水蓄能系统的泵用同步电机,其推力轴承中的损耗(如推力轴承还带有导轴承,则包括导轴承损耗)应单独列出。同时应指出相应的推力负载、轴承温度、润滑油的型号和油温。

注:如需要独立润滑系统的损耗值,则应单独列出。

c) 总风耗,包括与电机成为一体的风扇以及辅机(如有)所消耗的功率。其他与电机并不成为一体的辅机,如风机、水泵、油泵的扣损耗,虽然专供此电机使用,仅在协议有规定才计入作为损耗。

注 1:如需要独立通风系统的损耗,应单独列出。

注 2:对直接或间接氢冷电机见 GB 755—2000 中 5.7。

6.1.2 负载损耗

a) 初级绕组中的 I^2R 损耗。

b) 起动绕组或阻尼绕组中的 I^2R 损耗。

注:b)项损耗仅适用于单相电机。

6.1.3 励磁回路损耗

a) 励磁绕组及励磁变阻器中的 I^2R 损耗

b) 由主轴拖动并成为整台电机的一个组成单元,专门作为主机励磁用的励磁机,它所产生的全

部损耗,包括励磁回路中变阻器的损耗,均属于励磁机损耗,但风摩耗除外。

旋转整流器中的损耗以及主轴与励磁机间所用齿轮、绳索或皮带、或其他类似件中的损耗均应计入。

接于同步电机端子由交流供电的任何自励和调压装置的所有损耗。

如励磁由独立电源供给,如蓄电池、整流器或电动发动机组,则励磁电源内的损耗或连接电源与电刷的接线中的损耗均不计入。

c) 电刷电损耗。

6.1.4 负载杂散损耗

a) 由于负载在铁心及导线以外的其他金属件中引起的损耗。

b) 初级绕组导线中的涡流损耗。

6.2 效率确定

6.2.1 各项损耗之和

效率可从下列各项损耗之和计算求得。确定各项损耗的方法如下:

6.2.1.1 励磁回路损耗

6.2.1.1.1 励磁绕组中 I^2R 损耗

此损耗等于 I^2R 。其中 R 为励磁绕组换算到基准温度的电阻; I 为电机在特定定额工况下的励磁电流,在负载时直接测量,如不能测量可计算确定,其计算方法应由制造厂与用户协商决定。

6.2.1.1.2 主变阻器的损耗

损耗按 I^2R 计算。式中 R 为所考虑定额时主变阻器接在励磁回路内的电阻; I 为同一定额下的励磁电流(见 6.2.1.1.1)。该损耗也等于该定额时的 IU ,即励磁电流 I 乘变阻器电阻压降 U 。

注:如励磁回路中有永久性串接电阻,则应视其同主变阻器一样处理。

6.2.1.1.3 电刷电损耗

该项损耗可由在某一定额情况下的励磁电流乘一个固定压降求得。

所有炭质电刷或石墨电刷,每一极性的压降取 IV ,如系金属石墨混电刷取 $0.3V$,即前者总压降为 $2V$,后者为 $0.6V$ 。

6.2.1.1.1、6.2.1.1.2 和 6.2.1.1.3 三项损耗之和也等于励磁电流 I 与总励磁电压 U_c 之乘积。

6.2.1.1.4 励磁机损耗

注:本条仅适用于下述情况,即励磁机由电机主轴拖动,并专为电机励磁之用。

励磁机从电机轴上吸收的功率减去其端子输出的有效功率*即为励磁机损耗。如励磁机由独立电源励磁,则损耗中还要包括此励磁机的励磁损耗。

如励磁机可以与主电机脱开并分别进行试验,其所消耗的功率可用校准电机法来测定。

如励磁机不能与主电机脱开,则励磁机吸收的功率可以对整台电机用校准电机法或减速法来测定。在这两种方法中,励磁机所吸收的功率等于整台电机在下列两种相同条件下所测得总损耗之差。一种是使励磁机带负载,另一种是使励磁机本身不加励磁,此时主电机由独立电源供给励磁。

如上述两种方法都不适用,则可按 4.1 有关直流电机的要求确定各项损耗(参看 4.2.1.1.3 最后一段)。

注:对于从电机交流端取得输入的自励调压装置中损耗的确定方法,应由制造厂与用户协商解决。

6.2.1.2 恒定损耗

6.2.1.2.1 额定电压、额定频率下,功率因数为 1 的试验

通常是将电机作电动机空载运行确定恒定损耗之和。同步电机在额定电压、额定频率下作电动机空载运行,调节励磁使输入交流电流为最小值。从输入电功率减去初级绕组的 I^2R 损耗,必要时再减去励磁机吸收的功率,即得恒定损耗之和。

注:如励磁由独立电源供给,则不必减去励磁功率。

* 励磁机的端子有效功率,即等于 6.2.1.1.1、6.2.1.1.2 和 6.2.1.1.3 三项损耗之和。

6.2.1.2.2 开路试验

6.1.1a)、b)和c)三项损耗之和,6.1.1a)项以及6.1.1b)与c)两项损耗之和,均可采用校准电机将被试电机拖动到额定转速时求取,此时被试电机作为发电机,由独立电源励磁,并以额定电压作开路运行。从校准电机计算出被试电机从轴上吸收的功率,即为6.1.1a)、b)和c)三个恒定损耗之和。切除励磁,用同样方法可测得6.1.1b)与c)两项损耗之和。两者相减即得6.1.1a)项铁耗,由于同步电机所用电刷数量较少,通常不可能用提升电刷的办法把电刷摩擦耗与其他恒定损耗分离。

6.2.1.2.3 自减速试验(见7.4)

6.1.1a)、b)、c)三项损耗之和,或6.1.1a)项以及6.1.1b)和c)两项损耗之和,均可用自减速法确定。

6.2.1.2.4 调节电压分别作功率因数为1的试验

6.1.1a)、b)和c)三项损耗,可按5.2.1.1.3方法,将电机在额定频率下作电动机运行,用改变电压的办法把三项损耗分离。

试验时,应调节励磁使功率因数保持为1。

6.2.1.2.5 改变冷却气体密度的试验

气冷电机改变气体压力,可以在不同的冷却气体密度下做试验,从而把总风耗与摩擦耗分开。

注:不同速度下的试验在考虑中。

6.2.1.2.6 量热法试验(见7.6)

可以用量热法单独确定轴承损耗。

注:立式电机推力轴承,可能还有相应的导轴承,其损耗仅在协议有规定时测定。

6.2.1.3 负载损耗

包括初级绕组 I^2R 损耗。

初级绕组 I^2R 损耗通常按6.2.1.4在短路试验中测定。

当要分开列出时,初级绕组 I^2R 损耗可由额定电流与换算到基准温度的绕组电阻计算求得。

6.2.1.4 负载杂散损耗

除非另有规定,6.1.4a)与b)两项损耗之和由短路试验测得。

将被试电机初级绕组短路,拖动至额定转速,调节励磁使初级绕组中电流为额定值,该电机从轴上吸收的功率,减去6.1.1b)和c)两项机械损耗,如有必要再减去励磁机所吸收的功率,即为负载损耗(6.1.2)与负载杂散损耗(6.1.4)之和,如漏抗非常大,例如高频电机,则还需修正铁耗。负载损耗在不同程度上随温度而变化,而负载损耗与负载杂散损耗之和则认为与温度无关,可以不必换算到基准温度。

