



中华人民共和国国家标准

GB/T 1029—2021

代替 GB/T 1029—2005

三相同步电机试验方法

Test procedures for three-phase synchronous machines

2021-05-21 发布

2021-12-01 实施

国家市场监督管理总局
国家标准化管理委员会 发布

目 次

前言 III

1 范围 1

2 规范性引用文件 1

3 术语和定义 1

4 符号 5

5 基本要求 7

6 一般性试验..... 12

7 效率测定..... 23

8 热试验..... 37

9 自励恒压时电压调整性能测定..... 45

10 转矩和转动惯量的测定 47

11 过电流和机械强度试验 53

12 负序电流承受能力试验 54

13 定子绕组端部动态特性测定 54

14 确定各参数的试验 54

15 确定各参数 68

附录 A（规范性） 空载短路法求取励磁绕组温升时的 $\Delta\theta$ 值 91

附录 B（规范性） 频率响应特性计算方案 92

附录 C（规范性） 常用电机模型 94

参考文献 96

前 言

本文件按照 GB/T 1.1—2020《标准化工作导则 第 1 部分：标准化文件的结构和起草规则》的规定起草。

本文件代替 GB/T 1029—2005《三相同步电机试验方法》，与 GB/T 1029—2005 相比，除结构调整和编辑性改动外，主要技术变化如下：

- 增加了术语和定义(见第 3 章)；
- 增加了符号(见第 4 章)；
- 增加了试验要求(见第 5 章)；
- 增加了效率测定的优选试验方法和常规或检查试验方法(见 7.2、7.3)；
- 将量热法试验归入确定大电机各项损耗的专用试验方法(见 7.4, 2005 年版的 5.3)；
- 将自减速法试验归入确定大电机各项损耗的专用试验方法(见 7.4, 2005 年版的 5.5)；
- 将参数测定分为确定各参数的试验和确定各参数两个章节(见第 14 章、第 15 章, 2005 年版的第 12 章)；
- 增加了确定同步电机参数的试验和优选试验方法的表格(见表 7)；
- 增加了频率响应特性计算方案(见附录 B)；
- 增加了常用的两轴凸极电机模型(见附录 C)；
- 删除了物理量的符号及单位(见 2005 年版的附录 B)。

请注意本文件的某些内容可能涉及专利。本文件的发布机构不承担识别专利的责任。

本文件由中国电器工业协会提出。

本文件由全国旋转电机标准化技术委员会(SAC/TC 26)归口。

本文件起草单位：上海电机系统节能工程技术研究中心有限公司、安徽明腾永磁机电设备有限公司、上海电器科学研究所(集团)有限公司、苏州佳电飞球电机有限公司、上海马拉松革新电气有限公司、卧龙电气南阳防爆集团股份有限公司、东方电气集团东方电机有限公司、上海电气集团上海电机厂有限公司、江苏省特种设备安全监督检验研究院、哈尔滨大电机研究所、青岛海西电气有限公司、佳木斯电机股份有限公司、珠海格力电器股份有限公司、安徽皖南电机股份有限公司、国网江苏省电力有限公司营销服务中心、中机国际工程设计研究院有限责任公司、中车株洲电机有限公司、康富科技有限公司、康明斯发电机技术(中国)有限公司、兰州电机股份有限公司、江天电机有限公司、卧龙电气驱动集团股份有限公司、江西江特电机有限公司、无锡东元电机有限公司、中车永济电机有限公司、山东华力电机集团股份有限公司、荣成市荣佳动力有限公司、江苏锡安达防爆股份有限公司、西安泰富西玛电机有限公司、江苏航天动力机电有限公司、浙江中龙电机股份有限公司、浙江特种电机股份有限公司、浙江大高电机有限公司、上海电器设备检测所有限公司、上海电科电机科技有限公司。

本文件主要起草人：王传军、金惟伟、周洪发、梅洛明、李雪东、周伟强、刘英豪、周光厚、邱毓鸿、苏文胜、陈小米、常艳芹、胡余生、杨江飞、王庆东、杨世海、王维、殷强、万勇、刘祺。

本文件及其所代替文件的历次版本发布情况为：

- 1967 年首次发布为 GB 1029—1967, 1980 年第一次修订, 1993 年第二次修订, 2005 年第三次修订；
- 本次为第四次修订。

三相同步电机试验方法

1 范围

本文件描述了三相同步电机的试验方法,包括一般性试验、效率测定、热试验、自励恒压时电压调整性能测定、转动和转矩惯量的测定、过电流和机械强度试验、负序电流承受能力试验、定子绕组端部动态特性测定、确定各参数的试验等。

本文件适用于额定功率为 1 kW(kVA)及以上的三相同步电机。

2 规范性引用文件

下列文件中的内容通过文中的规范性引用而构成本文件必不可少的条款。其中,注日期的引用文件,仅该日期对应的版本适用于本文件;不注日期的引用文件,其最新版本(包括所有的修改单)适用于本文件。

GB/T 755—2019 旋转电机 定额和性能

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/T 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/T 10069.1 旋转电机噪声测定方法及限值 第 1 部分:旋转电机噪声测定方法

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

GB/T 21211 等效负载和叠加试验技术 间接法确定旋转电机温升

GB/T 22715 旋转交流电机定子成型线圈耐冲击电压水平

GB/T 22719.1 交流低压电机散嵌绕组匝间绝缘 第 1 部分:试验方法

GB/T 22719.2 交流低压电机散嵌绕组匝间绝缘 第 2 部分:试验限值

GB/T 25442 旋转电机(牵引电机除外)确定损耗和效率的试验方法

GB/T 34861 确定大电机各项损耗的专用试验方法

JB/T 6227 氢冷电机气密封性检验方法及评定

JB/T 7836.1 电机用电加热器 第 1 部分: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定方法

JB/T 8990 大型汽轮发电机定子端部绕组模态试验分析和固有频率测量方法及评定

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 60051(所有部分) 直接作用模拟指示电测量仪表及其附件(Direct acting indicating analogue electrical measuring instruments and their accessories)

3 术语和定义

GB/T 755—2019、GB/T 25442 和 GB/T 34861 界定的以及下列术语和定义适用于本文件。

3.1

检查试验 routine test

对每台电机在制造期间或完工后所进行的试验,以判明其是否符合标准。

[来源:GB/T 2900.25—2008,411-53-02]

3.2

负载 load

在给定时刻,通过电路或机械装置施加于电机的全部电量(发电机)和机械量(电动机)的数值。

3.3

空载 no-load

电机处于零功率输出的旋转状态(其他均为正常运行条件)。

3.4

热稳定 thermal equilibrium

电机发热部件的温升在 0.5 h 内的变化不超过 1 K 的状态。

3.5

效率 efficiency

以同一单位表示的输出功率与输入功率之比。

注:通常以百分数表示。

3.6

初始起动阻抗(同步电动机) initial starting impedance(synchronous motors)

电机在静止状态下,施加的电枢电压与稳态平均电枢电流之比。

3.7

直轴同步电抗 direct-axis synchronous reactance

电机在额定转速下运行时,由直轴电枢电流产生的直轴电枢绕组总磁链所感应的持续交流基波电压与交流基波电流之比。

[来源:GB/T 2900.25—2008,411-50-07]

3.8

直轴瞬态电抗 direct-axis transient reactance

电机在额定转速下运行时,由直轴电枢绕组总磁链产生的电枢电压中交流基波分量在突变时的初始值,不考虑开始几周内的快速衰减部分,与同时变化的直轴电枢交流基波分量之比。

[来源:GB/T 2900.25—2008,411-50-09]

3.9

直轴超瞬态电抗 direct-axis sub-transient reactance

电机在额定转速下运行时,由直轴电枢绕组总磁链产生的电枢电压中交流基波分量在突变时的初始值,与同时变化的直轴电枢交流基波分量之比。

[来源:GB/T 2900.25—2008,411-50-11]

3.10

交轴同步电抗 quadrature-axis synchronous reactance

电机在额定转速下运行时,由交轴电枢电流产生的交轴电枢绕组总磁链所感应的持续交流基波电压与交流基波电流之比。

[来源:GB/T 2900.25—2008,411-50-08]

3.11

交轴瞬态电抗 quadrature-axis transient reactance

电机在额定转速下运行时,由交轴电枢绕组总磁链产生的电枢电压中交流基波分量在突变时的初始值,不考虑开始几周内的快速衰减部分,与同时变化的交轴电枢交流基波分量之比。

[来源:GB/T 2900.25—2008,411-50-10]

3.12

交轴超瞬态电抗 quadrature-axis sub-transient reactance

电机在额定转速下运行时,由交轴电枢绕组总磁链产生的电枢电压中交流基波分量在突变时的初始值,与同时变化的交轴电枢交流基波分量之比。

[来源:GB/T 2900.25—2008,411-50-12]

3.13

负序电抗 negative sequence reactance

电机在额定转速下运行时,由额定频率正弦负序电枢电流所引起的负序电枢电压无功基波分量与该电流之比。

[来源:GB/T 2900.25—2008,411-50-15]

3.14

零序电抗 zero sequence reactance

电机在额定转速下运行时,由额定频率零序电枢基波电流所引起的零序电枢电压无功基波分量与该电流之比。

[来源:GB/T 2900.25—2008,411-50-16]

3.15

保梯电抗 Potier reactance

以保梯法计算有载励磁时用以替代电枢漏抗的等值电抗。该电抗值考虑了励磁绕组在负载时和过励情况下的漏磁。

[来源:GB/T 2900.25—2008,411-50-13]

3.16

电枢漏抗 armature-leakage reactance

电机在额定转速下运行时,电枢绕组漏磁所引起的电枢电压无功分量与电枢基波电流之比。

3.17

电枢电阻 armature resistance

对应于某一绕组温度,在电枢绕组两端间用直流测得的电阻。

注:以每一相值来表示。

3.18

励磁绕组电阻 excitation winding resistance

对应于某一绕组温度,在励磁绕组两端间用直流测得的电阻。

3.19

负序电阻 negative sequence resistance

电机在额定转速下运行,由额定频率正弦负序电枢电流所引起的负序电枢电压的同相基波分量与该电流之比。

[来源:GB/T 2900.25—2008,411-50-19]

3.20

零序电阻 zero sequence resistance

电机在额定转速下运行时,由额定频率零序电枢基波电流所引起的零序电枢电压的同相基波分量与该电流之比。

[来源:GB/T 2900.25—2008,411-50-20]

3.21

短路比 short-circuit ratio

电机在额定转速下运行时,其电枢开路并保持额定电压时的励磁电流与电枢稳态对称短路并保持

额定电流时的励磁电流之比。

[来源:GB/T 2900.25—2008,411-50-21]

3.22

直轴瞬态开路时间常数 direct-axis transient open-circuit time constant

电机在额定转速下运行,当运行条件产生突变后,由于直轴磁通所产生的电枢绕组开路电压的渐变分量衰减到其初始值的 $1/e$,即 0.368 倍时所需的时间。

[来源:GB/T 2900.25—2008,411-48-27]

3.23

直轴瞬态短路时间常数 direct-axis transient short-circuit time constant

电机在额定转速下运行,当运行条件产生突变后,直轴短路电枢绕组电流的渐变分量衰减到其初始值的 $1/e$,即 0.368 倍时所需的时间。

[来源:GB/T 2900.25—2008,411-48-28]

3.24

直轴超瞬态开路时间常数 direct-axis sub-transient open-circuit time constant

电机在额定转速下运行,当运行条件产生突变后,由于直轴磁通所产生的电枢绕组开路电压在开始几周内出现的迅变分量衰减到其初始值的 $1/e$,即 0.368 倍时所需的时间。

[来源:GB/T 2900.25—2008,411-48-29]

3.25

直轴超瞬态短路时间常数 direct-axis sub-transient short-circuit time constant

电机在额定转速下运行,当运行条件产生突变后,直轴短路电枢电流在开始几周内出现的迅变分量衰减到其初始值的 $1/e$,即 0.368 倍时所需的时间。

[来源:GB/T 2900.25—2008,411-48-30]

3.26

交轴瞬态开路时间常数 quadrature-axis transient open-circuit time constant

电机在额定转速下运行,当运行条件产生突变后,由于交轴磁通所产生的电枢绕组开路电压的渐变分量衰减到其初始值的 $1/e$,即 0.368 倍时所需的时间。

[来源:GB/T 2900.25—2008,411-48-32]

3.27

交轴瞬态短路时间常数 quadrature-axis transient short-circuit time constant

电机在额定转速下运行,当运行条件产生突变后,交轴短路电枢绕组电流的渐变分量衰减到其初始值的 $1/e$,即 0.368 倍时所需的时间。

[来源:GB/T 2900.25—2008,411-48-33]

3.28

交轴超瞬态开路时间常数 quadrature-axis sub-transient open-circuit time constant

电机在额定转速下运行,当运行条件产生突变后,由于交轴磁通所产生的电枢绕组开路电压的迅变分量衰减到其初始值的 $1/e$,即 0.368 倍时所需的时间。

[来源:GB/T 2900.25—2008,411-48-34]

3.29

交轴超瞬态短路时间常数 quadrature-axis sub-transient short-circuit time constant

电机在额定转速下运行,当运行条件产生突变后,交轴短路电枢绕组电流在开始几周内出现的迅变分量衰减到其初始值的 $1/e$,即 0.368 倍时所需的时间。

[来源:GB/T 2900.25—2008,411-48-35]

3.30

单位加速时间 unit acceleration time

在加速转矩等于额定有功功率与额定角速度之比并保持不变的情况下,电机旋转部件自静止加速到额定转速所需的时间。

[来源:GB/T 2900.25—2008,411-48-15]

3.31

储能常数 stored energy constant

额定转速运行的转子中储存的动能与额定视在功率之比。

3.32

额定励磁电流 rated excitation current

电机在额定电压、额定电流、额定功率因数和额定转速下运行时,励磁绕组中的电流。

3.33

额定电枢短路电流时的励磁电流 excitation current, corresponding to the rated armature short-circuit current

电机电枢(一次)绕组短路,保持额定电枢电流在额定转速下运行时,励磁绕组中的电流。

3.34

额定电压调整率 rated voltage regulation

转速和励磁电流不变,从额定运行状态切换到电枢开路的无负载状态时电机端电压的变化。

3.35

频率响应特性 frequency response characteristics

额定供电频率下,除非另有规定,一组对应于转差率(slip)的特性曲线或者是由相关的复导纳或其复阻抗的倒数(或者他们的组合)来表达的分析式。

4 符号

下列符号适用于本文件。

f :频率,单位为赫兹(Hz)

f_N :额定频率,单位为赫兹(Hz)

$G(js)$:励磁因数频率响应特性复数

H :储能常数,单位为秒(s)

I, i :电流,单位为安培(A)

I_{fk} :额定电枢短路电流时的励磁电流,单位为安培(A)

I_{fN} :额定励磁电流,单位为安培(A)

I_N :额定电流,单位为安培(A)

K_c :短路比

k_θ :温度修正系数

n :工作转速,单位为转每秒(r/s)

P :功率,单位为瓦特(W)

P_0 :空载输入功率,单位为瓦特(W)

P_1 :输入功率,励磁功率除外¹⁾,单位为瓦特(W)

P_2 :输出功率,单位为瓦特(W)

1) 本文件所述的测试中,除非另有注明, P_1 和 P_2 分别指输入电功率和输出机械功率。

P_b :电刷电损耗,单位为瓦特(W)
 P_e :励磁回路损耗,单位为瓦特(W)
 P_{1E} :他励的励磁功率,单位为瓦特(W)
 P_{Ed} :励磁机损耗,单位为瓦特(W)
 P_{el} :电功率,励磁功率除外,单位为瓦特(W)
 P_f :励磁绕组损耗,单位为瓦特(W)
 P_{fe} :铁耗,单位为瓦特(W)
 P_{fw} :风摩耗,单位为瓦特(W)
 P_c :恒定损耗,单位为瓦特(W)
 P_{LL} :负载杂散损耗,单位为瓦特(W)
 P_{mech} :机械功率,单位为瓦特(W)
 P_k :短路损耗,单位为瓦特(W)
 P_s :定子绕组损耗,单位为瓦特(W)
 P_T :总损耗,单位为瓦特(W)
 R :绕组电阻,单位为欧姆(Ω)
 R_{II} :端电阻平均值,单位为欧姆(Ω)
 R_{1p} :相电阻平均值,单位为欧姆(Ω)
 $R_{(0)}$:零序电阻,单位为欧姆(Ω)
 $R_{(1)}$:正序电枢绕组电阻,单位为欧姆(Ω)
 $R_{(2)}$:负序电阻,单位为欧姆(Ω)
 R_a :电枢直流电阻,单位为欧姆(Ω)
 R_f :励磁绕组直流电阻,单位为欧姆(Ω)
 s :转差率,转差除以同步转速的标么值
 S_N :额定视在功率,单位为千伏安(kVA)
 T :机械转矩,单位为牛顿米($N \cdot m$)
 T_c :转矩修正值,单位为牛顿米($N \cdot m$)
 T_d :转矩测试装置的读数值,单位为牛顿米($N \cdot m$)
 U_N :额定电压,单位为伏特(V)
 U, u :电压,单位为伏特(V)
 $X_{(0)}$:零序电抗,单位为欧姆(Ω)
 $X_{(1)}$:正序电抗,单位为欧姆(Ω)
 $X_{(2)}$:负序电抗,单位为欧姆(Ω)
 X_d :直轴同步电抗,单位为欧姆(Ω)
 X'_d :直轴瞬态电抗,单位为欧姆(Ω)
 X''_d :直轴超瞬态电抗,单位为欧姆(Ω)
 X_p :保梯(Potier)电抗,单位为欧姆(Ω)
 X_q :交轴同步电抗,单位为欧姆(Ω)
 X'_q :交轴瞬态电抗,单位为欧姆(Ω)
 X''_q :交轴超瞬态电抗,单位为欧姆(Ω)
 X_σ :电枢漏抗,单位为欧姆(Ω)
 $X_d(js)$:直轴电抗频率响应特性复数
 $X_q(js)$:交轴电抗频率响应特性复数
 Z :阻抗,单位为欧姆(Ω)

Z_N : 额定阻抗, 单位为欧姆(Ω)

ΔU_N : 额定电压调整率, 单位为百分数($\%$)

δ : 功角, 单位为弧度(rad)

τ_a : 电枢短路时间常数, 单位为秒(s)

τ_{kd} : 直轴短路等效阻尼绕组时间常数, 单位为秒(s)

τ_{kdo} : 直轴开路等效阻尼电路时间常数, 单位为秒(s)

τ'_d : 直轴瞬态短路时间常数, 单位为秒(s)

τ'_{do} : 直轴瞬态开路时间常数, 单位为秒(s)