如无其他规定,可认为负载杂散损耗按电枢电流的平方作变化。

注:如按上述办法确定6.1.4a)与b)项负载杂散损耗之和,该值比额定负载时的实际损耗略大。

短路试验时被试电机在轴上吸收的功率可采用校准电机法(7.2),或自减速试验法(7.4)测定。

6.2.2 总损耗测定

6.2.2.1 回馈试验(见7.5)

两台相同的电机基本上按同样的额定状态运行,损耗可认为是平均分担的,可按6.2.3.3方法计算效率。

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,绕组电阻不必作温度修正。

6.2.2.2 零功率因数试验(见7.3)

当电机在额定转速、额定电压、额定电流状态下运行时,其总损耗即等于试验时吸收的功率,按实际励磁电流与额定负载时励磁电流两项损耗之差进行修正。

6.2.3 直接测定效率

6.2.3.1 制动试验

当电机在额定转速、额定电压和额定电流下运行时,其输出功率与输入功率之比即为效率。

试验应在尽可能接近定额规定的时间终止时所达到的温度下进行,绕组电阻不必作温度修正。

6.2.3.2 校准电机试验(见 7.2)

当电机在额定转速、额定电压和额定电流下运行时,其输出功率与输入功率之比即为效率。

试验应在尽可能接近定额规定的时间终止时所达到的温度下进行,绕组电阻不必作温度修正。

6.2.3.3 对拖试验

两台相同的电机基本上在同样的额定状态下运行,可认为损耗是平均分担的,故可从总损耗之半和电输入计算效率。

试验应在尽可能接近定额规定的时间终止时所达到的温度下进行,绕组电阻不必作温度修正。

7 试验方法

7.1 概述

试验可以归纳为下列三种类型:

- a) 在单机上进行输入输出测定,通常包括测量电机的机械输入或输出。
- b) 将两台电机对拖测量输入、输出,例如两台相同的电机或把被试电机与校准电机对拖。可避免测定电机的机械输入或输出。
- c) 在特定情况下测定电机的实际损耗。通常这不是指总损耗,而是包含某几项损耗。但采用这一方法可以计算总损耗,或某一项损耗。

如何选择适当的试验方法,应根据需要提供的内容,要求的准确度,以及电机的型式与功率大小而定。对某一特定型式电机如有若干种试验方法可供采用时,可按 7.7 选用。

直接法与间接法确定效率的区别如下:

直接法是通过直接测量电机的输出功率与输入功率确定效率。

间接法是通过测量电机的各项损耗,把各项损耗之和与电机的输出功率相加得出电机的输入功率,以此确定电机的效率。

间接法可以有二种方式:

- (i) 确定各项损耗;
- (ii) 确定总损耗。

注:确定电机效率的方法是以若干假定为基础,因此不可能将直接法求得的损耗与间接法测定的损耗结果进行比较。

除非另有规定,否则电机效率保证值是根据测定各项损耗的方法确定的。当方法可以选择时,则对效率测试结果的评价应根据所选方法可达到的准确度和被试电机的型式与效率水平而定。* *

直接测定输出、输入功率以求取效率或总损耗时,测量的不准确度在效率的误差中直接显现出来,(例如功率测量准确度低于 1% 时,效率误差可能达 2%,或者说总损耗误差可达输入功率的 2%)。小型电机或电机效率较低(例如低于 80%)* * 时,这一方法是可取的,而试验则大为方便。如上述电机和其他电机直接测定损耗再计算效率,则可得到较高的准确度。

7.2 校准电机试验

需要测量损耗的电机与网路分开,如由原电动机拖动,则予以脱开,另由一台校准电动机将被试电

* * 有些国家使用间接法的基础是以效率水平 90% 为界,而另一些国家主张用一个较低值,例如 70%。我国考虑使用间接法的基础是以效率水平 80% 为界。

机拖动到额定转速。校准电机是指各项损耗已事先准确测定的电机,因而可根据其测得的输入电功率与转速,计算出其轴上输出的机械功率。该机械功率传输给被试电机,即可用以确定被试电机在一定工作条件下的损耗。被试电机可以是空载,加励磁或不加励磁、有电刷或无电刷、或短路,从而可分别测得各项损耗。

也可用测功机或电动机配合以合适的扭力计替代校准电机拖动被试电机,扭力计指示出传给被试电机的转矩,因而代表被试电机的机械输入功率。

使用这一替代办法时,应特别注意转速的测量,因为转速是计算功率的一个直接因素。

7.3 零功率因数试验

电机作电动机在额定转速下空载运行,功率因数在零左右,调节励磁使电机初级绕组流过额定电流。

施加合适的供电电压以使电机具有与空载额定电压下运行时同样的铁耗数值。如果不会使铁耗比满载时明显地增大,供电电压通常与额定电压相等。原则上无功功率应该是正的(即过励)。如由于励磁机电压不足而无法进行时,试验也可以在吸收无功功率(即欠励)情况下进行。

注:这一方法的准确度与所用功率表在低功率因数时的准确度有关。

7.4 自减速法

自减速法可用于确定旋转电机的各单项损耗。

本款所列出的损耗确定方法基本上是用大型同步电机,其原理也同样适用于有适当损耗的其他电机(主要是有合适的转动惯量的交流感应电机和直流电机)。

7.4.1 概述

自减速法用于确定下述损耗:

- 各种电机的风摩耗(机械损耗)之和;
- 直流电机和同步电机磁路中的铁耗与开路杂散损耗之和;
- 同步电机运行绕组中的 I^2R 损耗和负载杂散损耗之和(即短路损耗)。

7.4.1.1 基本原理

迫使电机减速的总损耗 P_i 与相应于该项损耗的转速和在该转速下的减速率的乘积成比例:

$$P_i = -Cn \frac{dn}{dt}$$

式中 n 以 r/min 计, P_i 以 kW 计, 减速常数 C 等于:

$$C = \frac{4\pi^2 J}{60^2 \times 10^3} = 10.97 \times 10^{-6} J$$

J 为转动惯量,以 $\text{kg} \cdot \text{m}^2$ 计。

可直接使用加速度计或者是按下述 7.4.1.2、7.4.1.3 和 7.4.1.4 规定的方法之一间接地求得减速率 dn/dt 。

7.4.1.2 弦线法(method of the chord)

本方法要求测量时间间隔 $t_2 - t_1$, 在此时间间隔内被试电机的转速由 $(1+\delta)n_N$ 改变到 $(1-\delta)n_N$ (见图 4) 转速变动量 $2\delta n_N$ 与时间间隔 $t_2 - t_1$ 之比值近似地等于额定转速时的减速率。

$$\frac{2\delta n_N}{t_2 - t_1} = - \left. \frac{dn}{dt} \right|_{n = n_N}$$

试验中 δ 的取值应不大于 0.1, 依据电机的特性 δ 也可取更小的值。

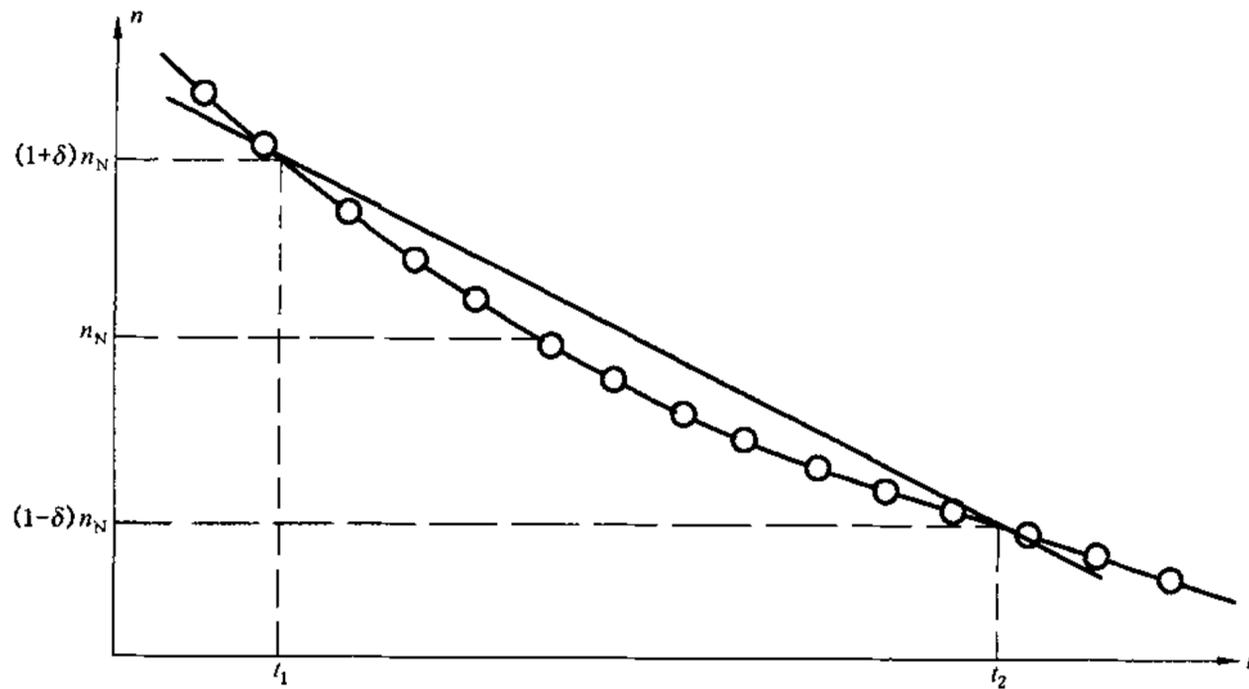


图4 弦线法

7.4.1.3 极限割线法(method of the limiting secant)

本方法是弦线法的一种变形,适用于转速不能增加到超过额定转速的电机。试验时,转速为额定转速 n_N 的瞬间标以 t_1 ,而当转速下降到 $(1-\delta)n_N$ 的瞬间标以 t_2 ,逐次减小 δ 值,则转速的时间导数等于通过 t_1 、 t_2 点的直线与时间轴间夹角正切,当 δ 趋近于零时的极限值,见图5:

$$\lim_{\delta \rightarrow 0} \frac{\delta n_N}{t_2 - t_1} = - \left. \frac{dn}{dt} \right|_{n = n_N}$$

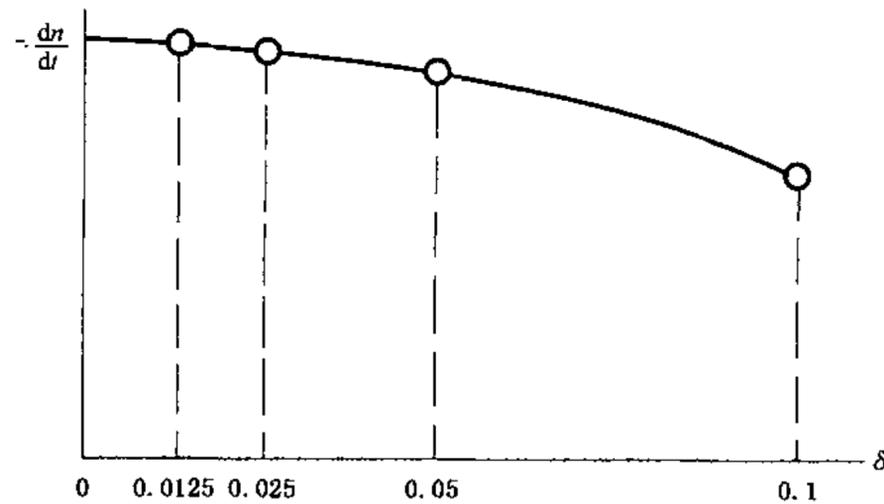


图5 极限割线法

7.4.1.4 平均转速法

如 t_1 、 t_2 和 t_3 代表逐次的时间读数,在任意两个相继读数间隔内转轴转过完整的 N 转,在此时间间隔内的平均转速为:

$$\overline{n_{12}} = \frac{60N}{t_2 - t_1} \text{ 和 } \overline{n_{23}} = \frac{60N}{t_3 - t_2}$$

转轴在中间时间 t_2 瞬间的减速率为:

$$\frac{dn}{dt} \approx \frac{2(\overline{n_{23}} - \overline{n_{12}})}{t_3 - t_1}$$

将计算求得的各瞬间的减速率相对于平均转速画出曲线,由此曲线上可确定在额定转速时的减速率值。

7.4.2 自减速试验的组合

7.4.2.1 已知转动惯量时的试验组合

如经测量或查阅设计资料,电机旋转部件的转动惯量为已知,对于直流电机有两项基本的减速试验已是足够,即使电机在额定转速电枢绕组开路下运转,不加励磁和加励磁使电压达到额定电压。对于同

步电机还需要作第三种减速试验,即使电枢绕组短接,加励磁使电枢电流达到额定值。

第一种试验由下式可得出被试电机的机械损耗:

$$P_i = -C n_N \left. \frac{dn}{dt} \right|_1$$

第二种试验由下式可得出被试电机的机械损耗与铁耗之和:

$$P_i + P_{Fe} = -C n_N \left. \frac{dn}{dt} \right|_2$$

第三种试验由下式可得出被试电机的机械损耗与短路损耗之和:

$$P_i + P_k = -C n_N \left. \frac{dn}{dt} \right|_3$$

$$\text{以上 } \left. \frac{dn}{dt} \right|_1, \left. \frac{dn}{dt} \right|_2, \left. \frac{dn}{dt} \right|_3$$

分别代表了第一、二和三种试验中的转速对时间的导数值。

第一、二两种试验求得的损耗之差为铁耗。

第一、三两种试验求得的损耗之差为电枢回路中的 I^2R 损耗和负载杂散损耗之和,如有需要,此二项损耗也可以分离开,即由两项损耗之和减去电枢回路中相应于试验温度的电枢回路电阻计算求得的 I^2R 损耗,为此,在每一电枢回路短接的减速试验之后应采用适当的方法直接测量绕组温度。

7.4.2.2 转动惯量为未知时的试验组合

如电机旋转部件的转动惯量为未知量,或者是与电机机械连接有其他旋转部件且其转动惯量为未知量,例如连接有汽轮机的电机,则应作一些附加试验以确定减速常数 C 。

有些情况下可能用适用的电压、相数和频率(如为交流电机)的电源向被试电机供电使其作空载电动机运行,且能测得所供给的功率(等于机械损耗与铁耗之和,因为电枢回路中的 I^2R 损耗通常是可以忽略不计的),则减速常数 C 可由下式求得:

$$C = \frac{P_i + P_{Fe}}{n_N \left. \frac{dn}{dt} \right|_2}$$

如因供电电源的频率波动测量该项功率有困难,可改用电度表(Integrating meter)测量供给被试电机能量的办法。为此,必须使被试电机作为电动机在恒定的供电状态下运行一段时间。