τ'_q : 交轴瞬态短路时间常数, 单位为秒(s)

τ'_{qo} : 交轴瞬态开路时间常数, 单位为秒(s)

τ''_d : 直轴超瞬态短路时间常数, 单位为秒(s)

τ''_{do} : 直轴超瞬态开路时间常数, 单位为秒(s)

τ''_q : 交轴超瞬态短路时间常数, 单位为秒(s)

τ''_{qo} : 交轴超瞬态开路时间常数, 单位为秒(s)

τ_J : 单位加速时间, 单位为秒(s)

5 基本要求

5.1 试验时电机的状态

为使试验条件达到等同于或非常接近于正常运行工况, 试验应在主要部件已安装就位, 装配完成的电机上进行。

注 1: 最好的方法是从连续生产的产品中随机选取电机而不作特殊考虑。

如果在类似设计的电机上的附加试验表明, 经足够长时间运转以后摩擦损耗可忽略不计, 则试验时密封件可拆除。

注 2: 轴承和/或内部密封件在经过足够长时间的运转后会减少摩擦, 因此, 试验前电机宜运转一段时间。

组成一套试验程序的各分项试验应按所列顺序进行, 这些试验不必一项紧接着一项立即进行。然而, 如果这些分项试验延迟进行, 则在获得试验数据之前, 应重新达到规定的热状态。

对电刷可调的电机, 电刷应放置到相应的规定定额的位置。

轴承的损耗基于轴承运行的温度、润滑油的类型以及润滑油的温度。

当轴承需要独立的润滑系统时其损耗宜单独列出。

电机带有推力轴承的情况下, 应仅将电机自身产生的那部分推力轴承损耗包含在总损耗中, 推力负载产生的摩擦损耗是否计入总损耗可根据协议。

如果被试电机是直接流体冷却, 则轴承损耗分布在被试电机及与其机械耦在一起的其他设备上, 例如涡轮机, 轴承损耗的分布与其旋转部件的质量成正比例; 如果不是直接流体冷却, 则轴承损耗的分布应按照协议认可的经验公式来确定。

5.2 供电电源

5.2.1 电压

电源电压应符合 GB/T 755—2019 中 7.1、7.2、7.3 的要求。

5.2.2 频率

测量过程中, 电源频率平均值变化应在试验所需频率的 $\pm 0.1\%$ 范围内。

5.3 测试仪器

5.3.1 一般要求

环境条件应在仪器制造商给出的规定范围之内,宜根据仪器制造商的说明书进行温度修正。

宜采用数字仪器。

模拟仪器的准确度通常以满量程的百分数表示,因此,应根据实际情况尽量选择小的量程。

仪器特别是电流传感器的满量程应与被试电机的功率相匹配。

模拟仪器的观测读数宜在满量程的 2/3 以上部分。

在进行电机负载试验中,输出功率和其他测量的参量会不可避免地缓慢波动,因此,各个试验点均采用合适的数字仪器在不超过 15 s 的若干波动周期内采样较多(通常几百个)的数据,利用平均值确定效率。

5.3.2 电量测量仪

试验时采用的测量用仪器及其附件,如测量互感器、分流器和电桥,应具有 IEC 60051 规定的 0.5 级准确度。直接法确定效率试验时,电量测量仪应具有 IEC 60051 规定的 0.2 级准确度,在功率因数为 1.0 时总不确定度应达到 0.2 级,如使用有互感器或传感器,应包括其所有误差。

除非另有说明,本文件所述三相线电流和电压均采用算术平均值。

5.3.3 转矩测量

转矩测试设备应至少具有 0.2 级准确度,测量的最小转矩值应不小于其标称转矩的 10%,如果转矩测试设备具有更高的准确度,则允许转矩测量范围相应扩大。

注:如准确度等级为 0.1 级,则意味着允许最小测试转矩为其标称转矩的 5%。

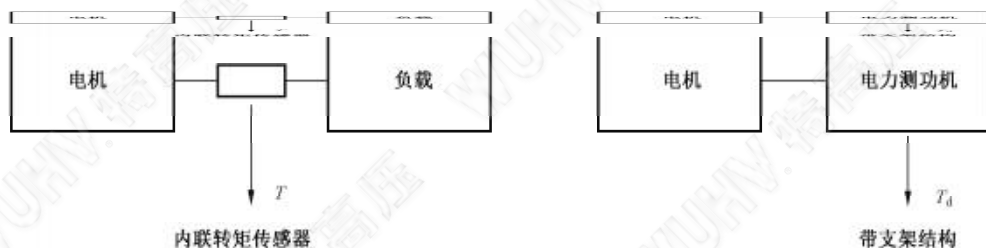


图 1 转矩测量

当采用带有底座支架结构的测功机方式测取电机轴转矩时(见图 1),应进行转矩修正试验以补偿负载设备的轴承摩擦损耗,这也适用于转矩测试设备与被试电机输出轴之间有轴承的情况。电机的转矩 T 按公式(1)计算:

$$T = T_d + T_c \quad \dots\dots\dots (1)$$

式中:

T_d ——负载试验中转矩的读数,单位为牛顿米(N·m);

T_c ——摩擦损耗的转矩修正值,单位为牛顿米(N·m);

应注意转矩传感器的温度,如靠近转子,则温度可高于环境温度,对总体不确定度将产生明显的影响,这种情况下,不确定度应控制在满量程的 0.15%,如果无法保证,则应进行温度修正。

宜使用弹性联轴器并将轴系对准以尽可能减少寄生负载。

5.3.4 转速和频率测量

测量频率的仪器应有满量程 $\pm 0.1\%$ 的准确度。转速测量仪的准确度宜在 0.1 r/min 以内。

注：转速单位为： $\text{min}^{-1} = \text{s}^{-1} \times 60$ 。

可采用频闪法或转速计(机械或电的)测量转速,当电机和其他电机一起或自行运转于同步状态时,可采用频率计来测量转速。

5.3.5 温度测量

测量温度的仪器应有 $\pm 1 \text{ K}$ 的准确度。

5.3.6 其他

测量直流电阻的仪器应至少具有 0.2 级准确度。

示波测量仪和其他记录仪应考虑到被试电机的定额来选择适当的准确度。

5.4 电阻

5.4.1 一般要求

直流电阻应在转子静止时在绕组终端直接测量。

电枢绕组电阻应每相分别测量。若因某些原因,相电阻不能直接测量,则应在电枢绕组每一对接线端之间进行测量。

应记录测试仪器的识别号,以便在热试验中使用同一测试仪器。

5.4.2 试验电阻

绕组电阻 R 的单位为欧姆(Ω),是端电阻的平均值,宜用恰当的方法测定。检查试验时,每一个电阻可测量一次。

R_f 表示励磁绕组电阻。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。

热试验结束时电阻的测定应按 GB/T 755—2019 中 8.6.2.3.3 所述的外推法,用尽可能短的时间而非 GB/T 755—2019 的表 6 中规定的时间间隔,然后外推到零。

绕组试验温度应按 5.4.3 确定。

5.4.3 绕组温度

绕组试验温度应按下述一种方法确定(按所列排序):

a) 由 5.4.2 所述的外推法求得的额定负载试验电阻 R_N 来确定;

注:用于检查试验的电机不能拆卸,则可采用测试电阻的方法来代替测试绕组温度。

b) 由埋置检温计(ETD)或热电偶直接测得;

c) 根据同一结构和电气设计的完全相同的电机按 a) 所得的温度来确定;

d) 若无负载能力时,可按 GB/T 21211 来确定;

e) 当不能直接测量额定负载试验电阻 R_N 时,应假定绕组温度等于表 1 中列出的额定热分级下的基准温度。

表 1 基准温度

绝缘结构热分级	基准温度 ℃
130(B)	95
155(F)	115
180(H)	135

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。

5.4.4 修正到基准冷却介质温度

试验中记录的绕组电阻值应修正到 25 ℃ 标准基准冷却介质温度。

绕组电阻的温度修正系数按公式(2)确定:

$$k_{\theta} = \frac{235 + \theta_w + 25 - \theta_c}{235 + \theta_w} \dots\dots\dots (2)$$

式中:

k_{θ} ——绕组温度修正系数;

θ_c ——试验时入口处冷却介质温度,单位为摄氏度(℃);

θ_w ——按 5.4.2 确定的绕组温度,单位为摄氏度(℃);

对铜绕组,温度常数为 235。对铝绕组,则为 225。

对以水为初级或次级冷却介质的电机,水的基准温度应按 GB/T 755—2019 中表 5 的规定为 25 ℃。也可为根据协议规定的其他数值。

5.5 励磁回路

5.5.1 励磁机的类型及励磁机损耗

根据以下励磁系统类型,确定励磁机损耗 P_{Ed} (W):

a) 轴带励磁机

直流或交流励磁机由主机的轴直接或通过齿轮驱动。如果主机是同步电机,通过集电环和电刷向磁场绕组供给励磁功率。

该类型励磁系统励磁机损耗等于从励磁机轴上吸收的功率(扣除风摩耗)加上励磁绕组端从他励电源吸收的电功率 P_{IE} 减去励磁机输出端输出的有功功率。励磁机输出端输出的有功功率等于按 5.5.2 确定的励磁绕组损耗加上按 5.5.4 确定的电刷电损耗(对同步电机)。

注 1: 如励磁机可脱开并单独试验,其损耗可按 7.2.3.2.1 确定。凡励磁机使用独立辅助电源励磁,此励磁机的损耗中还包括辅助电源的损耗,除非此损耗已经计入主机的辅助损耗。

b) 无刷励磁机

与主机机械连接的交流励磁机直接通过旋转整流器向磁场绕组供电,无需集电环和电刷。励磁机可是同步发电机或是感应发电机。

同步励磁机的励磁功率可由直接机械连接的永磁交流辅助励磁机供给,或由主机定子槽中[同 e)]辅助(二次)绕组,或者静止电源供给。

感应励磁机与可变电压交流电源连接。

该类型励磁系统励磁机损耗等于励磁机轴端吸收的功率,扣除风摩耗(如对主机和励磁机组做相关试验),加上磁场绕组或定子绕组(对感应励磁机)从独立电源(如有)吸收的电功率 P_{IE} ,

减去励磁机在旋转整流器输出端提供的有功功率。

注2：如励磁机可脱开单独试验，其损耗可按7.2.3.2.1确定。凡励磁机用独立辅助电源励磁，此励磁机的损耗中还包括辅助电源的损耗，除非此损耗已经计入主机的辅助损耗。

c) 独立旋转励磁机

由独立的电动—发电机组中的直流或交流发电机向主机的磁场绕组提供励磁电流。

该类型励磁系统励磁机损耗是驱动电机吸收的功率加上独立辅助电源吸收的功率（包括由独立电源提供给驱动和被驱动电机励磁绕组的功率），与按5.5.2和5.5.3确定的励磁输出功率之差。励磁机损耗可按7.2.3.2.1确定。

d) 静止励磁系统（静止励磁机）

由静止电源如电池或独立电源供电的功率变流器给主机的磁场绕组提供励磁功率。

该类型励磁系统励磁系统损耗等于励磁系统从电源吸收的电功率加上独立辅助电源提供的功率与按5.5.2和按5.5.3规定的励磁输出功率之差。

注3：如系统由变压器供电，励磁机损耗还包括此变压器的损耗。

e) 辅助绕组励磁（辅助绕组励磁机）

交流发电机的励磁功率由主机定子槽中利用基波或谐波磁场能量的辅助（二次）绕组，通过整流器、集电环和电刷供给磁场绕组。

该类型励磁系统励磁机损耗是辅助（次级）绕组的铜耗和由谐波磁通增量产生的附加铁耗之和。附加铁耗是辅助绕组加载时和无载时的损耗差。

注4：由于难于分离励磁部件的损耗，因此，宜在确定所有损耗时将这些损耗视作定子整体损耗一部分。

对于c)和d)，未考虑励磁电源（如有）内部损耗、电源和电刷之间连接线或者电源和励磁绕组线端之间连接线的损耗。

由b)到e)所述的单元构成的系统提供励磁，则励磁机损耗应包含该类型励磁机的相关损耗。

5.5.2 励磁绕组损耗及励磁回路测量

励磁绕组损耗等于励磁电流 I_e 和励磁电压 U_e 的乘积。

电压 U_e 和电流 I_e 的确定取决于励磁系统（见5.5.1）的型式。适用时，试验数据应按如下要求记录：

a) 对由轴带的、独立旋转的、静止的和辅助绕组励磁机励磁的电机[见5.5.1的a)、c)、d)和e)]，电压 U_e 和电流 I_e 的测量：

- 1) 在直流电机的励磁绕组出线端；
- 2) 在同步电机的磁场绕组集电环上。

b) 对无刷励磁机励磁的电机[见5.5.1的b)]，试验数据应按以下一种方法记录：

- 1) 用连接到磁场绕组末端的辅助（临时的）集电环测量电压 U_e 。根据电压和电阻 R_e 求取磁

场绕组电流 $I_e = \frac{U_e}{R_e} = \frac{U_f}{R_f}$ 。磁场绕组的电阻在电机切断电源后，按5.4.2用外推法测得。

- 2) 可使用适合于直接测量磁场绕组电流的功率集电环测量电压 U_e 和电流 I_e 。

注： U_e 和 U_f 之间的差值（电压降）在实际中几乎忽略。

电压和电流应在温度稳定后测量。

励磁回路损耗 P_e 按7.2.3.2.1确定。

5.5.3 他励励磁功率

独立电源供电的励磁功率 P_{1E} (W) 是：

——5.5.1a)和5.5.1b)型励磁机的励磁功率（直流或同步励磁机）或定子绕组输入功率（感应励磁

- 机),包括了一部分励磁机损耗 P_{Ed} (在感应励磁机中损耗更大些),而大部分 P_{e} 通过轴提供;
——5.5.1c)和 5.5.1d)型的励磁机,等于励磁回路损耗, $P_{\text{1E}}=P_{\text{e}}$;
——5.5.1e)型励磁机, $P_{\text{1E}}=0$,励磁功率完全由轴提供,对永磁电机,同样 $P_{\text{1E}}=0$ 。

5.5.4 励磁回路电刷电损耗

励磁回路电刷电损耗 P_{b} (W)确定如下:
按正极或负极中的每个电刷指定的电压降确定,见公式(3):

$$P_{\text{b}}=2\times U_{\text{b}}\times I_{\text{e}}\dots\dots\dots(3)$$

- 式中:
 I_{e} ——按 15.26 确定的励磁绕组电流,单位为安培(A);
 U_{b} ——不同类型电刷的每电刷电压降,单位为伏特(V):
- 1.0 V:炭质、电石墨或石墨电刷;
 - 0.3 V:金属炭质混合电刷。

5.5.5 励磁回路损耗

励磁回路损耗 P_{e} (W)等于励磁机的损耗(见 5.5.1)、励磁绕组损耗(见 5.5.2)和同步电机的电刷(如有)电损耗(见 5.5.4)之和。

6 一般性试验

6.1 绝缘电阻的测定

6.1.1 绕组对机壳及绕组相互间绝缘电阻的测定

6.1.1.1 测量时电机的状态

测量电机绕组的绝缘电阻时,应分别在实际冷状态和热状态(或热试验后)下进行。检查试验时,如无其他规定,允许在实际冷状态下进行测量。测量绝缘电阻时应同时测量并记录绕组温度,在实际冷状态下测量时可取周围介质温度作为绕组温度。

6.1.1.2 绝缘电阻表的选择

测量绕组对机壳及绕组相互间的绝缘电阻,应根据被测绕组的额定电压按表 2 选择绝缘电阻表。

表 2 绝缘电阻表的选择

单位为伏特

被测绕组额定电压 U_{N}	绝缘电阻直流测量电压
$U_{\text{N}}\leq 1\,000$	500
$1\,000<U_{\text{N}}\leq 2\,500$	1\,000
$2\,500<U_{\text{N}}\leq 5\,000$	2\,500
$5\,000<U_{\text{N}}\leq 12\,000$	5\,000
$U_{\text{N}}>12\,000$	10\,000

6.1.1.3 测量方法

测量绕组绝缘电阻时,如各相绕组的始末端均引出,则应分别测量各绕组对机壳及绕组相互间的绝

绝缘电阻,这时不参加试验的其他绕组和埋置检温计等元件应与铁芯或机壳作电气连接,机壳应接地。如三相绕组已在电机内部连接仅引出三个出线端时,则测量所有连在一起的绕组对机壳的绝缘电阻。

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,可用普通绝缘电阻表测量。

不能承受绝缘电阻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,应在试验电压施加 1 min 后读取数据,并记录绕组温度。

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

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

绝缘电阻测量结束后,每个回路应对地放电。

6.1.2 其他绝缘电阻的测定

6.1.2.1 轴承绝缘电阻的测定

轴承绝缘电阻用不大于 1 000 V 的绝缘电阻表测量。

6.1.2.2 埋置检温计绝缘电阻的测定

埋置检温计绝缘电阻按 JB/T 10500.1 的规定测定。

6.1.2.3 加热器绝缘电阻的测定

加热器绝缘电阻按 JB/T 7836.1 的规定测定。

6.2 绕组在实际冷状态下直流端电阻和相电阻的测定

6.2.1 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。

6.2.2 绕组直流端电阻的测定

6.2.2.1 概述

绕组出线端 U 与 V、V 与 W、W 与 U 间的直流电阻称为端电阻,分别记为 R_{uv} 、 R_{vw} 和 R_{wu} 。绕组直

流端电阻可用电桥法、微欧计法、直流电压表-电流表法或其他方法测量。

6.2.2.2 电桥法

使用电桥测量时,每一电阻应测量三次,每次应在电桥重新平衡后测取读数。每次读数与三次读数的算术平均值之差,应不超过平均值的 $\pm 0.5\%$,取其平均值作为电阻的实际值。

如绕组的端电阻在 $1\ \Omega$ 及以下时,应用开尔文[双]电桥测量。

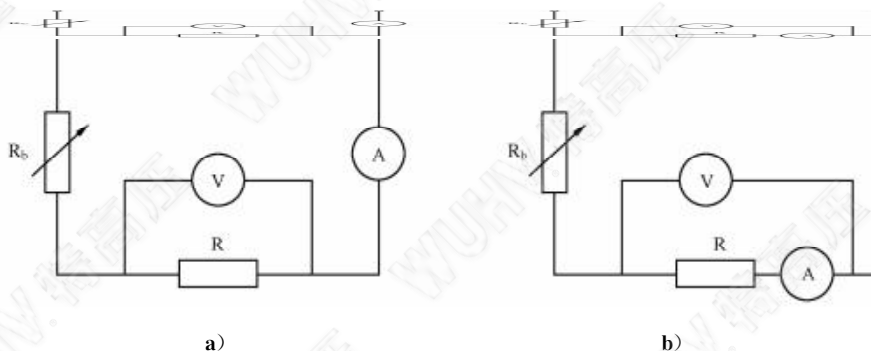
6.2.2.3 微欧计法

当采用自动检测装置或数字式微欧计等仪表测量绕组端电阻时,通过被测绕组的试验电流应不超过其正常运行时电流的 10% ,通电时间不应超过 $1\ \text{min}$ 。若电阻小于 $0.01\ \Omega$,则通过被测绕组的电流不宜太小。