有些情况下被试电机不可能作为不带负载的电动机运行,故除了 7.4.2.1 所提出的三种减速试验外还应进行另一种减速试验。令被试电机承受以数量级同于 P_{Fe} 和 P_k 且能测得的任何损耗 P 使之降速。为此,把可以单独测得开路损耗或短路损耗的变压器接入被试电机,另外,如被试电机转轴上带有励磁机或辅助发电机,可用其限流电阻(ballast resistance)作为负载。

如采用接入变压器的开路损耗降低电机转速,则因变压器开路(指副边开路)电流造成被试电机的短路损耗可以忽略,则

$$P_i + P_{Fe} + P = -C n_N \left. \frac{dn}{dt} \right|_4$$

$$C = \frac{P}{n_N \left\{ \left. \frac{dn}{dt} \right|_4 - \left. \frac{dn}{dt} \right|_2 \right\}}$$

如采用接入变压器的短路损耗降低电机转速,通常变压器副边短路状态下的铁耗可以忽略,则

$$P_i + P_k + P = -C n_N \left. \frac{dn}{dt} \right|_5$$

于是

$$C = \frac{P}{n_N \left\{ \left. \frac{dn}{dt} \right|_5 - \left. \frac{dn}{dt} \right|_3 \right\}}$$

如采用以限流电阻作负载的励磁机或辅助发电机降低电机转速,迫使电机减速的损耗只有被试电机的机械损耗 P_f 和被测得的损耗 P (计及负载电机的效率,此项损耗可通过计算求得)。因而:

$$P_f + P = -C n_N \left. \frac{dn}{dt} \right|_6$$

从而得出:

$$C = \frac{P}{n_N \left\{ \left. \frac{dn}{dt} \right|_6 - \left. \frac{dn}{dt} \right|_1 \right\}}$$

7.4.3 自减速试验方法

7.4.3.1 自减速试验时被试电机的状态

被试电机应为正常运行时的完整组装状态,试验之前电机的轴承须经过“磨合运转”(run in)。通过冷却气体流量的节流调节使空气温度达到所要求的正常温度,在此温度下测量电机风耗。调节冷却介质流量,使轴承温度达到在额定负载运行状态下的温度。

7.4.3.2 与其他机构机械联接的被试电机

若有可能被试电机应与其他旋转部件脱开。如不能脱开,应采取一切可能的措施降低其他旋转部件的机械损耗,例如部分拆除或者是在带水轮机的情况下排除叶轮蜗室内的水;此外,还应采取措施排除上游进水和因叶轮转动由下游抽汲进水的可能性。叶轮在空气中旋转会产生风耗,此项损耗可通过实验表明或者是按制造厂与用户的协议计算求得。

7.4.3.3 被试电机的旋转

有时被试电机可由其原动机驱动,例如由冲击式水轮机(Pelton turbine)驱动,在这种场合下叶轮的供水可瞬间切断。然而被试电机通常是由独立电源供电在宽广的可变转速范围内作为电动机空载运行。在所有情况下,均应由快速精确电压控制的独立电源提供励磁,原则上不推荐由原有机机械联接励磁机提供励磁,但在有些情况下如转速偏差值 δ 甚小,例如不超过 0.05 时,允许由原有的励磁机提供励磁。在所有情况下均应考虑与被试电机转轴联接的励磁机的损耗。

7.4.3.4 试验开始之前的操作方法

每项试验开始时,把被试电机快速地加速到 $(1+\delta)n_N$ 以上,当电机减速到所要求的转速时就能处于所要求的状态,即:

- 电机与供电电源断开;
- 仅由机械耗减速时,被试电机磁场应灭磁;
- 由机械损耗与短路损耗之和减速时,电机磁场要灭磁,短接电枢端子,重新施加励磁使电流达到预先设定的短路电流;
- 由变压器损耗减速时,被试电机灭磁后使之与预先设置好某种状态(空载或短路)下的变压器相联接,加励磁使之达到预先设定的电流值或开路电压值;
- 由装在被试电机转轴上的励磁机或辅助发电机负载损耗减速时,被试电机要灭磁同时调定所规定的负载。

上述诸情况下从切断电源到开始测量数据之间均应有一充分的时间延滞,以避免电磁瞬变过程的影响。

由机械损耗和铁耗或者是变压器开路损耗之和降速时,如被试电机为同步电机,将其励磁调节至相应于在额定转速、功率因数为 1 时预先设置的开路电压,在被试电机断开电源后无其他操作要求。

7.4.3.5 减速期间的操作

每项试验各种仪表(磁场电流、开路电压、短路电流)以及转动惯量 J 为未知的附加自减速试验中的功率表均应在被试电机通过额定转速的瞬间读取读数;在不加励磁的自减速试验中在此瞬间不要求读取读数。

开路电压或短路电流测得值偏离预先设定值的偏差不得超过 $\pm 2\%$ 。由每种试验计算求得的最终

转速时间导数应按设定值与测得值平方之比成比例地作调整。

7.4.3.6 自减速试验程序

如有可能,自减速试验项目应不间断地连续进行,建议以不加励磁的自减速试验开始和结束作一系列的试验。若因某些原因,不能连续地进行一系列试验,则建议后续的一些试验以不加励磁的自减速试验开始和结束。

试验可以在相同的预定开路电压或短路电流值(例如为额定值)下重复多次,或者是95%~105%额定值限定范围内以不同的数值重复多次试验。前一种情况下,诸测得值的算术平均值可认为是每一类型损耗的实测值,后一种情况下,把测得的数值画成与电压或电流成函数关系的曲线,依电压或电流的预定值在此曲线上查出的一点读数就是实测值。

因转动惯量为未知量而进行的附加自减速试验应在绕组开路或短路产生同样的电压或电流值的条件下进行。如不可能作到,应按前述的曲线确定各对应的数值。

7.4.4 测量

7.4.4.1 测量方法

自减速试验期间测量工作的目的在于求得所要求的转速时间导数,可采用以下三种方法:

a) 加速计法——直接测量相对于时间的减速率:

$$\frac{dn}{dt} = f(t)$$

b) 转速计法——确定转速与时间的依存关系:

$$n = f(t)$$

c) 计时器法(chronographic)——确定被试电机转轴角位移与时间的依存关系:

$$S = f(t)$$

在各种情况下,记录测量仪表既可连续地也可间断地记录测得的数值和时间。

7.4.4.2 加速计法

具有复杂通风结构的大型电机,其速度与时间的依存关系可能是无规律的。从而,在减速期间通过额定转速瞬间的减速率瞬时值可能是散乱的。因此,可作出测得的减速率与时间或转速的关系曲线,经适当的曲线拟合或相关技术确定转速时间导数的真实值。

7.4.4.3 转速计法

用测量结果画出转速与时间的曲线图,在此图上确定弦线法或极限割线法所指出的达到要求转速的时间瞬间,利用较高和较低转速对应的时间之差计算减速度。

若被试电机转轴上带有励磁机或其他电机,如其发出的电压信号随着被试电机的转速不出现波动,可作为测速发电机使用,由稳定的直流电源(如单独的蓄电池)供给励磁。

如果随着被试电机转速发出的电压信号有波动,或者是被试电机轴上不带这样的测速发电机,可联接一台直流电机充当测速发电机,它可以用无缝的皮带或者是其他方法由被试电机转轴驱动,使之平滑地旋转。

可以在相应方法规定的确切时间间隔内读取转速读数,此时不需要特别记录时间,也可以读取来自被试电机转轴的信号读数。在此情况下,读取转速读数同时还应读取时间读数,不必读取转轴每转的时间读数;通常,整个试验读取30个~40个读数即已足够。

如使用高准确度的测量仪表,则可测量转速的瞬时值或者是测量被试电机或装在该电机转轴上的其他交流电机的电压周期以取代测量转速;此时两台电机的极对数不必相等。

7.4.4.4 计时器法

可以使用指针连续移动(非阶段性)的直观显示计时器,也可使用带打印机(电气式或机械式)的数字显示的计时器。

应按来自被试电机转轴的信号(或是转轴完整的每转或是已知的转数)读取时间读数。

注:使用转速计法,如用来自被试电机转轴信号确定转速,则时间读数可用于转速计法和计时器法,于是可提供相互校核的机会。

有时被试的机组具有平滑的减速特性,测量与额定转速之差相同的两档转速之间的减速时间可以得到精度满意的测量结果。

$$\frac{dn}{dt} = \frac{\Delta n}{\Delta t}$$

测量定子电压的频率是确定同步电机转速的最佳办法。

7.4.4.5 轴承损耗的测量

如有必要,可由机械损耗中减除轴承及推力轴承损耗,这些损耗可用 GB/T 5321 规定的热量法求取。如被试电机轴承为单向流动冷却(direct-flow-cooling),这些损耗应由被试电机和与之机械联接的其他机械(例如汽轮机)按其旋转部件的质量成比例地分担。如果轴承不是单向流动冷却的,须按制造厂与用户协议的经验公式确定轴承损耗的分配。

7.5 回馈试验

如有两台相同的电机,则可用回馈法。把两台电机机械和电气耦合在一起,以额定转速运行,一台作电动机,另一台作发电机。测试时的实际温度要尽可能接近正常工作温度,不必作进一步修正。两台电机所需的损耗可由其所接的网路来供给,或由校准电机来供给,或由升压机来供给,或由上述各种办法的组合供给。

如两台直流电机电气回馈,调节电枢电流的平均值为额定值。如被试电机为发电机,则两电枢电压的平均值为额定电压加一压降值,如被试电机为电动机,则两电枢电压的平均值为额定电压减一压降值。

如两台异步电机电气回馈,则机械连接部分要通过调速机构,如齿轮箱,以保证合适的功率转移。转移的功率大小与两台电机的速度差有关,电源应供给两台电机的损耗及所需的无功功率。

如两台同步电机电气回馈,则机械连接时应有一个正确的相位角关系,两电机间转移的功率取决于相位角差。

7.6 热量法试验

热量法测量损耗应按 GB/T 5321 标准进行。

7.7 优先采用的试验方法

7.7.1 直流电机

直流电机优先采用 4.2.1 规定的试验方法,确定恒定损耗的优先采用 4.2.1.2 规定的方法。

7.7.2 多相感应电机

多相感应电机优先采用 5.2.1 规定的试验方法,确定恒定损耗的优先采用 5.2.1.1.1 规定的方法。

7.7.3 同步电机

同步电机优先采用 6.2.1 规定的试验方法,确定恒定损耗的优先采用 6.2.1.2.1 规定的方法。

附录 A (资料性附录)

变频器供电笼型感应电动机确定损耗和效率的暂定方法

引言

本附录适用于额定频率为 120 Hz 及以下、由变频器供电的笼型感应电动机。变频器具有中间电路,属下列几种型式:常用的脉宽调制式(PWM)的 I 型变频器和 U 型变频器。

本标准第 5 章规定的损耗和效率确定方法部分内容已不适用,本附录指明了必须修改的试验内容。

注:六阶梯波变频器属脉冲控制变频器的一种特殊情况。

通常,由变频器供电比正弦波电源供电电动机运行时的损耗要大。这些附加损耗取决于所施加供电量(电流或电压)的谐波频谱。变频器线路及控制方法对诸损耗量的大小有影响,因而不可能用一个简单的因数包容这些附加损耗。

因此,最好是把电动机连同实际运行将使用的同样的变频器一起试验以确定损耗和效率。很明显,适用的方法不应当牵涉到电机的设计数据,例如转子导条的几何形状。

A.1 变频器供电电动机的损耗和效率的确定

A.1.1 附加损耗的分量

笼型感应电动机的附加损耗¹⁾是由电压或电流的谐波产生的,由以下分量组成:

- a) 初级绕组中的附加 I^2R 损耗;
- b) 次级绕组中的附加 I^2R 损耗;
- c) 附加铁耗。

注:IEC 34-17:1992“变频器供电笼型感应电动机应用导则”的第 5 章阐述了产生附加损耗的物理效应。

A.1.2 输入—输出法确定效率

优先的方法是 7.1 列出的电动机输入—输出测量法。因为测量结果包括了所有的附加损耗(见 A.3)。然而,所使用的功率,转矩和转速的测量设备应具有足够的准确度以及适用的频率范围。因此,对测量仪表及附件除 3.2 要求的内容外还应当规定一些附加要求(见 A.2)。

为使求得的电动机效率处于所要求的相对容差范围内,功率测量的最大相对误差 $(\Delta P/P_{in})_{max}$ 应如图 A.1 所示随同效率的增加而降低。

若按制造厂与用户协议,也可以测量变频器连同电动机的输入—输出以确定整个系统的总效率。在此情况下,不能单独地确定电动机的效率。

A.1.3 损耗分析法确定效率

5.2.1 所作的一些假定条件对变频器供电的电动机已不再适用,在空载试验中,次级绕组的 I^2R 损耗(5.2.1.1.1)已不容许忽略,因此分离不出铁耗。与多种变频器商品配合,因其所限定的调节范围不可能按 5.2.1.1.3 改变电压(即改变磁通)作空载试验,故不可能通过空载试验把风摩耗(5.1.1b)和 c) 同其他损耗分离开。

1) 这些附加损耗是由供电电源的谐波产生的,不包括 5.1.1a) 和 5.1.3 款涉及到的基频正弦电源的杂散损耗。

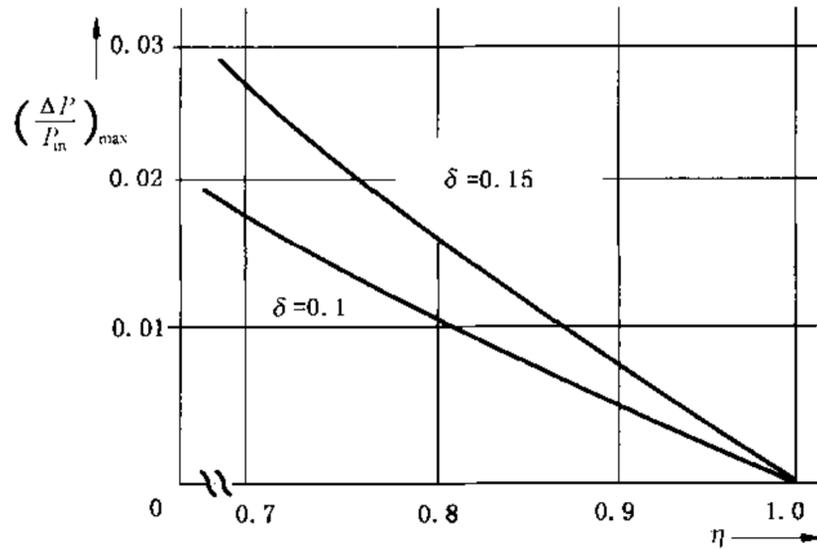


图 A.1 输入和输出测量的最大容许相对误差 $(\Delta P/P_{in})_{max}$ ²⁾

关于负载试验,在 5.2.1.2.1 中的“次级绕组损耗等于转差率与传输到次级绕组总功率的乘积”的说明只适用于以正弦基频电流运行的电动机。再者,以直流电流测得的初级绕组电阻计算 I^2R 损耗(5.2.1.2.1)因涡流影响将产生误差。