6.2.2.4 直流电压表-电流表法

电压表-电流表法原理接线图见图2。图2a)适用于电压表内阻与被测电阻之比大于200,图2b)适用于电压表内阻与被测电阻之比小于200。

测量时,所加电流不应超过绕组额定电流值的 10% ,每次通电时间不超过 $1\ \text{min}$ 。测量时应同时读取电流值和电压值。每一电阻至少在三个不同电流值下进行测量。每个测量值与几次测量值的算术平均值之差应不大于平均值的 $\pm 0.5\%$,取其平均值作为被测电阻的实际值测量值。



标引序号说明:

R_b —— 调节限流电阻;

R —— 被测绕组端电阻;

V —— 电压表;

A —— 电流表。

图2 电压表-电流表法原理接线图

6.2.2.5 绕组初始端电阻的算术平均值

绕组初始端电阻的算术平均值 $R_1(\Omega)$ 按公式(4)计算:

$$R_1 = (R_{uv} + R_{vw} + R_{wu}) / 3 \quad \dots\dots\dots (4)$$

式中:

R_{uv} 、 R_{vw} 、 R_{wu} —— 按 6.2.2.1 的规定测得的端电阻值。

6.2.2.6 相电阻的计算

根据测量的端电阻值,图3中的各相电阻值 R_u 、 R_v 、 $R_w(\Omega)$ 按公式(5)~公式(10)计算:

对星形接法的绕组：

$$R_u = R_{\text{med}} - R_{vw} \quad \dots\dots\dots (5)$$

$$R_v = R_{\text{med}} - R_{wu} \quad \dots\dots\dots (6)$$

$$R_w = R_{\text{med}} - R_{uv} \quad \dots\dots\dots (7)$$

对三角形接法的绕组：

$$R_u = \frac{R_{vw}R_{wu}}{R_{\text{med}} - R_{uv}} + R_{uv} - R_{\text{med}} \quad \dots\dots\dots (8)$$

$$R_v = \frac{R_{wu}R_{uv}}{R_{\text{med}} - R_{vw}} + R_{vw} - R_{\text{med}} \quad \dots\dots\dots (9)$$

$$R_w = \frac{R_{uv}R_{vw}}{R_{\text{med}} - R_{wu}} + R_{wu} - R_{\text{med}} \quad \dots\dots\dots (10)$$

式中：

$$R_{\text{med}} = \frac{R_{uv} + R_{vw} + R_{wu}}{2}, \text{单位为欧姆}(\Omega);$$

R_{uv} 、 R_{vw} 、 R_{wu} ——按 6.2.2.1 的规定测得的端电阻值，单位为欧姆(Ω)。

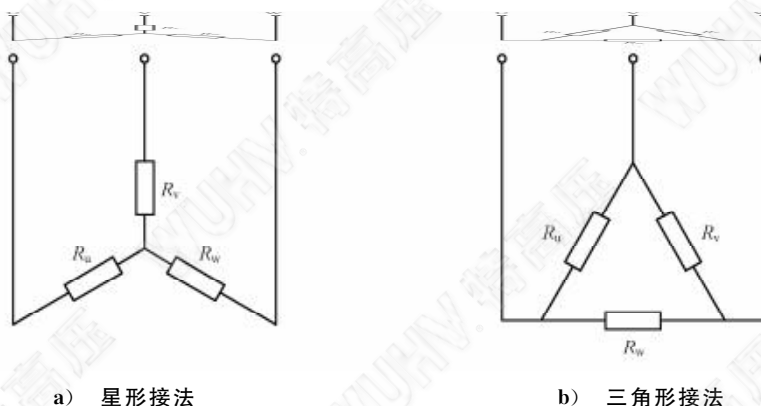


图 3 三相绕组接法示意图

如果各线端间的电阻值与三个线端电阻的平均值之差，对星形接法的绕组，均不大于平均值的 2%，对三角形接法的绕组，均不大于平均值的 1.5% 时，则相电阻平均值 R_{1p} (Ω) 可按公式(11)或公式(12)计算：

对星形接法的绕组：

$$R_{1p} = \frac{1}{2} R_1 \quad \dots\dots\dots (11)$$

对三角形接法的绕组：

$$R_{1p} = \frac{3}{2} R_1 \quad \dots\dots\dots (12)$$

式中：

R_1 ——为端电阻的算数平均值，按 6.2.2.5 确定，单位为欧姆(Ω)。

6.2.3 绕组直流相电阻的测定

如需测定相电阻，应按 6.2.1 的规定测定绕组温度，按 6.2.2.2、6.2.2.3 或 6.2.2.4 规定的方法测量相电阻 R_u 、 R_v 和 R_w ，单位为欧姆(Ω)，相电阻的平均值 R_{1p} (Ω) 按公式(13)计算：

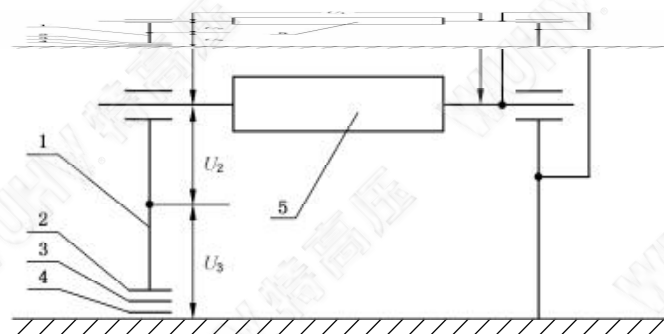
$$R_{1p} = (R_u + R_v + R_w) / 3 \quad \dots\dots\dots (13)$$

6.2.4 励磁绕组直流电阻的测定

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。

6.3 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 4,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。



标引序号说明:

- 1——轴承座;
- 2——绝缘垫片;
- 3——金属垫片;
- 4——绝缘垫片;
- 5——转子。

图 4 轴电压测量示意图

6.4 空载特性的测定(空载饱和试验)

6.4.1 试验程序

空载饱和试验进行如下:

- a) 被试电机用某一原动机驱动作为发电机运行;或
- b) 被试电机接入交流对称三相电压(所谓对称电压,符合 GB/T 755—2019 中 7.2 的规定)作为电动机轴端空载运行;或
- c) 被试电机处于减速中。

进行空载试验时,励磁宜按电压自高到低逐步调节使用均匀分布的若干点;若可能,被试电机的电压从对应于额定负载励磁时的电压值开始,但不低于被试电机额定电压的 1.3 倍,下降至额定电压的 0.2 倍,除非剩磁电压较高。

定额大于或等于 10 MVA 的电机,试验电压宜限制在 1.2 倍额定电压。

当励磁电流减小到零时,测量发电机的剩磁电压。

优选采用一台校准过的直流原动机或转矩仪来进行 a) 试验,也可在此试验过程中确定空载损耗。

当使用 b) 试验时,也应测量电枢电流。在每个电压处,都应记录最小电枢电流点的读数,此时相应的功率因数为 1。

当使用 c) 试验时,减速率不宜超过 0.04 倍额定转速每秒,然而,当被试电机减速率在 0.02 倍额定转速每秒以上时,试验中他励励磁应具有更好的稳定性。在断电之前,励磁加到所需最高值,但不低于 1.3 倍额定电压。逐步降低励磁,且在每一步,保持励磁电流恒定的同时读取转速(频率)。应重复进行减速试验以得到需要的所有步骤。

- 同时记录:
- 励磁电流;
 - 线电压;
 - 频率(或转速);
 - 对于 b) 试验,对应功率因数为 1 时的最小电枢电流;
 - 对于 c) 试验,电枢电压。
- 本试验不适用于永磁电机。

6.4.2 确定空载特性(饱和)

在额定转速下以终端的电枢开路绕组电压(纵坐标轴)对励磁电流(横坐标轴)作曲线,如图 5 所示。若剩磁电压较高,空载特性曲线与纵轴原点上方相交,则应对其进行修正。为此,将空载曲线的直线部分,这部分通常称为气隙线,延长相交于横轴,横坐标轴上被延长线相切的长度表示修正值,此修正值应加到所有测得的励磁电流值上。

当试验频率与额定值有差异时,所有测得的电压值按公式(14)折算到额定频率。

$$U_0 = \frac{f_N}{f} U \dots\dots\dots (14)$$

- 式中:
- U_0 ——折算到额定频率时的空载电压,单位为伏特(V);
 - U ——试验时测得的空载电压(三相平均值),单位为伏特(V)。

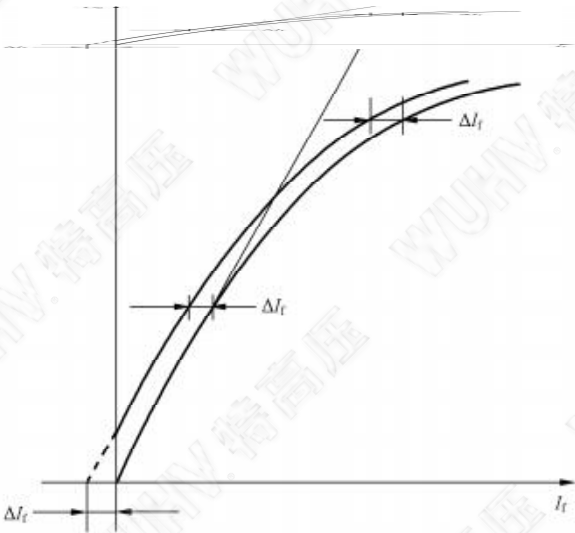


图 5 气隙线

6.5 稳态短路特性的测定

6.5.1 试验程序

稳态三相短路试验进行如下:

- a) 被试电机用某一原动机驱动作为发电机运行;或
- b) 被试电机减速试验;或
- c) 被试电机作为电动机运行。

当使用 a) 或 b) 试验时,宜尽可能地靠近电机终端进行短路,短路后施加励磁。接近额定电枢电流处取一个读数。

优选采用一台校准过的直流原动机来进行 a) 试验,也可在此试验过程中确定短路损耗。

同步记录励磁电流和电枢线电流。

转速(或频率)与额定值可能会有差异,但不宜低于额定值的 0.2。

当使用 b) 试验时,减速率不宜超过 0.10 倍额定转速每秒,若被试电机减速率超过 0.04 倍额定转速每秒,则需要他励励磁。

当使用 c) 试验时,电机以一个固定电压作为同步电动机运行,电压最好为大约 1/3 正常电压,但电压值最低时应能够稳定运行。调节励磁电流电枢电流会相应变化,宜在电枢额定电流的 125% 和 25% 之间取 6 个变化步骤,且应在很低电流处取一个或两个点。

最大试验电流值通常设置在 125%,因为定子散热问题可能不允许超出额定电流 100% 无损运行,所以宜从制造商处获知最大试验电流值。

各试验点按降序调节(为使定子线圈温度更均匀),记录电枢电流、电枢电压和励磁电流。

本试验不适用于永磁电机。

6.5.2 三相稳态短路特性

根据试验数据,以终端测得的电枢线电流(纵坐标轴)对励磁电流(横坐标轴)作图,见图 32,绘制短路特性曲线。

6.6 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。

6.7 超速试验

如各类型电机标准中无规定时,超速试验允许在冷态下进行。对大型电机,允许对转子单独进行超速试验。

试验时,将电动机的转速提高到或为 1.2 倍最高额定转速或各类型电机标准中规定的转速,或规定的最高转速,历时 2 min。

超速的方法有下列两种:

- a) 提高被试电机的电源频率;
- b) 用原动机直接驱动或通过变速驱动被试电机。

超速试验时,应采取安全防护措施,尽可能远距离测量转速。

6.8 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。

6.9 振动的测定

振动的测定按 GB/T 10068 规定的方法进行。

6.10 密封状态检查和漏氢测定

密封状态检查和漏氢的测定按 JB/T 6227 规定的方法进行。

6.11 匝间冲击耐电压试验

如需进行此项试验,按 GB/T 22715 和 GB/T 22719.1、GB/T 22719.2 规定的方法进行。

6.12 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。

6.13 工频耐电压试验

6.13.1 试验要求

工频耐电压试验要求如下。

- a) 试验时,电压应施于绕组与机壳之间,此时其他不参与试验的绕组均应和铁芯及机壳作电气连接。耐电压试验应在需要进行的试验全部完成后进行。
- b) 试验电压的频率为工频,电压波形宜接近正弦波形。耐电压试验在电机静止的状态下进行。试验前,应先测量绕组的绝缘电阻。
- c) 对额定电压在 1 kV 以上的电机,若每相的两端均单独引出时,则应每相逐一进行试验。
- d) 试验变压器应有足够的容量,可按下列方法选择:
 - 对低压电动机,每 1 kV 试验电压,试验变压器的容量应不小于 1 kVA;
 - 对高压电动机,当其电容量较大时,试验变压器的容量应大于公式(15)求得的计算容量 S_T (kVA):

$$S_T = 2\pi f C U_t U_{TN} \times 10^{-3} \quad \dots\dots\dots (15)$$

式中:

f ——电源频率,单位为赫兹(Hz);

C ——被试电机的电容量,单位为法拉(F);

U_t ——试验电压,单位为伏特(V);

U_{TN} ——试验变压器高压侧的额定电压,单位为伏特(V)。

对分马力电动机,每 1 kV 试验电压,试验变压器的容量应不小于 0.5 kVA。

- e) 额定电压在 3 kV 及以上的电动机进行耐电压试验时,宜在试验变压器接线柱与被试绕组之间并接入放电铜球。试验电压应在试验变压器的高压侧进行测量。
- f) 对于额定电压为 6 kV 及以上的电机,如果工频电源设备不能满足要求,经过协商,可用直流试验来替代,电压为根据 GB/T 755—2019 中表 17 所得值的 1.7 倍。
- g) 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,应将绝缘引水管中的水吹干。

- h) 试验前,应采取切实安全的防护措施,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。

6.13.2 试验电压和时间

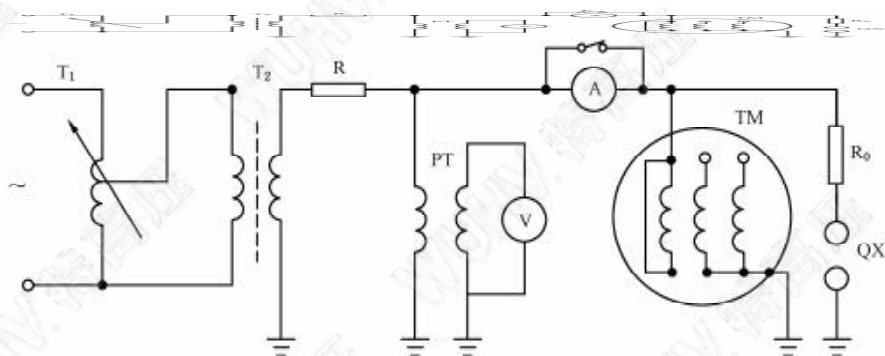
试验电压的数值按 GB/T 755—2019 中 9.2 的规定。

试验应从不超过试验电压全值的一半开始,然后均匀地或以每步不超过全值 5% 逐步增至全值,电压从半值增至全值的时间应不少于 10 s。全值试验电压值应符合 GB/T 755—2019 中表 17 中的规定,并维持 1 min。在试验过程中应无故障发生。

当对批量生产的 200 kW(或 kVA)及以下,额定电压 $U_N \leq 1$ kV 的电机进行常规试验时,1 min 试验可用 1 s 的试验代替,但试验电压值应为 GB/T 755—2019 中表 17 规定值的 120%。

6.13.3 工频耐电压试验方法

试验接线原理图见图 6(转子耐电压试验接线参见此图),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 倍~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。



标引序号说明:

T_1 —— 调压变压器;

T_2 —— 高压试验装置;

PT —— 电压互感器;

R —— 限流保护电阻,其值一般为 $0.2 \Omega/V \sim 1 \Omega/V$;

R_0 —— 球隙保护电阻(低压电机不接),其值一般为 $1 \Omega/V$;

QX —— 过电压保护球隙(低压电机不接);

V —— 电压表;

A —— 电流表;

TM —— 被试电机。

图 6 工频耐压试验原理图

6.14 电枢绕组绝缘直流泄漏电流试验及直流耐压试验

6.14.1 一般要求

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

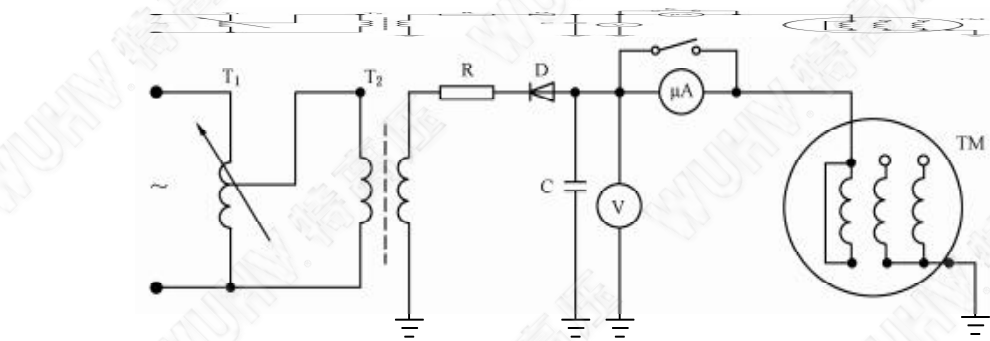
一个支路进行试验前,其他两相绕组或其他支路均应接地,如果三相绕组的中性点连在一起不易分开时,则允许三相绕组一起试验。试验时应记录电枢绕组温度,环境温度和湿度。

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。

6.14.2 试验方法

6.14.2.1 空冷或氢冷电枢绕组

试验接线如图 7 所示。



标引序号说明:

- T₁ —— 调压器;
- T₂ —— 高压试验装置;
- R —— 限流保护电阻,其值为 0.1 Ω/V ~ 1 Ω/V;
- D —— 高压整流硅堆;
- V —— 高电压测量装置;
- μA —— 微安表;
- K —— 闸刀开关;
- TM —— 被试电机;
- C —— 高压滤波电容。

图 7 空冷或氢冷电枢绕组直流耐压试验原理图

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 0.5 U_N、1.0 U_N、1.5 U_N……至规定值。每升到一个阶段停留 1 min,并记录每阶段电压开始和 1 min 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。