因此,在用损耗分析法确定效率时须作一些假定(见 A.4)。

A.1.4 量热法确定效率

量热法特别适用于变频器供电的电动机,这是因为损耗的测量与电压电流的波形如何无关。

已经明确,GB/T 5321—1985 中 4.5 的量热校正法有其优点,该方法不要求测量流量,从而不必确定与温度和湿度成函数关系的冷却介质的密度,也不必考虑冷却介质的比热容的变化。

图 A.2 所示的装置中,耗散电阻器所吸收的功率很容易测量,因此,利用下式可计算出电动机的损耗。

$$P_v = P_d(T_2 - T_1)/(T_3 - T_2)$$

式中:

P_v ——电动机损耗;

P_d ——耗散电阻器吸收的功率;

T_1 、 T_2 及 T_3 ——图 A.2 所示各点测得的温度。

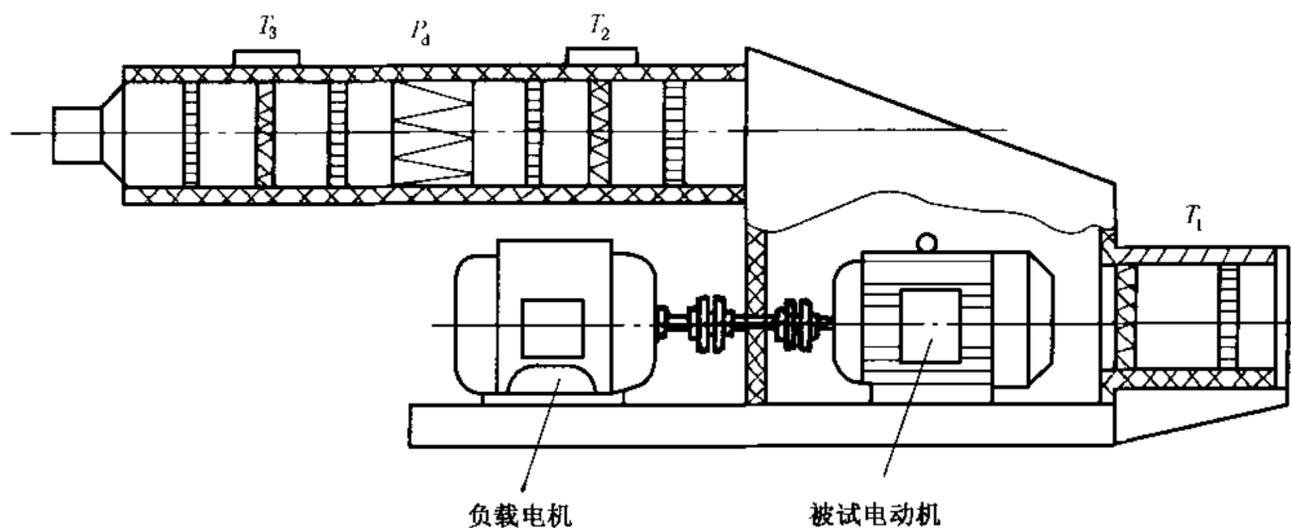


图 A.2 量热校正法试验装置的示意图

测量准确度主要取决于 $(T_2 - T_1)$ 和 $(T_3 - T_2)$ 温升的幅值。应按 GB 5321—1985 中 6.3 款的规定进行测量,以便使测量结果能达到该标准中 6.5 款和表 2 规定的准确度。

2) δ 为 GB 755—2000 表 8 中项 1、2 列出的容差。假定 P_{in} 和 P_{out} 的误差相等,在此简化误差的基础上作出曲线。图 A.1 是式 $(\Delta P/P_{in})_{max} = \delta(1 - \eta)/(1 + \eta)$ 的图形。

A.1.5 正弦波供电试验的损耗分析法并补充以考虑附加损耗的总增量确定效率

通常,标准设计的电动机和变频器只是在运行地点才联接在一起,在众多情况下,以正弦波供电时电动机的已知损耗叠加以总增量确定效率的方法颇受欢迎,但正如前述,不可能规定出适合于变化极为广泛的变频线路和控制方法的适用数值。关于总增量,目前的状况是对一定的输出范围和变频线路所搜集到的试验数据只能作出有限的说明(见 A.5)。

A.1.6 推荐的方法

额定频率为 50 Hz 或 60 Hz 的电动机,按其定额推荐以下几种试验方法:

- a) ≤ 50 kW、I 型或 U 型变频器供电的电动机采用输入—输出法(A.3)。如经制造厂与用户协议本方法也可用于额定输出较大的电动机。³⁾
- b) > 50 kW、I 型(A.4.1)或 U 型(A.4.2)变频器供电的电动机应用损耗分析法。
- c) 在试验间作试验的电机(与定额无关)可用正弦波供电的损耗分析法(5.2.1)并补充由 U 型变频器供电的空载试验。
- d) 热量法(A.1.4)适用于 I 型和 U 型变频器供电的任意定额的电动机。

A.2 测量仪表的要求

应使用测量电流、电压有效值的仪表和有功功率表。在输入—输出法中,测量结果的准确度取决于功率表、转矩和转速测试设备的准确度。

考虑到谐波产生损耗的作用,应仔细选择测试设备,使其能在相应频率范围内有足够的准确度,以下是对互感器、传感器以及分流电路等测试设备所要求的频率范围 f_r :⁴⁾

$$f_r = 10f_1 \text{——对六阶梯波变频器}$$

$$f_r = 6f_p \text{——对 PWM 变频器,最高为 100 kHz}$$

式中:

f_1 ——最高额定频率;

f_p ——最高脉冲频率(载波频率)。

对于六阶梯波变频器,普通的电动式仪表即能满足这些要求;对于 PWM 变频器,必须使用宽频段的设备,优先使用带 AD 变换器和数字式数据微处理机的电子式仪表。

注 1:脉冲频率高的场合不宜使用两表法(Aron 接法)。这是因有电容电流存在,输入电流之和可能不为零。因此,应采用每相用一个功率表的测量方法。

注 2:可以认为以下准确度的适用测量设备可以达到要求,功率 0.5%,转矩 0.4%和转速 0.1%。

注 3:变频器的输出谐波及其主要次数决定于调制方法,A.6 对此作了扼要说明。

A.3 总损耗测量

可采用制动法(5.2.3.1)或校准电机法(5.2.3.2)确定变频器供电电动机的效率,这些试验方法也适用于非额定频率的运行状态,包括弱磁控制(field-weakening)运行。

这种直接测量方法仅适用于额定功率不超过 A.1.6 规定的电动机。

3) 如经协议此方法可用于更大定额的电机。但所确定的效率的误差可能超过 GB 755—2000 中表 1 规定的容差值。

4) 对常用的指示仪表(见 GB/T 7676.1),其准确度是对标称频率规定的(如对 40 Hz~60 Hz),而在其规定的上限频率,其准确度等级容许有附加误差(如在 1000 Hz 时为 0.4%)。电子式测量仪表通常均给出频率范围,指规定的上限频率,所规定的准确度既适用于 50 Hz 或 60 Hz,也适用于规定的上限频率。以下称此为仪表的频率范围。

A.4 损耗分析法

借助于修改的空载试验(5.2.1.1.1)和负载试验(5.2.1.2.1),也可以采用损耗分析法确定效率。其中两项修改的试验均应在额定频率下进行,电压要按变频器的特性,例如用其固有特性曲线或者是磁场定向控制(field-oriented control)来调节。

使用 I 型和 U 型变频器供电时应遵守不同的修改要求。

A.4.1 方波输出(block-wave output) I 型变频器供电的电动机⁵⁾

假定由空载到满载之间电流波形不变,则相对谐波含量与负载无关。同时,假定附加铁耗主要是由于漏磁通反向而产生的,在这些假定前提下,因谐波而产生的附加损耗主要取决于电流,且将随初级电流有效值的平方而变化。

理论上是可以利用正弦波电压供电和变频器供电的空载试验测得的“恒定损耗”之差确定负载状态下的附加损耗。然而在实践中,这种方法必然会有显著的误差。

A.4.1.1 变频器供电的空载试验

测得的输入和用直流电阻求得的初级绕组损耗之差包含了恒定损耗(按 5.1.1,仅考虑了基波)和以下各项分量:

- 因涡流导致电阻增加的初级绕组附加损耗;
- 附加铁耗;
- 因谐波而产生的次级绕组损耗;

在作空载试验时(5.2.1.1.1)以上各项分量均包含在恒定损耗总和之中。

A.4.1.2 变频器供电的负载试验

采用 5.2.1.2.1 的方法,由变频器供电的负载试验数据计算求得的次级绕组损耗将特别小。如无其他规定,为了弥补在空载和负载状态下次级绕组谐波损耗的差值以及初级绕组谐波涡流损耗,满载损耗应增加 0.5% 输入功率(除 5.2.1.3 规定的 0.5% 输入功率总杂散损耗之外),并且认为这些损耗随初级电流的平方而变化。

A.4.2 U 型变频器供电的电动机

注:下述内容适用于六阶梯波和 PWM 型变频器。

可以认为谐波电流的绝对值与负载无关,利用变频器供电的空载和负载两种试验就可求得效率。

附加损耗包括在按 5.2.1.1.1 空载试验求得的“恒定损耗总和”之中,因而损耗分析法中只考虑因转差基频电流所产生的那部分次级绕组 I^2R 损耗,这些损耗可用不同于 5.2.1.2.1 规定的负载试验确定,等于转差率与传输给转子的基频功率的乘积,后者也就是电动机吸收的功率减去初级绕组的 I^2R 损耗和不包括风摩耗的“恒定损耗之和”,风摩耗可用自减速法确定,因基频而产生的负载杂散损耗集总值应按 5.2.1.3 规定。

图 A.3 给出了谐波功率及相应的附加损耗示意图,只有正弦波电压供电时的恒定损耗为已知时才有可能分离出附加损耗。

A.4.3 正弦波电压供电负载试验和变频器供电空载试验的损耗分析法

如具备正弦波电源,应按 5.2.1.2.1 款规定的负载试验确定负载损耗,空载试验则应按 4.9 规定进行。

5) 本文件不包括 PWM 调制 I 型变频器供电的详细说明。

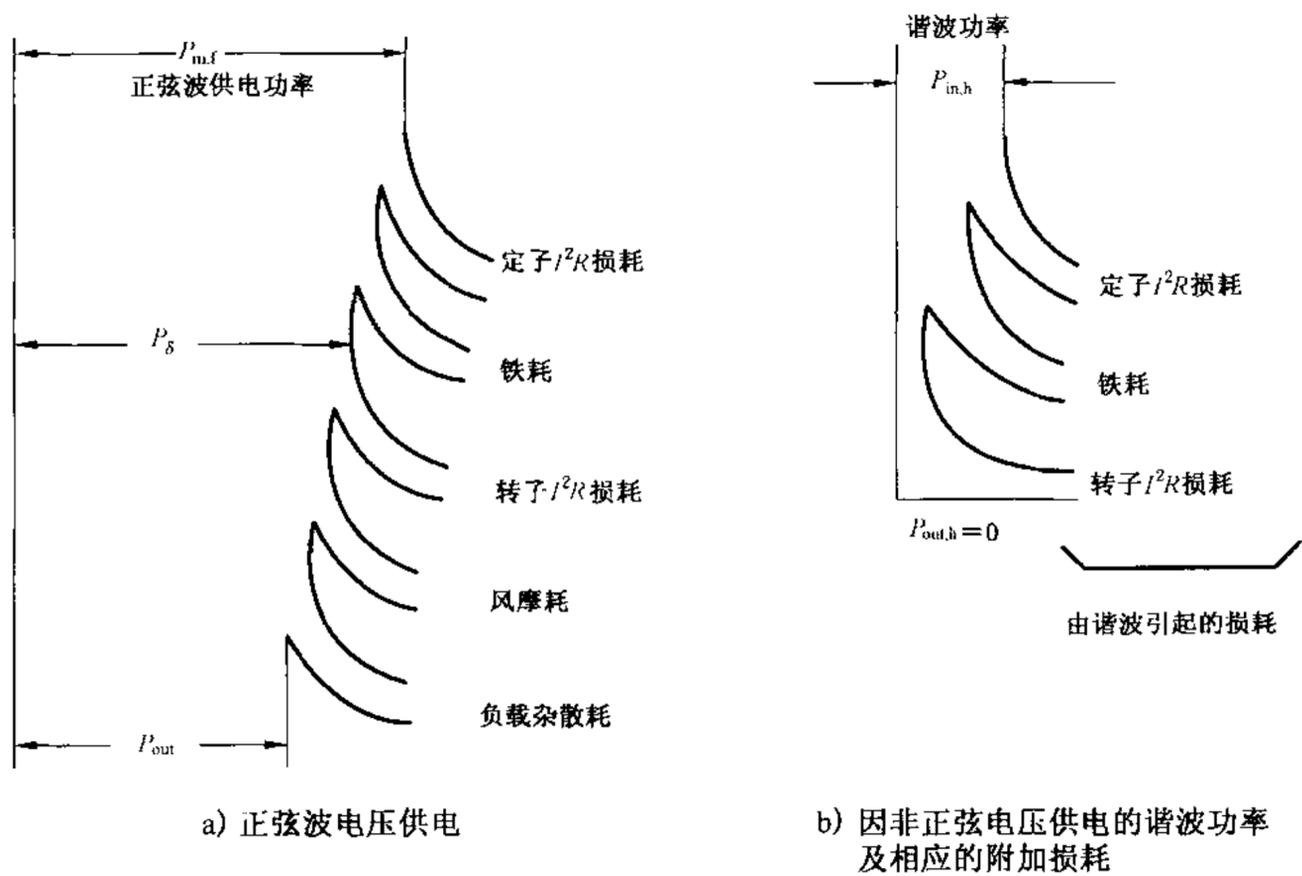


图 A.3 功率及损耗分流图⁶⁾

负载杂散损耗按 5.2.1.3 确定。

A.5 正弦波供电确定损耗并叠加以假定增量的方法

为确定以输入功率百分数表示的附加损耗,以三相笼型感应电动机用正弦波电源供电和用变频器供电,在相同输出的条件下进行了试验。

- 额定输出在 30 kW 和 1 015 kW 之间的电动机,以六阶梯波 1 型变频器供电,在 50 Hz 或 60 Hz 运行时,因变频器供电而产生的附加损耗为输入功率的 0.6~1.25%。额定输出大于 30 kW 电动机其适当的假定增量为 1%;
- U 型变频器供电的电动机,其附加损耗数值与脉冲频率、脉冲发生线路以及调制指数有关。正弦基准波调制的 PWM 型变频器供电时的试验结果显示,附加损耗值变化范围从几乎可以忽略直到输入的 3%,六阶梯波 U 型变频器供电时,适当的假定增量值为 1.5%。