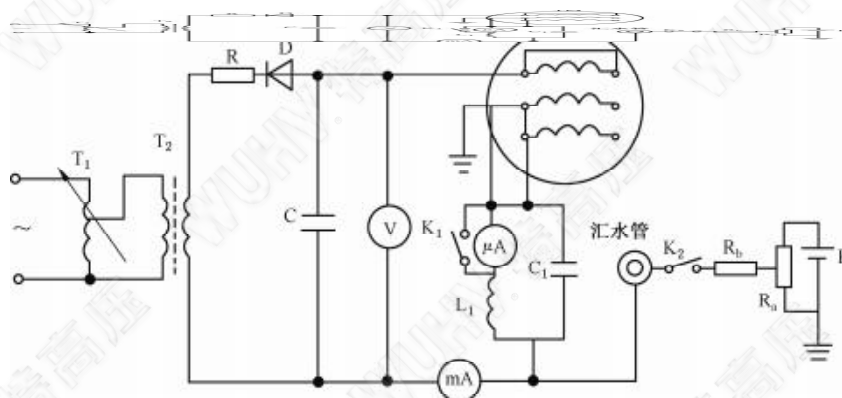
6.14.2.2 水内冷电枢绕组

试验接线如图 8 所示。高压滤波电容器 C(F)的选择,应使时间常数满足公式(16)所述条件:

$$T \approx CR_y \geq 0.3 \text{ s} \dots\dots\dots (16)$$

式中:

R_y——被试绕组与汇水管间的绝缘电阻,单位为欧姆(Ω)。



标引序号说明：

- T₁ —— 调压变压器；
- T₂ —— 高压试验装置；
- R —— 限流保护电阻，其值为 0.1 Ω/V~1 Ω/V；
- D —— 高压整流硅堆；
- μA —— 微安表；
- K —— 闸刀开关；
- TM —— 被试电机；
- C —— 高压滤波电容器；
- V —— 高电压测量装置；
- C₁ —— 低压滤波电容器；
- L₁ —— 电感扼流圈；
- E —— 1.5 V 电池；
- R_b —— 100 kΩ 炭膜电阻；
- R_a —— 500 kΩ 电位器；
- mA —— 监视用毫安表。

图 8 水内冷电枢绕组直流耐压试验

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同 6.13.1。实际直流泄漏电流 $I(\mu\text{A})$ 按公式(17)计算：

$$I = I_1 \times \left(1 + \frac{R_1}{R_2}\right) - I_0 \quad \dots\dots\dots (17)$$

式中：

- I_1 —— 微安表读数，单位为微安(μA)；
- R_1 —— 扼流线圈电阻和微安表内阻串联电阻值，单位为欧姆(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，单位为欧姆(Ω)；
- I_0 —— 试验设备空试直流泄漏电流，单位为微安(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。

6.15 总谐波畸变量(THD)的测定

交流电机应进行型式试验以确定 THD 符合 GB/T 755—2019 的 9.11.2 的要求。

电机在空载发电机状态下运行，电枢绕组开路，调整转速、电压为额定值后测定。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,注意使波形不失真。

频率测量的范围应包括从额定频率至 100 次谐波在内的所有谐波。

根据试验条件,可选下面任一种方法测定:

- a) 用波形畸变量测量仪连同其专门的线路直接测定;
- b) 测量每一个谐波,然后根据测得的数值用公式(18)进行计算。

$$\text{THD} = \sqrt{\sum_{n=2}^k u_n^2} \dots\dots\dots (18)$$

式中:

- n ——谐波次数;
- u_n ——电机端子处第 n 次谐波的电压幅值与基波电压幅值之比;
- $k=100$ 。

6.16 噪声的测定

噪声的测定按 GB/T 10069.1 规定的方法进行。

7 效率测定

7.1 概述

7.1.1 直接法和间接法确定效率

试验可归纳为下述三类。

- a) 测量单台电机的输入-输出功率。包括测量电机输入的电功率或机械功率和输出的机械功率或电功率。
- b) 对两台完全相同的对拖电机,测量其输入和输出电功率。可不必测量此两台电机输入或输出的机械功率。
- c) 测量特定条件下电机的实际损耗,一般不是指总损耗而是包含了部分损耗分量。

确定电机效率的试验方法是基于若干假设条件的,因此,不宜对不同试验方法得到的效率值进行比较。

7.1.2 不确定度

本文件所述不确定度指确定效率真值的不确定度,反映了试验方法和试验设备的差异。

虽然不确定度值宜用数值来表示,但这个数值需要有足够多的试验来确定其具有代表性和可比较性。

7.1.3 优选方法和客户特定协议试验、现场试验、检查试验的方法

制定确定效率的详细规则是困难的,试验方法的选择基于所需的数据、所要求的精度、相关电机的类型和规格以及现场可用的试验设备(电源、负载或驱动电机)。

本文件将确定效率和各项损耗的试验方法分为优选方法和客户特定协议试验、现场试验、检查试验的方法。

7.1.4 确定大电机各项损耗的专用试验方法

当电机负载或者尺寸超过 7.1.3 所述的试验能力时,可使用以下试验方法进行试验,这些方法适用于满载试验无法实施的时候,其测试结果具有较高的不确定度。

注:当大型电机采用其他方法试验时导致设备成本不经济,可采用以下方法进行试验:

——校准电机法;

- 自减速法；
- 量热法。

7.2 优选试验方法

7.2.1 概述

本文件规定了三种不同的在适用范围内为低不确定度的优选试验方法,见表 3 和表 4,根据被试电机的机座号和定额来选用特定试验方法。

方法 2-1-2A:用测功机直接测量输入功率和测量输出功率,适用于机座号 180 mm 及以下所有电机和任意定额的永磁电机。

方法 2-1-2B:带有满负载试验的各分项损耗求和,其中负载杂散损耗采用短路试验来确定。适用于机座号 180 mm 以上额定输出功率 2 MW 及以下的所有电机。

方法 2-1-2C:无满负载试验的各分项损耗求和,其中负载杂散损耗采用短路试验法来确定。适用于额定输出功率为 2 MW 以上的所有电机。

表 3 电励磁同步电机优选试验方法

编号	方法	简述	章条号	适用范围	设备需求
2-1-2A	输入-输出法	测量转矩	7.2.2	电机规格: $H \leq 180$	满负载容量的测功机
2-1-2B	各项损耗求和,额定负载试验和短路试验	由短路试验确定负载杂散损耗 P_{LL}	7.2.3	电机规格: $H > 180$ 且额定输出功率为 2 MW 及以下	满负载机组
2-1-2C	各项损耗求和,无需额定负载试验,短路试验确定负载杂散损耗 P_{LL}	由保梯图、ASA 图、瑞典图确定励磁电流; 由短路试验确定负载杂散损耗 P_{LL}	7.2.4	额定输出功率为 2 MW 以上的电机	—

注: H 指轴中心高(轴中心线至底脚的距离),单位为毫米(mm)。

表 4 永磁同步电机优选试验方法

编号	方法	简述	章条号	适用范围	设备需求
2-1-2A	输入-输出法	测量转矩	7.2.2	所有定额	满负载容量的测功机

7.2.2 方法 2-1-2A 输入-输出法

7.2.2.1 概述

本试验方法测取电机轴端的转矩和转速以确定其机械功率 P_{mech} ,试验中同时测取其定子的电功率 P_{el} 。这一程序也适用于永磁同步电机。

输入输出功率按公式(19)、公式(20)或公式(21)、公式(22)计算(见图 9):

电动机运行时:

$$P_1 = P_{el} \dots\dots\dots (19)$$

$$P_2 = P_{mech} \dots\dots\dots (20)$$

发电机运行时：



图 9 转矩测量试验原理图

应用本方法确定效率的流程图见图 10。

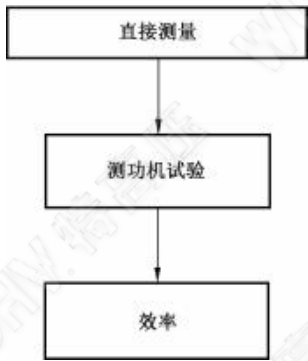


图 10 方法 2-1-1A 确定效率的流程图

7.2.2.2 试验程序

将被试电机与测功机或带有转矩仪的负载机连接在一起，施加需要的负载。
记录： $U, I, P_{\text{el}}, n, T, \theta_c$ 。
需要励磁时，按 5.5.2 继续进行。

7.2.2.3 确定效率

效率按公式(23)计算：

$$\eta = \frac{P_2}{P_1 + P_{1E}} \dots\dots\dots (23)$$

式中：
 P_1 和 P_2 按照 7.2.2.1 确定，其中机械功率 P_{mech} 按公式(24)计算：

$$P_{\text{mech}} = 2\pi \times T \times n \dots\dots\dots (24)$$

式中：
 P_{1E} ——他励励磁功率，单位为瓦特(W)，按 5.5.2 确定。

注：励磁回路损耗不由 P_{1E} 提供，就由轴机械功率提供。

7.2.3 方法 2-1-2B 额定负载试验和短路试验的各项损耗求和

7.2.3.1 概述

本方法是通过各项损耗求和确定电机效率。各分项损耗分别为：铁耗、风摩耗、定子和转子绕组损

耗、励磁回路损耗、负载杂散损耗。
这一程序不适用于永磁同步电机。
应用本方法确定效率的流程图见图 11。



图 11 方法 2-1-2B 确定效率的流程图

7.2.3.2 试验程序

7.2.3.2.1 额定负载热试验

负载试验开始前,在环境温度下测取被试验电机的绕组电阻和温度。

被试电机应供给电源以合适的方式施加额定负载,并运行至热平衡(变化率不大于 1 K/30 min)。

在额定负载试验最后,记录至少 3 组试验结果的平均值:

P_N 、 U_N 、 I_N 、 f 、 θ_c 及 θ_N 。

上述试验过程中:

$R_N = \frac{U_N}{I_N} = R$ ——按 5.4.2 确定的额定负载绕组电阻,单位为欧姆(Ω);

θ_N ——按 5.4.3 确定的额定负载绕组温度,单位为摄氏度($^{\circ}\text{C}$)。

励磁系统的各项值按 5.5.2 确定。

定子绕组损耗

定子绕组损耗按公式(25)计算:

$$P_s = 1.5 \times I^2 \times R_{11} \quad \dots\dots\dots (25)$$

式中:

R_{11} ——按 5.4.2 确定,端电阻平均值,修正到初级基准冷却介质温度 25 $^{\circ}\text{C}$,单位为欧姆(Ω)。

励磁绕组损耗

磁场绕组损耗按公式(26)计算:

$$P_f = I_f \times U_f \quad \dots\dots\dots (26)$$

电刷电损耗

按正极或负极中的每个电刷指定的电压降确定,见 5.5.4。

励磁机损耗

将励磁机与主机分离(如果可能),然后把励磁机连接至:

- a) 转矩测量设备,按输入输出法确定输入机械功率,或
- b) 校准过的驱动电动机,测量电动机输入电功率。

将励磁机(当同步电机经由集电环励磁时)接到合适的阻性负载上。在额定负载时的电压 U_e 和电流 I_e 下无励磁运行励磁机。记录:

——额定负载点的 U_e 、 I_e 、 P_{1E} 、 n 、 T_E ;

—— $T_{E,0}$ (励磁机无励磁时的转矩)。

励磁机损耗按公式(27)计算:

$$P_{Ed} = 2\pi n (T_E - T_{E,0}) + P_{1E} - P_f \quad \dots\dots\dots (27)$$

当励磁机不能与电机分离,励磁损耗应由制造商提供。

总励磁损耗按公式(28)计算:

$$P_e = P_f + P_{Ed} + P_b \quad \dots\dots\dots (28)$$

7.2.3.2.2 空载试验

被试电机可独自作为电动机运行来进行测试,或与驱动电机对接作为发电机运行(轴端驱动功率的转矩按输入输出法测量)

空载试验应在电机额定负载试验后热态下立即进行。

如不具备条件,也可在冷态下开始,但是电机在额定频率和电压(通过调节励磁电流)下空载损耗应稳定,而且作为单台电动机运行时功率因数应为 1(电枢电流最小)。

对有轴带励磁机的同步电机[见 5.5.1a)],该电机宜他励,且励磁机与电源和励磁绕组分离。

当在 30 min 间隔两次连续测量的空载输入功率变化不超过 3%,则认为空载损耗稳定。

试验至少测试 8 个电压点,包括额定电压点:

——在近似均布于 110%至 80%额定电压之间读数至少 4 点;

——在近似均布于 70%至 30%额定电压之间或调到电流不再减小为止(对独自运转的电动机),读数至少 4 点。

试验宜尽快进行,并按电压递减的顺序读取读数。

在每一个电压值记录: U_0 , I_0 , P_0 。

试验开始前或试验结束后应立即测取 R_0 。

中间各试验点的绕组电阻值应按照与电功率 P_0 呈线性关系采用内插法计算确定,起始点为试验前和试验后测得的电阻值。

注 1: R_0 是 $R_{ll,0}$,如果由于电阻值过小而无法进行测量时,允许采用计算值。

与驱动电机对接的电机, P_0 由 T 和 n 确定。

励磁系统的各项值按 5.5.2 确定。

注 2: 对大型同步电机,宜记录其他影响效率的数据,例如:冷却介质温度、氢气的纯度、气压、滑动轴承的油温、轴承油的黏度。

恒定损耗

对每个电压值测试点,按公式(29)确定恒定损耗:

$$P_c = P_0 - P_s \quad \dots\dots\dots (29)$$

式中: P_s 按公式(30)计算:

$$P_s = 1.5 \times I_0^2 \times R_{ll,0} \quad \dots\dots\dots (30)$$

对具有无刷励磁机的电机,应扣除励磁损耗,见公式(31):

$$P_c = P_0 - P_{f,0} - P_s - P_{Ed,0} + P_{1E,0} \quad \dots\dots\dots (31)$$

式中:

$P_{f,0}$ ——空载励磁绕组损耗,单位为瓦特(W);

$P_{Ed,0}$ ——对应于试验点 U_e 和 I_e 的励磁机损耗(如上所述),单位为瓦特(W);

$P_{1E,0}$ ——按 5.5.2 试验时对应于试验点 U_e 和 I_e 的功率,单位为瓦特(W)。

风摩耗

用无明显饱和效应的空载试验点,作恒定损耗(P_c)对电压平方(U_0^2)的关系曲线。延长直线至零电压,零电压处纵轴上的截距即为风摩耗 P_{fw} 。

注 3: 风摩耗可视为与负载无关,每个负载点可使用同一个风摩耗值。

铁耗

对应每个电压点作恒定损耗与电压的关系曲线,恒定损耗值减去风摩耗即为铁耗,见公式(32)。

$$P_{fe} = P_c - P_{fw} \quad \dots\dots\dots (32)$$

7.2.3.2.3 短路试验

被试电机的电枢绕组短路并与驱动电机对接,同时考虑到使用转矩仪或使用测功机测量转矩(见方法 2-1-2A)。电机在额定转速下运行,调节励磁以使电枢绕组短路电流等于额定电流。

对有轴带励磁机的同步电机[见 5.5.1 的 a)],该电机宜他励,且励磁机与电源和励磁绕组分离。

假设负载损耗与负载杂散损耗之和与温度无关,且无需修正到基准温度。假设杂散损耗与定子电流的平方成正比变化。

记录: T , n , I 。

励磁系统的各项值按 5.5.2 确定。

短路试验(轴端不连接电机)

电机在某一固定电压下作为同步电动机运行,该电压最好是大约 1/3 额定电压或能稳定运行的最低电压。调节磁场电流改变电枢电流。应在 125%至 25%额定电流之间大约测取 6 点电枢电流,并应包括 1 到 2 点低电流点。最大的试验电流值应从制造商处获得,传统上设在 125%,但有时定子的冷却不允许在超过 100%额定电流下运行,以免造成损害。试验应从最大电流开始,以保证试验中,定子绕组温度更加均匀。

记录: P_1, I, U 。

励磁系统的各项值按 5.9 确定。

注: 对大型电机,试验电流最大间隔可限制在不超过 60%至 70%额定电枢电流。

负载杂散损耗**连接电机**

额定电流下负载杂散损耗等于轴端连接驱动电机的短路试验时的吸收功率减去风摩耗 P_{fw} ,再减去额定电流下的负载损耗,见公式(33)。

$$P_{LL,N} = 2\pi nT - P_{fw} - P_s \quad \dots\dots\dots (33)$$

对无刷励磁电机,还应减去由驱动电机供给的励磁绕组损耗和励磁机的损耗,见公式(34):

$$P_{LL,N} = 2\pi nT + P_{1E} - P_{fw} - P_s - P_f - P_{Ed} \quad \dots\dots\dots (34)$$

对其他负载点,杂散损耗按公式(35)求取:

$$P_{LL} = P_{LL,N} \times \left(\frac{I}{I_N} \right)^2 \quad \dots\dots\dots (35)$$

不连接电机(过欠励法)

任意电枢电流下的负载杂散损耗为:试验中每一电枢电流的输入功率,减去恒定损耗 P_c 及每一电枢电流下的电枢绕组损耗 P_s 。

7.2.3.3 确定效率

效率按公式(36)计算:

$$\eta = \frac{P_1 + P_{1E} - P_T}{P_1 + P_{1E}} = \frac{P_2}{P_2 + P_T} \quad \dots\dots\dots (36)$$

式中:

P_1 ——输入功率(不包括他励电源提供的励磁功率),单位为瓦特(W);

P_2 ——输出功率,单位为瓦特(W);

P_{1E} ——独立电源提供的励磁功率,单位为瓦特(W)。

注 1: 通常第一个表达式用于电动机,第二个用于发电机。

注 2: 适用时, P_T 包括了电机的励磁功率 P_e (见 5.5.2)。

包括励磁回路损耗在内的总损耗 P_T 按公式(37)计算:

$$P_T = P_c + P_s + P_{LL} + P_e \quad \dots\dots\dots (37)$$

7.2.4 方法 2-1-2C 无满载试验的各项损耗求和

方法 2-1-2C 应适用于额定功率 2 MW 以上的电机。试验程序原则上与 2-1-2B 相似。唯一不同的是不进行额定负载热试验,而是进行由保梯图、ASA 图和瑞典图来确定励磁电流的试验(见 15.26)。

除此以外,效率和损耗的确定程序与方法 2-1-2B 是相同的。

应用本方法确定效率的流程图见图 12。



图 12 方法 2-1-2C 确定效率的流程图

试验前应先测得空载饱和试验,三相稳态短路试验和零功率因数下过励试验的结果,此三项试验分别按 15.26.2、15.26.3、15.26.4 进行。

按 7.2.3 的方法 2-1-2B 的程序确定效率。

此方法不适用于永磁同步电机。

7.3 现场或检查试验方法

7.3.1 概述

表 5 中规定的试验方法可用于任何试验,如,现场试验、客户特定协议试验和检查试验。
此外,表 3 和表 4 的优选方法也可用在其规定的范围以外。

表 5 同步电机其他试验方法

编号	方法	简述	章条号	设备需求
2-1-2D	双电源对拖法	双电源供电,对拖试验	7.3.2	两台完全相同的电机
2-1-2E	单电源对拖法	单电源供电,对拖试验	7.3.3	两台完全相同的电机
2-1-2F	零功率因数试验 由保梯图、ASA 图、瑞典图 确定励磁电流	由保梯图、ASA 图、瑞典图 确定励磁电流	7.3.4	满电压和电流的电源
2-1-2G	进行负载试验的除负载杂 散损耗 P_{LL} 以外损耗求和	不考虑负载杂散损耗 P_{LL}	7.3.5	满负载容量的机组

7.3.2 方法 2-1-2D 双电源对拖法

7.3.2.1 概述

应用本方法确定效率的流程图见图 13。

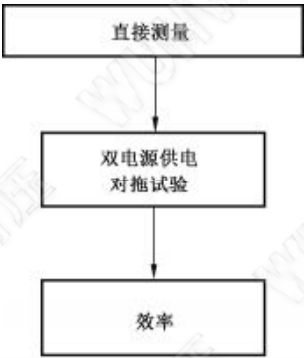


图 13 方法 2-1-2D 确定效率的流程图

此方法不适用于永磁同步电机。

7.3.2.2 试验程序

两台完全相同的电机机械耦合在一起(见图 14)。试验用可调电源进行,但是同一台电机的测量仪器和仪用互感器的接线保持不变。

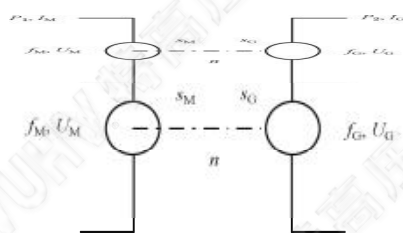


图 14 双电源对拖试验原理图

两台电机的电压和电流应相同,且一台电机(电动机按照电动机定额,发电机按照发电机定额)应达到额定功率因数。可通过一套同步一直流机组将发电机的输出能量回馈到电网来实现。

注:两台电机吸收的损耗将导致其中一台电机的功率因数和励磁电流偏离额定值。

调换电动机和发电机的接线并重复本试验。

对每一次试验,记录: $U, I, f, P_1, P_2, \cos\phi_M, \cos\phi_G, \theta_c$ 。

励磁系统的各项值按 5.5.2 确定。

7.3.2.3 确定效率

两台完全相同的电机基本上在同样的额定状态下运行,效率按总损耗之半及电动机和发电机的平均输入功率计算,见公式(38):

$$\eta = 1 - \frac{P_T}{\frac{P_1 + P_2}{2} + P_{1E}} \quad \dots\dots\dots (38)$$

式中 P_T 和 P_{1E} 按公式(39)计算:

$$P_T = \frac{1}{2}(P_1 - P_2) + P_{1E}; P_{1E} = \frac{1}{2}(P_{1E,M} + P_{1E,G}) \quad \dots\dots\dots (39)$$

式中:

$P_{1E,M}, P_{1E,G}$ ——按 5.5.2 确定,单位为瓦特(W)。

7.3.3 方法 2-1-2E 单电源对拖法

7.3.3.1 概述

应用本方法确定效率的流程图见图 15。

本方法不适用于永磁同步电机。

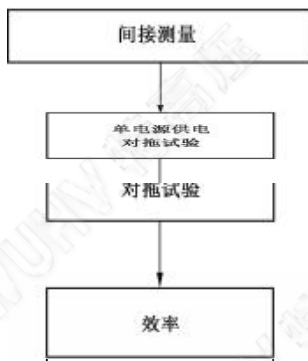


图 15 方法 2-1-2E 确定效率的流程图

7.3.3.2 试验程序

机械连接两台完全相同的电机,电气连接在同一电源上,以额定转速和额定电压,一台作为电动机运行,另一台作为发电机运行。

注:或者,损耗由一台校准过的驱动电机来提供。

二者转子间有一个角位移,以使其中一台电机能在所要求效率的负载条件下运行,另一台电机定子电流为同一绝对值条件下运行(见图 16)。

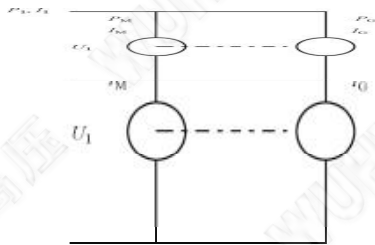


图 16 同步电机单电源对拖试验原理图

在所要求的负载条件下,此时以电角度 α 表示的角位移大约是内部电角度的二倍。通常,在给定电压下,循环功率取决于电角度 α 和电动机及发电机的励磁电流。通过精确调节另一台电机的励磁电流(可偏离额定值)将电机的电流和功率因数调节至额定值。

对每次试验,记录:

——工频电源的 U_1, I_1, P_1 ;

——电动机的 I_M, P_M ;

——发电机的 I_G, P_G 。

励磁系统的各项值按 5.5.2 确定。

7.3.3.3 确定效率

两台完全相同的电机基本上在同样的额定状态下运行,则认为每台电机各占总损耗的一半。

效率按公式(40)计算:

$$\eta = 1 - \frac{P_T}{P_M + P_{1E}} \quad \dots\dots\dots (40)$$

式中:

P_M ——以电动机方式运行的电机端吸收的功率(励磁功率除外),单位为瓦特(W);

P_T ——总损耗,规定为所吸收的总功率的一半,见公式(41),单位为瓦特(W);

P_{1E} ——由他励电源供电的励磁功率,见公式(42),单位为瓦特(W)。

$$P_T = \frac{1}{2} P_1 + P_{1E} \quad \dots\dots\dots (41)$$

$$P_{1E} = \frac{1}{2} (P_{1E,M} + P_{1E,G}) \quad \dots\dots\dots (42)$$

7.3.4 方法 2-1-2F 零功率因数试验,励磁电流由保梯图、ASA 图或瑞典图确定

7.3.4.1 概述

应用本方法确定效率的流程图见图 17。

本方法不适用于永磁同步电机。



图 17 方法 2-1-2F 确定效率的流程图

7.3.4.2 试验程序

7.3.4.2.1 一般要求

试验前应先测得空载饱和试验,三相稳态短路试验和零功率因数下过励试验的结果,此三项试验分别按 15.26.2、15.26.3、15.26.4 进行。

应按 7.2.3.2.2 对空载试验结果进行估算。

7.3.4.2.2 零功率因数试验

电机在额定转速和过励状态下独自作电动机运行。调节电源电压,以达到期望负载下的电动势 E 和电枢电流 I (接近零功率因数)。

注 1: E 是端电压和保梯(Potier)电抗压降的矢量和,按 15.26.2 求取。

试验宜在额定电流下运行至热稳定,不应进行绕组温度修正。

对以上试验,电源电压应可调,以使本试验中的铁耗值与在额定电压、额定功率因数负载时铁耗值相同。如果电源电压不可调但等于额定电压,这可能给出一个与满负载时明显不同的铁耗。原则上,宜输出无功功率(即电机过励),但当由于受励磁电压的限制而不可能实现时,只要能稳定运行,试验也可在吸收无功功率(即电机欠励)并尽量稳定运行情况下进行。

期望负载下的励磁绕组损耗可通过 15.26.2(保梯图)或 15.26.3(ASA 图),或 15.26.4(瑞典图)所估算的励磁电流来获得。

注 2: 此方法的准确度取决于低功率因数功率表和仪用互感器的准确度。

在零功率因数试验时记录:

$U, f, I, P_{1, \text{zpf}}$;

励磁系统的各项值按 5.5.2 确定。

θ_c 和 θ_w 。

7.3.4.3 确定效率

7.3.4.3.1 概述

对每个测试负载点,由测得的数据按公式(43)确定效率:

$$\eta = 1 - \frac{P_T}{P_1 + P_{1E}} \quad \dots\dots\dots (43)$$

式中:

$P_1 = \sqrt{3} \times U \times I \cos \varphi_N$ ——额定运行时电枢绕组端吸收的功率,单位为瓦特(W);

P_T ——总损耗,包括励磁损耗,单位为瓦特(W);

P_{1E} ——由他励电源供电的励磁功率,单位为瓦特(W)。

7.3.4.3.2 励磁损耗

励磁绕组损耗

励磁绕组损耗按公式(44)计算:

$$P_f = I_e \times U_e = I_e^2 \times R_e \quad \dots\dots\dots (44)$$

对励磁绕组电阻按公式(45)进行温度修正:

$$R_e = R_{e,0} \times \frac{235 + \theta_c}{235 + \theta_e}; \theta_e = 25 + (\theta_w - \theta_c) \left(\frac{I_e}{I_{e, \text{zpf}}} \right)^2 \quad \dots\dots\dots (45)$$

式中:

I_e ——按 15.26 确定的励磁绕组电流,单位为安培(A);

R_e ——各负载点温度修正后的励磁绕组电阻,单位为欧姆(Ω);

$R_{e,0}$ ——温度为 θ_0 时的冷态励磁绕组电阻,单位为欧姆(Ω);

$I_{e, \text{zpf}}$ ——由零功率因数试验求得的励磁绕组电流,单位为安培(A);

θ_w ——零功率因数试验时的励磁绕组温度,单位为摄氏度($^{\circ}\text{C}$);

θ_c ——零功率因数试验时的基准冷态介质温度,单位为摄氏度($^{\circ}\text{C}$);

θ_e ——修正到 I_e 的励磁绕组温度,单位为摄氏度($^{\circ}\text{C}$);

电刷电损耗

按正极或负极中的每个电刷指定的电压降确定,见 5.5.4。

励磁机损耗

将励磁机与主机分离(如果可能),然后把励磁机连接至:

- 转矩测量设备,按输入输出法确定输入机械功率,或
- 校准过的驱动电动机,测量电动机输入电功率。

将励磁机(当同步电机经由集电环励磁时)接到合适的阻性负载上。在额定负载时的电压 U_e 和电流 I_e 下无励磁运行励磁机。记录:

——额定负载点的 U_e, I_e, P_{1E}, n, T_E ;

—— $T_{E,0}$ (励磁机无励磁时的转矩)。

励磁机损耗按公式(46)计算:

$$P_{Ed} = 2\pi n (T_E - T_{E,0}) + P_{1E} - P_f \quad \dots\dots\dots (46)$$

当励磁机不能与电机分离,励磁损耗应由制造商提供。

总励磁损耗按公式(47)计算:

$$P_e = P_f + P_{Ed} + P_b \quad \dots\dots\dots (47)$$

7.3.4.3.3 总损耗

对励磁机类型为 c) 和 d) (见 5.5.1) 的电机, 总损耗按公式(48)计算:

$$P_T = P_{1,zpf} + \Delta P_{fe} + P_e \quad \dots\dots\dots (48)$$

式中:

$P_{1,zpf}$ ——零功率因数试验吸收的功率, 单位为瓦特(W);

ΔP_{fe} ——由铁耗与电压曲线确定(见 7.2.3.2.2), 此值为电压等于所需负载下感应电势时的铁耗与零功率因数试验的感应电势下的铁耗差值, 单位为瓦特(W);

P_e ——按上文所述确定, 单位为瓦特(W)。

对励磁机类型 a) 和 b) (见 5.5.1) 的电机, 总损耗按公式(49)计算。

上文所规定的对应于所需负载下的励磁绕组电流的 P_e 、 P_{ed} 和 P_{1E} , 按 15.26 的规定确定, 见公式(50)。

$$P_T = P_{1,zpf} + P_{1E,zpf} + \Delta P_{te} + P_e \quad \dots\dots\dots (49)$$

$$P_e = P_f + P_{Ed} - P_{f,zpf} - P_{Ed,zpf} \quad \dots\dots\dots (50)$$

式中:

$P_{1,zpf}$, $P_{f,zpf}$ 和 $P_{1E,zpf}$ ——零功率因数试验测得的数据, 单位为瓦特(W);

P_f ——按他励励磁电机来确定, 单位为瓦特(W);

P_{ed} , $P_{Ed,zpf}$ ——由上述试验中测得的 I_e 、 R_e 和 $I_{e,zpf}$ 、 $R_{e,zpf}$ 确定, 单位为瓦特(W);

ΔP_{fe} ——由铁耗与电压曲线确定(见 7.2.3.2.2), 此值为电压等于所需负载下感应电势时的铁耗与零功率因数试验的感应电势下的铁耗差值, 单位为瓦特(W)。

注: 上述表达式适用于电动机运行方式。

7.3.5 方法 2-1-2G 进行负载试验的除负载杂散损耗以外的损耗求和

试验程序原则上与 2-1-2B 相似。唯一不同的是本方法不考虑负载杂散损耗, 即无需进行短路试验。本试验的结果准确度明显比较低。

除此以外, 效率和损耗的确定程序与方法 2-1-2B 是相同的。

应用本方法确定效率的流程图见图 18。

试验程序按 7.2.3 确定效率, 无需考虑负载杂散损耗。

本方法不适用于永磁同步电机。

7.4 确定大电机各项损耗的专用试验方法

确定大电机各项损耗的专用试验方法包括校准电机法、自减速法和量热法, 按 GB/T 34861 规定的方法进行。



图 18 方法 2-1-2G 确定效率的流程图

8 热试验

8.1 概述

8.1.1 基准冷却介质

GB/T 755—2019 的表 5 中对指定的电机冷却方法规定了基准冷却介质。如应用了第三种冷却介质,应测量高于该表中规定的初级或次级冷却介质的温度以确定温升。

8.1.2 热试验条件

8.1.2.1 电源

交流电动机进行热试验期间,电源的 HVF 值应不大于 0.015,电压系统的负序分量应小于正序分量的 0.5%,零序分量的影响应予以排除。

根据协议,可用测量电流系统的负序分量来取代测量电压系统的负序分量。电流系统的负序分量应不超过正序分量的 2.5%。

8.1.2.2 试验前电机的温度

如用电阻法确定绕组温度,初始绕组温度与冷却介质的温度差应不大于 2 K。

按短时定额(S2 工作制)试验的电机,在热试验开始时的温度与冷却介质温度差应在 5 K 以内。

8.1.2.3 冷却介质温度

电机可在任一合适的冷却介质温度下试验,见 GB/T 755—2019 的表 12(间接冷却绕组)或表 15(直接冷却绕组)。

8.1.3 温度测量方法

8.1.3.1 概述

测量绕组和其他部分温度的公认方法有三种:

- 电阻法;
- 埋置检温计(ETD)法;
- 温度计法。

不同的方法不应作为相互校核之用。

间接测量法见 GB/T 21211。

8.1.3.2 电阻法

根据绕组电阻的增加而确定绕组的温度。

8.1.3.3 埋置检温计(ETD)法

用埋入电机内部的检温计(如电阻检温计、热电偶或半导体负温度系数检温计)来测量温度。检温计在电机制造过程中埋置于电机制成后触及不到的部位。

8.1.3.4 温度计法

用温度计贴附于成品电机可触及的表面上来测量温度。术语“温度计”不但包括膨胀式温度计,也包括非埋置式热电偶和电阻式温度计。当膨胀式温度计用于测量的强交变或移动磁场的部位的温度时,应采用酒精温度计而不采用水银温度计。

8.1.4 电机某一部分的温升

电机某一部分的温升 $\Delta\theta$ 就是用 8.1.3 中规定的适当方法测得的该部分温度与用 8.2 中规定的方法测得的冷却介质温度之差。

8.2 试验期间冷却介质温度的测定

8.2.1 一般要求

应采用在试验过程中最后四分之一时间内,按相等时间间隔测得的几个温度计读数的平均值作为试验中冷却介质温度。为避免由于大型电机的温度不能迅速地随冷却介质温度相应变化产生时滞而引起的误差,应采取一切适当的措施以减少冷却介质温度的变化。

8.2.2 无冷却器的封闭式电机(用环境空气或气体冷却)

环境空气或气体的温度应采用几个温度计来测量,温度计应置于电机周围不同的地点,高度为电机的二分之一,距离电机 1 m~2 m 处,并应防止热辐射和气流的影响。

8.2.3 开启式电机和用远处的空气或气体通过风道冷却的电机或有独立冷却器的电机

初级冷却介质的温度应在电机的入口处测量。

8.2.4 带有外装式或内装式冷却器的封闭式电机

初级冷却介质的温度应在电机的入口处测量,次级冷却介质的温度应在冷却器的入口处测量。

8.3 试验期间电机各部分温度的测定

8.3.1 绕组温度的测定

8.3.1.1 概述

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,冷热态电阻应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,此法也适用于 GB/T 755—2019 中 8.6.1a)、b)、c) 中规定的场合。

8.3.1.2 电阻法

8.3.1.2.1 测量方法

应采用下述任一种方法测量:

- 使用合适量程的仪表,在试验开始和结束时直接测量;
- 用直流电流/电压测量,对直流绕组:使用合适量程的仪表,测量通过绕组的电流和绕组两端电压;
- 用直流电流/电压测量,对交流绕组:在断能状态下将直流电流引入绕组;
- 在不中断交流负载电流的情况下,在负载电流上叠加一微弱直流测量电流。

8.3.1.2.2 计算

温升 $\Delta\theta = (\theta_2 - \theta_a)$ 可按公式(51)求得:

$$\frac{\theta_2 + k}{\theta_1 + k} = \frac{R_2}{R_1} \dots\dots\dots (51)$$

式中:

- θ_1 ——测量绕组(冷态)初始电阻时的温度,单位为摄氏度(°C);
- θ_2 ——热试验结束时绕组的温度,单位为摄氏度(°C);
- θ_a ——热试验结束时冷却介质温度,单位为摄氏度(°C);

R_1 ——温度为 θ_1 (冷态) 时的绕组电阻, 单位为欧姆(Ω);

R_2 ——热试验结束时的绕组电阻, 单位为欧姆(Ω);

k ——导体材料在 $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时电阻温度系数的倒数:

- 铜: $k=235$;
- 铝: $k=225$, 除非另有规定。

为使用方便, $\Delta\theta=(\theta_2-\theta_a)$ 还可用公式(52)求取:

$$\Delta\theta=\theta_2-\theta_a=\frac{R_2-R_1}{R_1}\times(k+\theta_1)+\theta_1-\theta_a \quad \cdots\cdots\cdots(52)$$