A.6 变频器的主要问题

A.6.1 典型的变频器输出波形(见图 A.4)

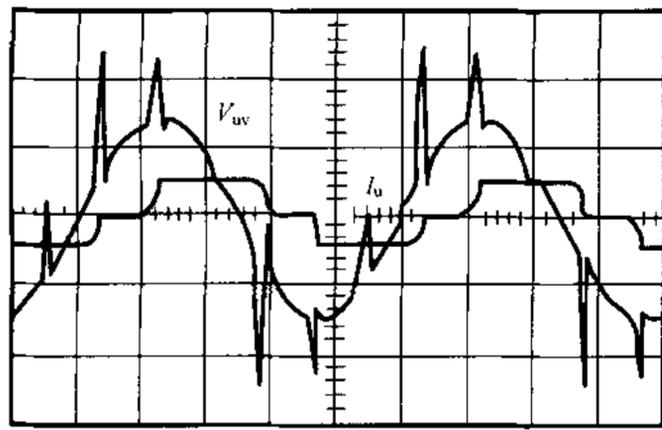
A.6.2 PWM 型变频器的谐波

变频器输出电压和电流的谐波频谱取决于调制方法。

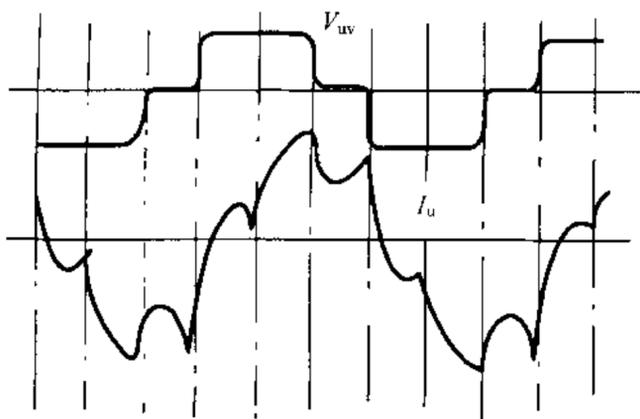
频率比恒定的载波和基准波相互作用的同步脉冲发生过程可以求出其分析表达式,脉宽调制的 U 型变频器即为例证,因此,可用基频 f_1 、脉冲频率 f_p 和调制指数 M 描述电压谐波频谱。

令 f_1 代表变频器的基频,则谐波将为 $f_n = n f_1$ 。在同步调制方法中上式中的 n 为整数。三相桥式六阶梯波变频器中谐波次数 $n=5,7,11,13, \dots$ 谐波含量随次数 n 的增大而减少。

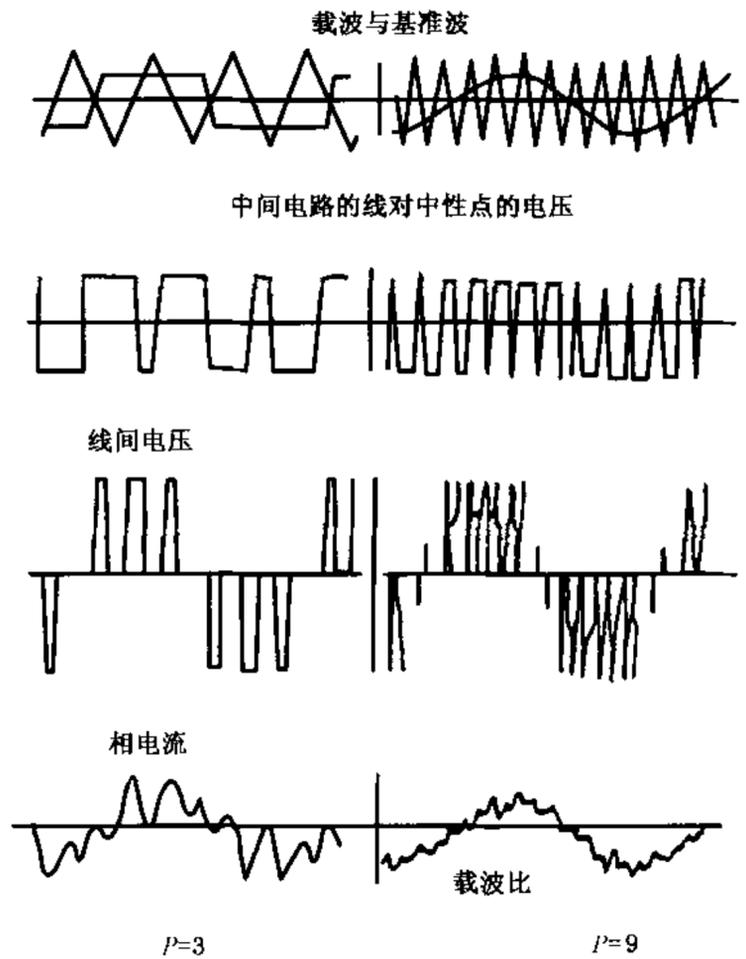
6) 图 A.3 中的符号: $P_{in,f}$: 基频输入功率; P_δ : 传输给次级绕组的功率; P_{out} : 输出功率; $P_{in,h}$: 谐波输入功率; $P_{out,h}$: 谐波输出功率。



a) 六阶梯波I型变频器驱动



b) 六阶梯波U型变频器驱动



c) PWM调制U型变频器驱动

图 A.4 电流和电压的典型波形

脉冲频率 f_p 等于变频器一个主支路中管件的每秒接通次数, PWM 调制方式等同于采样频率, 参量 $P = f_p / f_1$ 称为载波比, 选为 3 的倍数使三相输出平衡。正弦波调制和方波调制输出频谱中的谐波次数为 $n = p + m_g (m_g = 2, 4, \dots)$ 和 $n = 2p + m_u (m_u = 1, 3, \dots)$ 。

调制指数 M 的定义是基准波与载波的幅值之比, 在整个 M 的宽广范围内近于 $2f_p$ 次的谐波在电动机端子电压频谱中占主导地位。

给定了电动机输入的电压谐波条件下, 其谐波电流则取决于电动机的阻抗。

异步脉冲信号发生线路会产生分数次谐波 (fractional harmonic)。

在变频器输出和电动机输入之间接入滤波器可进一步削弱电动机的电流谐波, 在脉宽调制 I 型变频器的情况下为改善其性能接入滤波器 (电容器) 是很必要的。