8.3.1.2.3 停机时间的修正

8.3.1.2.3.1 概述

用直接测量电阻的方法来测量热试验结束时的温度需要快速停机, 并需有仔细的操作程序及足够的人员。

8.3.1.2.3.2 短促停机时间

如在表 6 规定的时间间隔内测得电阻初始读数, 则该读数作为温度测量的数据。

表 6 时间间隔

额定输出(P_N)/kW 或 kV·A	切断电源后的时间间隔/s
$P_N \leq 50$	30
$50 < P_N \leq 200$	90
$200 < P_N \leq 5\,000$	120
$P_N > 5\,000$	按协议

8.3.1.2.3.3 外推停机时间

如在表 6 规定时间范围内不能读出电阻的最初读数, 应尽快在表 6 规定时间间隔的 2 倍时间内读出读数, 以后约每隔 1 min 读取另外的电阻读数, 直到这些读数已从最大值明显地下降为止。应把这些读数作为时间的函数绘制成曲线, 并将曲线外推到表 6 中与电机额定输出对应的时间间隔。宜采用半对数坐标, 温度绘制在对数坐标尺上。此时所得的温度值应作为停机后的温度。如在停机后测得的连续数据显示出温度在升高, 则应取其最高值。

当电阻读数读取时间超过表 6 规定时间的 2 倍时, 则修正方法只能按协议规定。

8.3.1.2.4 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 30s, 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 点~5 点, 作电枢绕组电阻与时间的关系曲线。

8.3.1.3 埋置检温计(ETD)法

检温计应适当分布于电机绕组之中, 其数量应不少于 6 个。

在符合安全的条件下,宜尽量把检温计安置在可能是最热点的各个位置上,并采取有效措施防止与初级冷却介质接触。

埋置检温计诸元件的最高读数应作为确定绕组温度的依据。

埋置检温计元件及接头可能会失效,并会得出不正确的读数。因此,一旦某个或几个读数有误,宜通过调查证实,宜予删除。

8.3.1.4 温度计法

所做的各种努力都是为了从安全的角度考虑,应将温度计置于温度最有可能是最高的点或一些点上(如紧挨铁心的绕组端部),安置方式应有效地保护以防止温度计与初级冷却介质接触,而与电机绕组有很好的热接触。

任一温度计的最高读数即为绕组温度。

8.3.2 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。

8.3.3 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。

8.3.4 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。

8.3.5 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,取测得的最高值作为其温度。

8.3.6 轴承和密封瓦温度的测量

采用温度计或埋置检温计测定,测定方法按 GB/T 755—2019 中 8.9 的规定。

8.4 热试验持续时间

8.4.1 连续工作制定额

试验应持续进行至热稳定。

8.4.2 短时工作制定额

试验应按定额中规定的时间。

8.4.3 周期工作制定额

通常采用制造商规定的等效负载定额(按 GB/T 755—2019 中 5.2.6 的规定)进行试验,直至达到热稳定。如协议按实际工作制试验,则应按规定的负载周期连续运行,直至达到实际上相同的温度循环。判断的准则是将二个相继工作周期的相应点联成直线,其梯度应小于 $1\text{ K}/0.5\text{ h}$ 。如有必要,应在一段时间内以适当的时间间隔进行测量。

8.4.4 非周期工作制定额和离散恒定负载定额

采用制造商规定的等效负载定额(按 GB/T 755—2019 中 5.2.6 的规定)进行试验,直至达到热稳定。

8.4.5 S9 工作制电机等效热时间常数的确定

处于正常运行的通风条件下电机等效热时间常数可近似地确定该电机的发热过程,此常数可按 8.3.1.2.3 所作的冷却曲线求得。时间常数值等于在冷却曲线上从电机断电瞬间到满载温升下降一半时所需时间的 1.44(即 $1/\ln 2$) 倍。

8.5 热试验方法

8.5.1 概述

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。

8.5.2 直接负载法

8.5.2.1 试验时被试电机应根据其用途保持在额定工作方式下运行,在试验过程中冷却介质温度应符合 GB/T 755—2019 中 6.3、6.4、6.5 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,应每 15 min 或 30 min 记录一次。电机运行至热稳定状态,按 8.3.1 确定电机在额定负载下的温度。

当热试验时的电流与额定值相差在 $\pm 5\%$ 以内时,电机绕组温升 $\Delta\theta_N$ 可按公式(53)修正:

$$\Delta\theta_N = \Delta\theta \left(\frac{I_N}{I} \right)^2 \quad \dots\dots\dots (53)$$

式中:

I_N ——额定电流,单位为安培(A);

I ——热试验过程中最后 1 h 内几个相等时间间隔的电流读数的平均值,单位为安培(A);

$\Delta\theta$ ——对应于试验电流 I 时的绕组温升,单位为开尔文(K)。

8.5.2.2 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 个~4 个不同负载下进行热试验,功率因数应接近额定值。

当进行每一负载热试验时,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。

8.5.3 低功率因数负载法

8.5.3.1 一般要求

因设备条件限制无法采用直接负载法进行热试验时,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。

8.5.3.2 做两次空载热试验

被试电机进行以下两次空载热试验:

- 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公式(54)、公式(55)计算：

电枢绕组：

$$\Delta\theta_{aN} = \Delta\theta_a + (\Delta\theta_{a2} - \Delta\theta_{a1}) \quad \dots\dots\dots (54)$$

定子铁心：

$$\Delta\theta_{FeN} = \Delta\theta_{Fe} + (\Delta\theta_{Fe2} - \Delta\theta_{Fe1}) \quad \dots\dots\dots (55)$$

8.5.3.3 经验公式

电枢绕组温升按公式(56)计算：

$$\Delta\theta_{aN} = \Delta\theta_a \left(1 + \frac{\Delta P_{Fe}}{K_a P_{cua}} \right) \quad \dots\dots\dots (56)$$

式中：

$\Delta\theta_a$ ——低功率因数负载热试验时电枢绕组温升，单位为开尔文(K)；

$\Delta\theta_{Fe}$ ——额定电压时的铁耗 P_{Fe} 与低功率因数负载热试验电压所对应的铁耗 P'_{Fe} 之差，单位为瓦特(W)；

P_{cua} ——低功率因数负载热试验时电枢绕组中的 $I^2 R$ 损耗，单位为瓦特(W)；

K_a ——系数，小型电机取 6，中型电机取 3。

定子铁心温升按公式(57)计算：

$$\Delta\theta_{FeN} = \Delta\theta_{Fe} \left(1 + \frac{\Delta P_{Fe}}{P_{cua} + P'_{Fe}} \right) \quad \dots\dots\dots (57)$$

式中：

$\Delta\theta_{Fe}$ ——低功率因数负载热试验时定子铁心温升，单位为开尔文(K)。

8.5.4 空载短路法

8.5.4.1 四次热试验

被试电机作发电机运行并进行以下四次热试验：

- 电机空转，不加励磁，测得温升为 $\Delta\theta_0$ ；
- 电机空载，电枢电压等于 105% 额定值，测得温升为 $\Delta\theta_{U1}$ ；
- 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 $\Delta\theta_{U2}$ ；
- 电机三相对称短路，电枢电流等于额定值，测得温升为 $\Delta\theta_K$ 。

8.5.4.2 确定额定工作方式的电枢绕组温升

额定工作方式的电枢绕组温升按公式(58)或公式(59)确定：

汽轮发电机：

$$\Delta\theta_{aN} = \Delta\theta_K \left(1 + \frac{40 - \theta_c + \Delta\theta_{U1} - \Delta\theta_0}{k + \theta_c + \Delta\theta_K} \right) + \Delta\theta_{U1} - \Delta\theta_0 \quad \dots\dots\dots (58)$$

其他电机：

$$\Delta\theta_{aN} = \Delta\theta_K \left(1 + \frac{\Delta\theta_{U1} - \Delta\theta_0}{k + \theta_c + \Delta\theta_K} \right) + \Delta\theta_{U1} - \Delta\theta_0 \quad \dots\dots\dots (59)$$

式中：

θ_c ——三相对称短路热试验时冷却介质的温度，单位为摄氏度(℃)；

k ——见公式(51)。

8.5.4.3 确定额定工作方式下定子铁心温升

额定工作方式下定子铁心温升按公式(60)确定：

$$\Delta\theta_{\text{FeN}} = \Delta\theta_{\text{k}} + \Delta\theta_{\text{U1}} - \Delta\theta_0 \quad \dots\dots\dots (60)$$

8.5.4.4 确定额定工作方式下励磁绕组温升

额定工作方式下励磁绕组温升按图 19 所示作图方法求得。

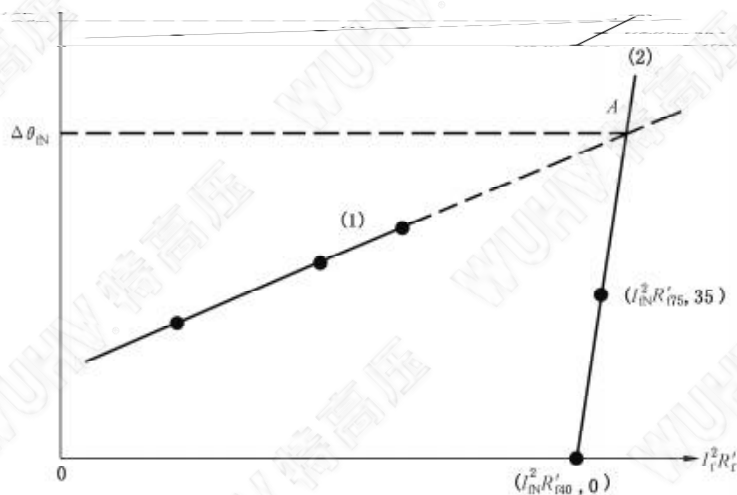


图 19 作图法求取励磁绕组温升

a) 汽轮发电机

先按 $\Delta\theta'_f = \Delta\theta_f + \Delta\theta$ ($\Delta\theta$ 应符合附录 A) 将 8.5.4.1 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) 三项热试验中测得的励磁绕组热态直流电阻 R_f 按公式(61)换算到冷却介质温度为 40℃ 时的电阻值。

$$R'_f = \frac{k + 40 + \Delta\theta'_f}{k + \theta_c + \Delta\theta'_f} \cdot R_f \quad \dots\dots\dots (61)$$

式中：

θ_c ——热试验时冷却介质的温度, 单位为摄氏度(℃)。

计算 $I^2 R'_f$ 值并作 $\Delta\theta'_f = f(I^2 R'_f)$ 的关系曲线如图 19 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 $I^2_N R'_{f40}$ 和 $I^2_N R'_{f75}$ 值, 并在图 19 上通过 $(I^2_N R'_{f40}, 0)$ 与 $(I^2_N R'_{f75}, 35)$ 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 19 直线(2)是通过 $(I^2_N R_{f\theta_c}, 0)$ 与 $(I^2_N R_{f75}, 75 - \theta_c)$ 两点作出的。 θ_c 为 8.5.4.1 中的 b)、c)、d) 三次热试验时冷却介质温度(℃)的平均值。

8.5.4.5 空载低转速法

这是励磁绕组热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热试验, 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 20, 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 8.5.4.4 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按公式(62)或公式(63)确定:

a) 汽轮发电机

$$\Delta\theta_{fN} = \Delta\theta_f \left(\frac{I_{fN}}{I_f} \right)^2 \left[1 + \frac{\Delta\theta_f \left(\frac{I_{fN}}{I_f} \right)^2 - \Delta\theta_f}{k + 40 + \Delta\theta_f - \Delta\theta_f \left(\frac{I_{fN}}{I_f} \right)^2} \right] \dots\dots\dots (62)$$

b) 其他电机

$$\Delta\theta_{fN} = \Delta\theta_f \left(\frac{I_{fN}}{I_f} \right)^2 \left[1 + \frac{\Delta\theta_f \left(\frac{I_{fN}}{I_f} \right)^2 - \Delta\theta_f}{k + \theta_c + \Delta\theta_f - \Delta\theta_f \left(\frac{I_{fN}}{I_f} \right)^2} \right] \dots\dots\dots (63)$$

式中:

θ_c ——为三次试验时冷却介质温度的平均值,单位为摄氏度(°C)。

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。励磁电流的选择宜尽可能大些,但应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,因此在试验中应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 $5^\circ\text{C} \sim 10^\circ\text{C}$,结构件的温度控制在不超过 150°C ,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。

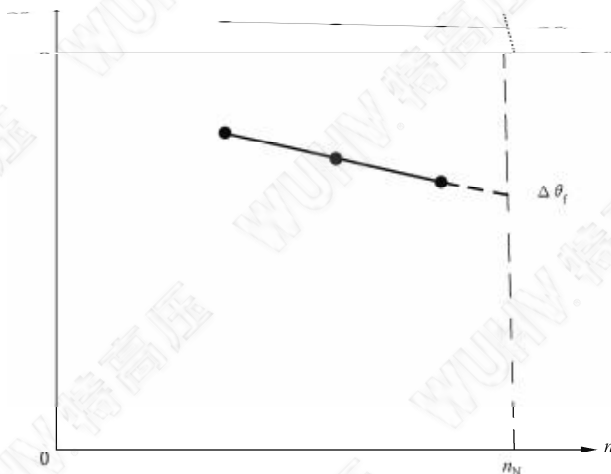


图 20 低转速法求取励磁绕组温升

9 自励恒压时电压调整性能测定

9.1 稳态电压调整率的测定

9.1.1 检查电压整定范围

9.1.1.1 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。

9.1.1.2 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。

9.1.2 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公式(64)或公式(65)计算,具体选用由该类型电机标准规定。

$$\delta_{\text{stu}} = \frac{U_t - U_N}{U_N} \times 100\% \quad \dots\dots\dots (64)$$

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),单位为伏特(V);

U_N ——额定电压,单位为伏特(V)。

$$\delta_{\text{stu}} = \pm \frac{U_{\text{stmax}} - U_{\text{stmin}}}{2U_N} \times 100\% \quad \dots\dots\dots (65)$$

式中:

U_{stmax} 、 U_{stmin} ——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,单位为伏特(V)。

9.1.3 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。

9.2 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。

9.3 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。

10 转矩和转动惯量的测定

10.1 堵转电流和堵转转矩测定

10.1.1 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,试验应从速进行。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 点~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。

10.1.2 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 21 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。

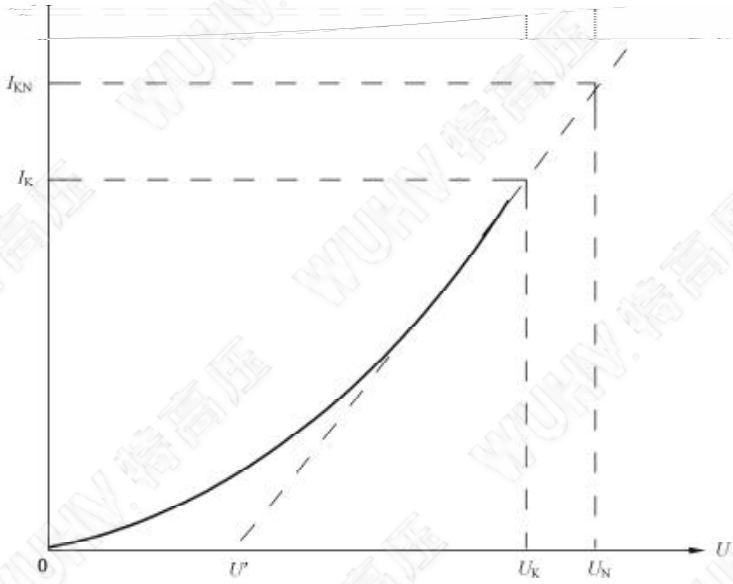


图 21 堵转特性曲线

被试电机的堵转电流 I_{KN} 按公式(66)确定:

$$I_{KN} = \frac{U_N - U'}{U_K - U'} \cdot I_K \dots\dots\dots (66)$$

式中:

U_K ——最高试验电压值,单位为伏特(V);

I_K ——对应 U_K 的电流,单位为安培(A)。

被试电机的堵转转矩 T_{KN} (N·m),按公式(67)确定:

$$T_{KN} = \left(\frac{U_N - U'}{U_K - U'} \right)^2 T_K \quad \dots\dots\dots (67)$$

式中:

T_K ——最高试验电压时测得的转矩,单位为牛顿米(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,先按公式(68)计算转子堵住时输入转子的电磁功率 P_M (W):

$$P_M = P_{in} - P_{Fe} - 3I_K^2 R_{a1} \quad \dots\dots\dots (68)$$

式中:

P_{in} ——最高试验电压时的输入功率,单位为瓦特(W);

P_{Fe} ——对应于最高试验电压时的铁耗,单位为瓦特(W),见 7.2.3.2.2;

I_K ——最高试验电压时的三相电流平均值,单位为安培(A);

R_{a1} ——紧接试验后测得的电枢绕组任意相的直流电阻,单位为欧姆(Ω)。

根据 P_M 按公式(69)确定堵转转矩 T_K (N·m):

$$T_K = 9.55 \cdot \frac{P_M}{n_N} \quad \dots\dots\dots (69)$$

式中:

P_M ——输入转子的电磁功率,单位为瓦特(W);

n_N ——被试电机的额定转速,单位为转每分(r/min)。

用标么值表示时如公式(70):

$$t_K = \frac{P_M}{P_N} \quad \dots\dots\dots (70)$$

如果图 21 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 22 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} 。

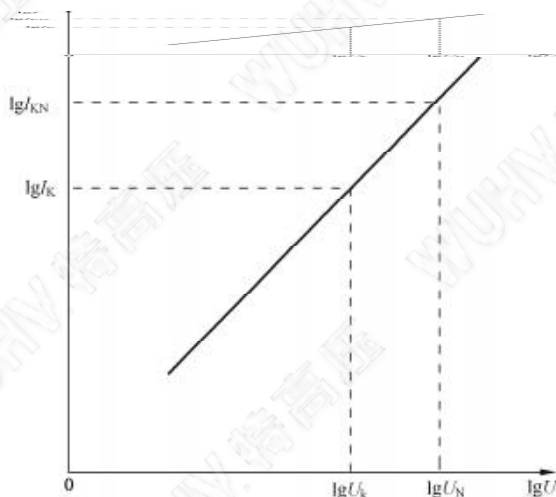


图 22 对数堵转特性曲线

堵转转矩 T_K 由公式(71)确定:

$$T_{KN} = \left(\frac{I_{KN}}{I_K} \right)^2 T_K \quad \dots\dots\dots (71)$$

10.2 标称牵入转矩的测定

10.2.1 一般要求

测定标称牵入转矩时,被试电机的励磁回路应符合 10.1 的规定,标称牵入转矩可用直接负载法或加速法测定。

10.2.2 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,宜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 ($N \cdot m$),按公式(72)计算:

$$T_M = 9.55 \times \frac{P + P_{fws}}{(1-s)n_N} \quad \dots\dots\dots (72)$$

式中:

P ——被试电机的输出功率,即负载电机的输入功率,单位为瓦特(W);

P_{fws} ——被试电机在转差率为 s 时的机械损耗,单位为瓦特(W),如无此数据时,可近似取 P_{fw} 值(见 7.2.3.2.2)。

被试电机在额定电压时的标称牵入转矩 T_{pin} ($N \cdot m$)按公式(73)计算:

$$T_{pin} = \left(\frac{U_N - U'}{U - U'} \right)^2 T_M \quad \dots\dots\dots (73)$$

式中:

U ——求得 T_M 时的试验电压,单位为伏特(V);

U' ——由图 21 确定的电压值,单位为伏特(V);

T_M ——转差率 $s=0.05$ 时求得的电磁转矩,单位为牛·米($N \cdot m$)。

标称牵入转矩的标么值 t_{pin} 按公式(74)计算:

$$t_{pin} = \left(\frac{U_N - U'}{U - U'} \right)^2 \cdot \frac{P + P_{fws}}{(1-s)P_N} \quad \dots\dots\dots (74)$$

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 点~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。

10.2.3 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 $30\%n_N \sim 80\%n_N$ 范围内,每间隔 5 s~10 s 测量一次转速并记录时间。在转速为 $80\%n_N \sim 100\%n_N$ 范围内宜每隔 3 s~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比上述规定快些。

由试验数据作转速对时间的曲线,如图 23 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 $\frac{\Delta n}{\Delta t}$ 。

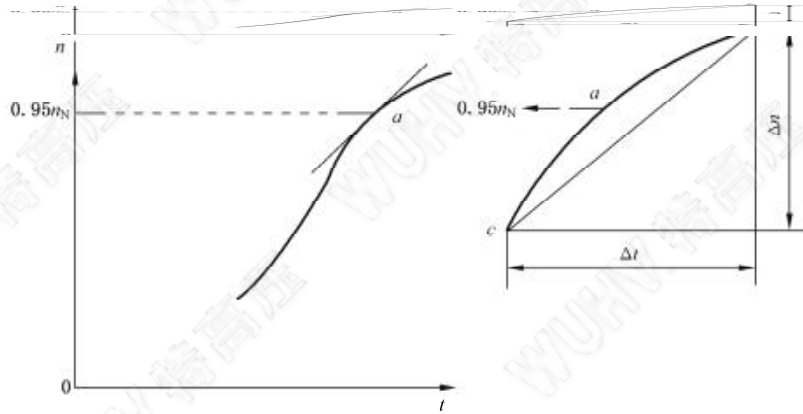


图 23 转速对时间的曲线

电机在试验电压下转矩 T_{pi} ($N \cdot m$) 按公式(75)计算:

$$T_{pi} = \frac{J}{9.55} \cdot \frac{\Delta n}{\Delta t} \quad \dots\dots\dots (75)$$

式中:

J ——被试电机的转动惯量,单位为千克平方米($kg \cdot m^2$)。

如用标么值计算,则按公式(76):

$$t_{pi} = \frac{J n_N \frac{\Delta n}{\Delta t}}{91.2 \times 10^3 P_N} \quad \dots\dots\dots (76)$$

额定电压时的标称牵入转矩 T_{piN} ($N \cdot m$) 按公式(77)计算:

$$T_{piN} = \left(\frac{U_N - U'}{U - U'} \right)^2 T_{pi} \quad \dots\dots\dots (77)$$

如用标么值计算,则按公式(78):

$$t_{piN} = \left(\frac{U_N - U'}{U - U'} \right)^2 t_{pi} \quad \dots\dots\dots (78)$$

式中:

U' ——由图 21 确定。

10.3 同步电动机失步转矩的测定

10.3.1 概述

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。

10.3.2 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 $P(W)$,用公式(79)确定被试电机的失步转矩 $T_{po}(N \cdot m)$:

$$T_{po} = 9.55 \times \frac{P + P_{fw}}{n_N} \dots\dots\dots (79)$$

式中:
 P_{fw} ——被试电机的机械耗,单位为瓦特(W)。

10.3.3 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} 按公式(80)和公式(81)计算:

$$t_{po} = \frac{I_{fN}}{I_{f0}} \cdot \frac{1 + f(\epsilon)}{x_d \cos \varphi_N} \dots\dots\dots (80)$$

$$\epsilon = \frac{I_{f0}}{I_{fN}} \cdot \left(\frac{x_d}{x_q} - 1 \right) \dots\dots\dots (81)$$

式中:
 I_{fN} ——被试电机的额定励磁电流,单位为安培(A);
 I_{f0} ——对应于额定电压时的空载气隙励磁电流,单位为安培(A)(见 15.26.3 或 15.1.1);
 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)。
 $f(\epsilon)$ 取自图 24。

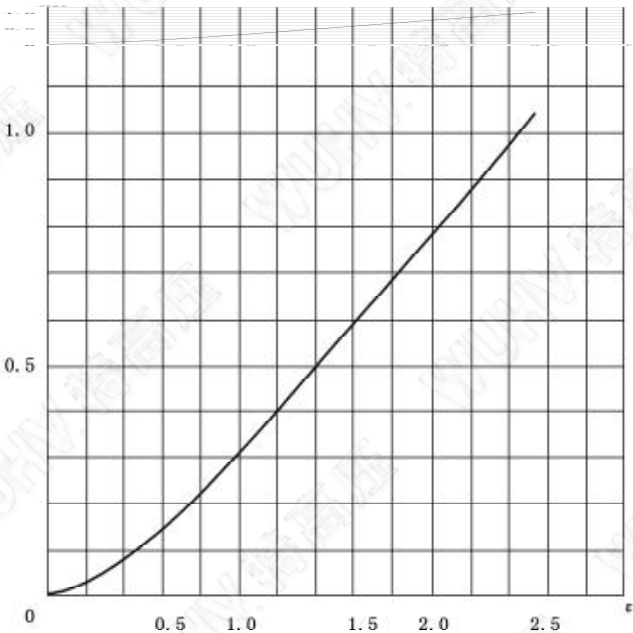


图 24 分析法求取失步转矩的 ϵ 函数曲线

10.4 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/T 755—2019 中 9.4.2 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。

10.5 转动惯量的测定

10.5.1 从悬挂转子扭摆试验确定

进行此试验时将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° 。

用公式(82)或公式(83)计算转动惯量 J ($\text{kg} \cdot \text{m}^2$):

——单弦悬挂时:

$$J = J_p \frac{T^2}{T_p^2 - T^2} \quad \dots\dots\dots (82)$$

——双弦悬挂时:

$$J = \frac{T^2 a^2}{l} \cdot \frac{mg}{(4\pi)^2} \quad \dots\dots\dots (83)$$

式中:

J_p ——已知的皮带轮转动惯量,单位为千克平方米($\text{kg} \cdot \text{m}^2$);

g ——重力加速度,单位为米每二次方秒(m/s^2);

T ——转子扭摆周期平均值,单位为秒(s);

T_p ——带飞轮或皮带轮时的转子扭摆周期平均值,单位为秒(s);

a ——两钢丝之间的距离,单位为米(m);

l ——悬挂长度,单位为米(m);

m ——转子质量,单位千克(kg)。

10.5.2 从辅助摆锤法试验确定

此法用于测定具有滚动(滚珠或滚柱)轴承电机的转动惯量。

将一个质量已知的辅助摆锤用质量尽可能小的臂杆固定于被试电机转轴端面中心上,摆锤臂杆应与轴线成直角。当转轴上带有皮带轮或半个联轴器时,也可用它们来固定摆锤。

试验时,摆锤的初始位置与静止位置的偏移应不大于 15° ,在开始摆动后,测量 2 次~3 次摆动所需的时间,求出扭摆周期的平均值 T_p 。以摆锤通过静止位置的瞬间作为测量扭摆周期的起始点。转动惯量 J ($\text{kg} \cdot \text{m}^2$)按公式(84)计算:

$$J = m \cdot r \left(\frac{T_p^2 g}{4\pi^2} - r \right) \quad \dots\dots\dots (84)$$

式中:

m ——辅助摆锤的质量,单位为千克(kg);

r ——辅助摆锤的重心到转轴中心线的距离,单位为米(m);

T_p ——辅助摆锤扭摆周期平均值,单位为秒(s)。

对功率为 10 kW~1 000 kW 的电机,选用辅助摆锤时,应使摆动周期为 3 s~8 s。为了校核,宜在摆锤质量略有不同的情况下重复进行测定。

10.5.3 从空载自减速试验确定

按 14.23 进行空载自减速试验。转动惯量 J ($\text{kg} \cdot \text{m}^2$) 按公式(85)计算:

$$J = \frac{(P_{\text{mech}} + P_{\text{Fe}}) \cdot \Delta t}{\omega_N \cdot \Delta \omega} = \frac{900 \cdot (P_{\text{mech}} + P_{\text{Fe}}) \cdot \Delta t}{\pi^2 \cdot n_N \cdot \Delta n} \dots\dots\dots (85)$$

式中:

P_{mech} —— 额定转速时的机械损耗,单位为千瓦(kW);

P_{Fe} —— 额定转速和对应于试验电压值的铁心损耗,单位为千瓦(kW);

ω_N —— 额定角速度, $\omega_N = \pi n_N / 30$, 单位为弧度每秒(rad/s);

n_N —— 额定转速,单位为转每分(r/min)。

转动惯量 J ($\text{kg} \cdot \text{m}^2$) 与储能常数 H (s) 之间的关系如公式(86):

$$J = \frac{2S_N}{\omega_N^2} \times H = \frac{2 \times 900 \times S_N}{\pi^2 n_N^2} \times H \dots\dots\dots (86)$$

式中:

S_N —— 额定视在功率,单位为千伏安(kVA);

H —— 储能常数,单位为秒(s);

ω_N —— 额定角速度, $\omega_N = \pi n_N / 30$, 单位为弧度每秒(rad/s);

n_N —— 额定转速,单位为转每分(r/min)。

11 过电流和机械强度试验

11.1 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/T 755—2019 中 9.3 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,电机应不发生冒烟、臭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,应注意端部结构过热。

11.2 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。

11.3 短路机械强度试验

本试验系破坏性试验,试验前应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,不准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。

12 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。

13 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。

14 确定各参数的试验

14.1 一般要求

14.1.1 测试仪器的要求

确定各项参数的试验测试仪器的要求见 5.3。

14.1.2 励磁系统的要求

对于带有无刷励磁机的同步电机,励磁绕组通过旋转变压器,大部分情况下是二极管整流器,连接到励磁机电枢绕组而无需集电环。因此一些试验中,需要在独立电源给磁场绕组供电时测量励磁电流,或将励磁绕组短路,而无需做特殊的安排(例如,临时在轴端安装集电环)。

14.1.3 试验条件

确定同步电机参数的试验应在一台完整的电机上进行,试验过程中除非特别要求,电机所有的自动调节装置都应关闭,与参数结果无关的设备都不应安装。

除非另有规定,试验应在额定转速下进行。

注:电机在转子静止状态下与转子旋转状态下进行试验的结果可能会存在差异,例如,当阻尼绕组参数取决于离心力的时候。

下述情况测试绕组温度:

- 试验所确定的参数取决于温度,或
- 试验中出于安全考虑需要监控温度。

当瞬时温度可能会超出安全值时,宜在正常冷却状态下的空载运行的电机上开始试验,或者是经过一段时间的冷却确保起始温度较低,而且宜小心监控和预判温度从而能在温度过高前停止试验。

试验时,电机绕组通常按正常工作时的接法进行连接。

各种参数的确定都是按电枢绕组为星型接法考虑(除非规定了特殊接法,如开口三角形),若电枢绕组实际为三角连接,则按本文件所获得的参数值对应于一个等效的星接绕组。

14.1.4 基值标么值

所有公式均采用 SI 单位的物理值或对应特定的基值标么值来表达。通常,基值指额定电压(U_N)和额定视在功率(S_N),此时,按公式(87)导出基值电流:

$$I_N = \frac{S_N}{\sqrt{3}U_N} \quad \dots\dots\dots (87)$$

按公式(88)计算基值阻抗:

$$Z_N = \frac{U_N^2}{S_N} = \frac{S_N}{3I_N^2} \quad \dots\dots\dots (88)$$

中间计算可用物理值,然后再换算成标么值,时间宜用秒表示。在特性计算中和绘制图形时,取空载曲线上对应额定电压的励磁电流为励磁电流基值,图形和特性绘制后,电流和电压可表示为物理值。

如电机有若干额定值,则应说明哪些被取为基值。

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

本文件给出的用于确定同步电机电抗的公式中,正序电枢电阻可忽略不计,除非另有说明。当正序电枢电阻大于被测电抗的 0.2 倍时,这些公式应视为近似公式。

14.1.5 约定和假设

本文件给出的大部分参数定义及其测定试验方法,是符合广泛认可的同步电机双轴理论,把励磁绕组以外的所有回路,近似地表示为两个等效回路,并相对励磁绕组静止不动,一个沿着直轴,另一个沿着交轴,电枢电阻忽略不计或只是近似地加以考虑。

由于对电机进行这种近似表示,因此本文件在对瞬态过程的研究中延直轴考虑有三个电抗(同步电抗、瞬态电抗和超瞬态电抗)和两个时间常数(瞬态时间常数和超瞬态时间常数),延交轴考虑有两个电抗(同步电抗和超瞬态电抗)和一个时间常数(超瞬态时间常数),以及电枢短路时间常数。

这些时间常数是有关参数(电流、电压等)的特定分量是按指数衰减的假设为基础的,若以实际测得分量绘制的曲线并非单纯按指数衰减,例如实心转子电机的情况,宜把时间常数理解为该分量自其初始值衰减至 $1/\epsilon \approx 0.368$ 倍初始值时所需时间,与这些时间常数对应的按指数衰减的曲线应被视为代替实际测得的曲线的等效曲线。

常用的三电抗和两时间常数的表示方式往往不足以充分地描述电机,则宜将高阶参数加入模型中。在汽轮机的情况中,其模型可用参数 X''_d, τ''_d 来改进,这些参数可按本文件进行确定(应符合附录 B 的规定)。

常用电机模型应符合附录 C 的规定。

注:本文件规定了确定交轴瞬态参数 $X'_q, \tau'_q, \tau'_{q0}$ 的方法(见 6.14),尽管当假设 $X'_q = X_q$ 时,这些参数在常规计算中经常不做考虑。

14.1.6 考虑磁饱和

同步电机参数随磁路饱和程度而变化,在实际计算中,饱和值和不饱和值两者都会使用。

除非另有规定,本文件中电抗和电阻的“饱和值”取为额定(电枢)电压下的参数值,而它们的“不饱和值”取为额定(电枢)电流下的值,除了同步电抗,其他参数的不饱和值取为低电压下的参数值,饱和值取为电机负载时额定电压下的值。参数的饱和值取决于运行模式。

电机在额定转速下运行,电枢绕组从空载额定电压工况突然短路的过程中,参数(除同步电抗)的额定(电枢)电压值对应于磁路状况。

参数的额定(电枢)电流值对应于确定此特定参数的电枢电流的基波交流分量等于额定电流时的状况。

直轴同步电抗的不饱和值 X_d 通常用空载饱和试验与稳态三相短路试验来确定,电机空载试验可确定直轴同步电抗 X_d 的不饱和值与饱和值。然而,由这些试验确定的饱和参数并非针对电机特定的运行模式,而是仅仅用于与在其他电机上用相同试验所获得的参数值进行比较。

反励磁试验和低转差率试验可用于确定不饱和值。

突然三相短路试验是优选方法,可用于确定直轴瞬态电抗 X'_d 的饱和值与不饱和值。

无刷励磁电机如果由其自身励磁或由一个通过安装在转子上的临时集电环的独立励磁机励磁,励磁机改为他励励磁,则也可进行额定转速下的突然三相短路试验和励磁电流衰减试验(来确定 τ'_{d0} 和 τ'_d)。电压恢复试验可在不带集电环的情况下进行,若电机是由自身的励磁机励磁的,后者应改为他励

励磁。

突然三相短路试验是优选方法,可用于确定 X_d'' 的饱和与不饱和值。

外施电压法是实际等效的且能用于确定 X_d'' 和 X_q'' 的不饱和值,但用于饱和值通常是不现实的,因为需要大电流而且可能会导致绕组和实心部件产生过热。

若采用突然三相短路试验来确定 X_d' ,那么 τ_d' 宜在同一试验中确定。若时间常数 τ_a 小于一个基本周期,其值由电枢绕组中的电流的非周期(直流)分量的衰减来确定;若时间常数 τ_a 超出一个周期,优选测量励磁绕组中的周期分量的衰减法。

注:对于同步补偿电机,额定有功功率(输出)由视在功率代替。

上述所有方法实际上是等效的。应用这一方法还是另一种方法取决于被试电机的设计及其视在功率。

14.1.7 试验概述

确定同步电机参数的试验和优选方法见表 7。

表 7 试验方法和交叉引用表

参数	章条号	简述	试验	优选/ 不确定度
电抗				
直轴同步电抗 X_d	15.2.1	空载饱和,三相稳态短路	14.4 和 14.5	优选(不饱和)
	15.2.2	电动机空载试验	14.6	
	15.2.3	负载试验测定功角	14.9	
直轴瞬态电抗 X_d'	15.3.1	三相突然短路	14.11	优选
	15.3.2	电压恢复	14.12	
	15.3.3	静态电枢绕组直流衰减	14.14	
	15.3.4	由试验值计算	—	
直轴超瞬态电抗 X_d''	15.4.1	三相突然短路	14.11	优选
	15.4.2	电压恢复	14.12	
	15.4.3	转子处于直轴和交轴位置时的外施电压试验	14.15	
	15.4.4	转子处于任意位置时的外施电压试验	14.16	
交轴同步电抗 X_q	15.5.1	反励磁	14.8	优选(不饱和)
	15.5.2	低转差率	14.10	
	15.5.3	负载试验测定功角	14.9	
交轴瞬态电抗 X_q'	15.6.1	静态直流衰减试验	14.14	
	15.6.2	由试验值计算	—	
交轴超瞬态电抗 X_q''	15.7.1	转子处于直轴和交轴位置时的外施电压试验	14.15	优选
	15.7.2	转子处于任意位置时的外施电压试验	14.16	
零序电抗 $X_{(0)}$	15.8.1	三相绕组外施单相电压试验	14.17	优选
	15.8.2	两相对中性点稳态短路	14.19	

表 7 (续)

参数	章条号	简述	试验	优选/ 不确定度
电 抗				
负序电抗 $X_{(2)}$	15.9.1	两相稳态短路	14.18	优选
	15.9.2	逆相序	14.20	
	15.9.3	由试验值计算	—	
	15.9.4	静态电枢绕组直流衰减试验	14.14	
电枢漏抗 X_{σ}	15.10	转子移除	14.22	
保梯电抗 X_p	15.11	空载饱和,三相稳态短路	14.4 和 14.5	
电 阻				
零序电阻 $R_{(0)}$	15.12.1	三相绕组外施单相电压试验	14.17	优选
	15.12.2	两相对中性点稳态短路	14.19	
正序电枢电阻 $R_{(1)}$	15.13	由试验值计算	—	
负序电阻 $R_{(2)}$	15.14.1	两相稳态短路	14.18	优选
	15.14.2	逆相序	14.20	
电枢电阻 R_a	15.15	电流电压表法或电桥法	14.3	
励磁绕组电阻 R_f	15.15	电流电压表法或电桥法	14.3	
时间常数				
直轴瞬态短路时间常数 τ_d'	15.16.1	三相突然短路	14.11	优选
	15.16.2	静态电枢绕组直流衰减	14.14	
直轴瞬态开路时间常数 τ_{do}'	15.17.1	额定转速、电枢绕组开路时的励磁电流衰减试验	14.21.1	优选
	15.17.2	静态下电枢绕组开路时的励磁电流衰减试验	14.21.2	
	15.17.3	电压恢复	14.12	
	15.17.4	静态电枢绕组直流衰减	14.14	
直轴超瞬态短路时间常数 τ_d''	15.18	三相突然短路	14.11	
直轴超瞬态开路时间常数 τ_{do}''	15.19.1	电压恢复	14.12	优选
	15.19.2	静态电枢绕组直流衰减	14.14	
交轴瞬态短路时间常数 τ_q'	15.20.1	由试验值计算	—	优选
	15.20.2	静态电枢绕组直流衰减	14.14	
交轴瞬态开路时间常数 τ_{qo}'	15.21.1	静态电枢绕组直流衰减	14.14	
交轴超瞬态短路时间常数 τ_q''	15.22.1	由试验值计算	—	优选
	15.22.2	静态电枢绕组直流衰减	14.14	

表 7 (续)

参数	章条号	简述	试验	优选/ 不确定度
时间常数				
交轴超瞬态开路时间常数 τ''_{q0}	15.23	静态电枢绕组直流衰减	14.14	
电枢短路时间常数 τ_a	15.24.1	三相突然短路	14.11	优选
	15.24.2	由试验值计算	—	
其他参数				
单位加速时间 τ_j , 储能常数 H	15.25	空载自减速	14.23	优选
额定励磁电流 I_{fN}	15.26.1	直接测量法	14.2	优选
	15.26.2	保梯图法	—	
	15.26.3	ASA 图法	—	
	15.26.4	瑞典图法	—	
额定电枢短路电流时的励磁电流 I_{fk}	15.27.1	三相稳态短路试验	14.5	优选
	15.27.2	零功率因数时的过励磁和可调电枢绕组电压	14.26	
频率响应特性	15.28.2	降压异步运行	14.25	优选
	15.28.3	静态外施可调频率电压	14.27	
	15.28.4	静态电枢绕组直流衰减	14.14	
短路比 K_c	15.29	空载饱和	14.4	
		三相稳态短路	14.5	
额定电压调整率 ΔU_N	15.30.1	直接测量法	14.2	优选
	15.30.2	由空载饱和曲线和已知的 i_{fN} 作图	14.4.2	
同步电动机初始启动阻抗 Z_{st}	15.31	堵转	14.24	

14.2 额定负载时直接测定励磁电流

额定励磁电流 I_{fN} 是电机运行在额定电压、额定电流、额定功率因数和额定转速时励磁绕组中的电流。

若采用在额定条件下运行期间直接测量来确定额定励磁电流时,由于用自动系统来励磁时的励磁电流可能与他励励磁电流不同,此时被试电机宜采用其自带的自动调整系统来励磁。

注:无刷电机能利用临时的集电环来进行直接测定励磁电流。

14.3 测定直流绕组电阻

电阻的测定按 5.4 的规定。

测量期间绕组温度宜采用内置式或在合适处埋入的热传感器来测定。

14.4 空载饱和试验

空载饱和试验见 6.4。

14.5 稳态三相短路试验

稳态三相短路试验见 6.5。

14.6 电动机空载试验

本试验按 6.4.1 的 b) 进行, 如被试电机以电动机运行、轴端为空载等, 但是励磁绕组电流为零。为了获得直轴同步电抗 X_d 的不饱和值, 电机的端电压值不宜超过额定电压值的 50% 至 70%。

同步记录:

- 电枢电流;
- 线电压;
- 频率(或转速)。

14.7 零功率因数过励试验

零功率因数过励试验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宜等于零。作电动机运行时轴上负载应为零。

试验时, 在零功率因数下过励, 确定励磁电流, 对应的电压值和电枢电流值与额定值的偏差最好不大于额定值的 ± 0.15 (标么值)。

若未明显超过额定励磁电流, 在零功率因数、额定电压和电流值时的过励试验是优选方法。

本试验不适用于永磁电机。

14.8 反励磁试验

进行此试验时, 电机与电网并联, 作空载运行。励磁电流平稳地减少到零, 变化其极性, 然后逐渐增加, 直到电机滑行一个磁极距。

记录: 电压, 电枢电流和励磁电流, 直到电机开始滑行。

本试验不适用于永磁电机。

14.9 负载试验测定功角

试验在电机与电网并联运行时进行, 电机的负载在额定功率因数时应不小于额定有功功率的 0.5 倍。

记录: 电枢电流和电压, 有功功率或直接测量 $\cos\varphi$, 励磁电流和功角。

注: 功角 δ 是端电压向量和电势(e.m.f.)间的夹角, 后者表示交轴方向。

14.10 低转差率试验

进行低转差率试验时, 在被试电机的电枢端子处施加三相对称的低于常规的电压 ($0.01 U_N \sim 0.02 U_N$), 所施电压宜使电机不致被牵入同步。励磁绕组应开路, 转子由原动机驱动, 转差率低于 0.01, 对实心转子转差率应远低于此值, 这样在电机异步运行时, 阻尼回路中感应的电流对测量的影响可忽略不计。

当电源开关合闸或断开时, 励磁绕组应是闭合的(短路或通过放电电阻), 以免可能引起的损害, 测量电枢电流和电压、集电环电压、转差率。若试验前测得的剩磁电压大于试验电源电压的 0.3 倍, 则转子宜去磁处理。例如, 可如此去磁: 将励磁绕组接至一低频电源, 电流约为被试验电机空载额定电压励

磁电流的 0.5 倍,逐步降低其幅值和频率(如果后者可能)。

由于需要在励磁绕组开路或励磁电流为零时读数,本试验不适用于永磁电机。

14.11 三相突然短路试验

本试验在电机初始转速为额定转速时进行,在所需要的电压下空载运行时将其电枢绕组短路。励磁通常由自带的他励励磁机提供。

若自带励磁机不可用,则可用独立的励磁机,对于无刷励磁机可能还需要采用临时集电环,但其额定电流值宜至少为被试电机空载励磁电流的两倍,该励磁机宜他励。

同步进行三相短路。各相触点应在彼此的 15° 电角度内闭合,当电枢直流分量无关紧要时,也可超过此值。用无感分流器或其他合适的电流互感器来测量短路电流。后者宜仅仅用于交流电流分量,并使短路电流的瞬态分量的初始值处于所选互感器特性的线性部分。

注:对于额定频率小于 60 Hz 的电机,可使用直流分流器。

短路后连续记录时间不宜小于 $3\tau'_d$ 。随后形成稳定工况时也应记录稳定状态值。为求得对应电机不饱和状态下的参数,试验在 $10\%\sim 40\%$ 额定值的几个电枢电压值下进行。由各个试验确定参数并绘出对交流瞬变或超瞬变电枢电流初始值的关系曲线。由这个关系,求得额定电枢电流值时所需的各参数。

为求得对应电机饱和状态下的参数,试验在电枢绕组短接前电机端电压为额定值时进行。

若突然短路不能在额定电枢电压下进行,则试验应在若干不同电枢电压(30% 、 50% 和 70% 额定电枢电压等)下进行,并由每项试验确定各参数。然后绘制它们对短路前开路电压的关系曲线,并用外推法求出额定电枢电压下参数的近似值。

短路后立即记录:

- 端电压;
- 励磁电流;
- 励磁绕组温度。

在短路期间记录每相电枢电流和励磁电流的时间函数。按 15.1.2 分析出数据。

若设计上足以防止磁体退磁,则本试验能用于永磁电机。

14.12 电压恢复试验

被试电机以额定转速运行,用断路器将电枢绕组短路,并且将励磁电流设置在一个对应空载饱和曲线直线部分的值,通常可使额定开路电枢电压不高于其额定值的 0.7 倍。

应基本上在同一时刻切除三相稳态短路,各电流在角度 $\theta \leq 0.5\tau''_d$ (将 τ''_d 定义为电角度) 以内切断,但是不迟于 180° 电角度。需要记录一个线间电压恢复过程和一个电枢电流的时间函数。

注:如果电机装有临时集电环(以他励励磁机励磁)或能由他励的自带励磁机励磁,则本试验能用于无刷励磁电机。

切断短路后立即记录:

- 端电压;
- 励磁电流;
- 励磁绕组温度。

短路切断后记录每相电枢电流和励磁电流的时间函数。

按 15.1.3 分析出数据。

本试验适用但无关于永磁电机。

14.13 切断电源线后实施三相突然短路试验

在被试电机减速率不超过 0.05 倍额定转速每秒的条件下,可在减速期间进行三相突然短路试验。

从电源线切断前,电机励磁增至功率因数为 1 时的电流值以空载运行,或者至一更低电流值。测量和记录励磁电流和电压。

在切断后尽可能快速,但不迟于 1 s,基本上同步地将电机短路。试验设备、测量设备、励磁以及参数测定等一般要求与 14.11 所述相同。

对凸极电机,若其振动不超过容许值,电流可增加至额定电流。对隐极电机,电枢电流通常限定在 0.5 倍额定值。

14.14 静态电枢绕组直流衰减试验

静态电枢绕组直流衰减试验在电机静止时进行。通过一个电阻在电机电枢绕组(两端子之间第三端子开路,或两相并联再与第三相串联)施加直流电压(见图 25)。当接触器 K 合闸时,电枢绕组短路,且电枢绕组电流开始衰减。记录电流衰减的整个过程。

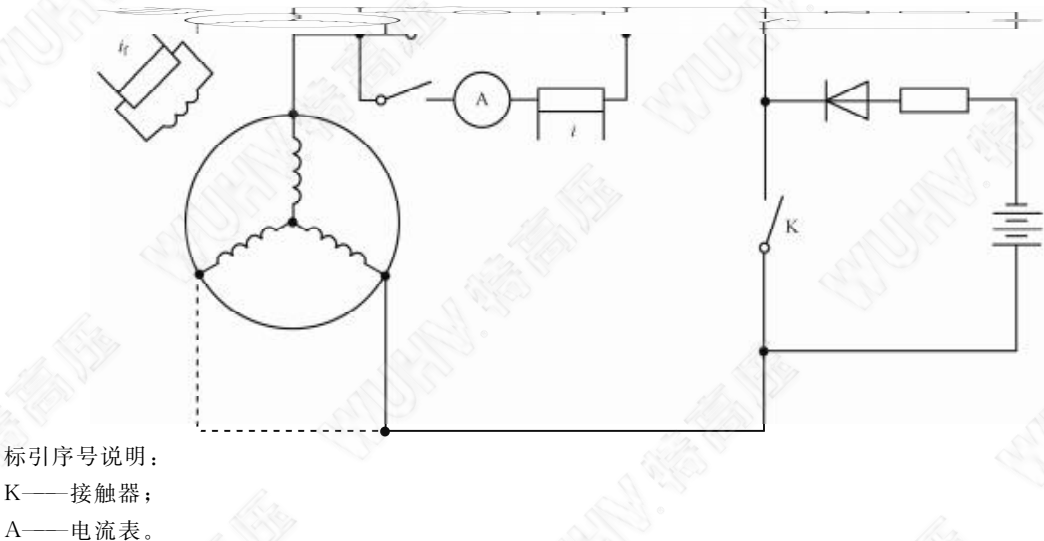


图 25 静态直流衰减试验原理图

接触器 K 的电阻应远低于电枢绕组电阻,所选的串接在电压源上的电阻的阻值应使得接触器合闸不能明显影响电压源的电流值(电流值的变化应不超过极少的几个百分数)。

将一直流电流通过电枢(初级)绕组使电机磁系统初始磁化,这将产生饱和,电机转子沿着直轴放置然后再沿着交轴放置进行试验。初始磁化后,紧接着,逐渐减少磁性直至试验电流值,在接触器 K 合闸后短路或断开。

记录电流衰减的整个过程。

转子沿着直轴位置进行试验,将励磁绕组短接,相对于时间记录其电流。此时励磁绕组回路应无附加电阻产生影响。

转子沿着交轴位置进行试验,将励磁绕组开路,相对于时间记录其感应电压。转子沿着直轴位置进行同样的试验。

试验后,测量励磁绕组回路和励磁绕组自身的直流电阻。

按 15.1.4 分析出数据。

本试验不完全适用于永磁电机。

14.15 转子处于直轴和交轴位置时的外施电压试验

试验时,在电枢绕组任意两端间外施额定频率的交流电压。

励磁绕组带相关测量设备短接,以便测量其电流。宜限制外施电压时间,以免严重过热。

慢慢旋转转子,找出对应于励磁电流值最大和几乎为零的位置。前者为直轴位置,后者为交轴位置。施加电压,当转子停在上述两个位置时,测量电源电压、电枢绕组电流和输入功率。励磁绕组电流是用来判断转子所处位置(直轴或交轴)的,因此,不必用高精度的仪器来测量。

从本试验所确定的参数,根据电枢电流值,可包括阻尼绕组泄漏通路的饱和值。在额定电流下确定的阻尼绕组通路相关饱和参数折算到不饱和状态值。

一般情况下,由于需要大电流而且绕组和实心部件可能过热,因此不能通过本试验确定饱和值。

若不能在额定电枢电流下进行本试验,则应用不同的电枢电流($0.2 I_N \sim 0.7 I_N$)做几次试验,以确定电机在不饱和状态下的各参数。

各参数对电枢电流作曲线,然后用外推法求取所需要的值。

对于采用闭口或半闭口电枢槽和闭口阻尼绕组槽的电机,外施电压应不低于额定电压值的 0.2 倍。

对于无刷励磁电机,励磁绕组宜从旋转整流变压器切断并短接。

本试验不适用于永磁电机。

14.16 转子处于任意位置时的外施电压试验

试验时,被试电机处于静止状态,在电枢绕组每对端子间依次外施交流电压。

励磁绕组应短路并测量其电流。三次外施试验电压时转子位置应保持不变。

必要时,应将转子堵住。宜限制外施电压时间,以免实心部件严重过热。

当在每一对端子间外施交流电压时,测量外施电压、电流和输入电枢的功率以及励磁绕组电流。求取的参数折算到电机不饱和或饱和状态的要求与 6.15 相同。

对于无刷励磁电机,励磁绕组宜从旋转整流变压器切断并短接。

本试验适用但无关于永磁电机。

14.17 三相绕组外施单相电压试验

试验时,被试电机拖动至额定转速或其附近运行,在串联或并联的三相端子上外施单相电压。连接方式应使得每一相中的电流按零序定义的同方向流过。

记录电压 U 、电流 I 和有功功率 P 。

本试验不适用于永磁电机。

14.18 两相稳态短路试验

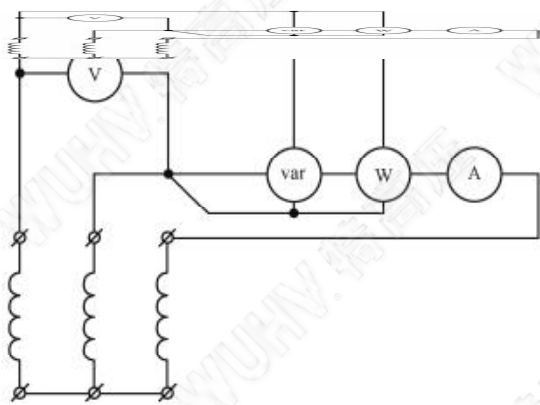
试验时,将任意两个端子短接(见图 26),并用某种原动机把电机驱动到额定转速。

测量短路电路 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,宜测量有功功率 P 和无功功率 Q 。

在几个短路电流值下进行测量。

为避免实心部件的严重过热,两相稳态短路电流超过 $0.3 I_N$ 时,试验过程宜限制在测量仪表读数所需的时间。

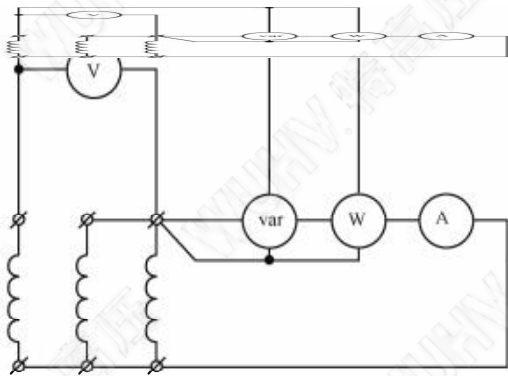


标引序号说明：
V —— 电压表；
A —— 电流表；
W —— 有功功率表；
var —— 无功功率表。

图 26 两相稳态短路试验线路图

14.19 两相对中性点稳态短路试验

两相对中性点稳态短路试验在电枢绕组星型接法下进行，两个端子对中性点短接，电机被驱动到额定转速并施加励磁(见图 27)。



标引序号说明：
V —— 电压表；
A —— 电流表；
W —— 有功功率表；
var —— 无功功率表。

图 27 两相对中性点稳态短路试验线路图

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 。

考虑到谐波的影响，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，电流值和试验时间应由转子过热或振动来加以限制。

本试验不完全适用于永磁电机。

14.20 逆相序试验

试验时，把电机拖动到额定转速，接到一个逆相序的外部电源，外施 $(0.02 U_N \sim 0.2 U_N)$ 的对称电

压,即电机运行在转差率等于 2 的电磁制动状态。

励磁绕组应短接。

若被试电机的剩磁电压超过电源电压的 30%,则试验前应将转子去磁。试验时测量所有三相电压、电流以及输入功率。

本试验不适用于永磁电机。

14.21 电枢绕组开路时的励磁电流衰减试验

14.21.1 额定转速下试验

用原动机将电机驱动到额定转速,施加励磁到额定电压,然后突然短接励磁绕组。必要时励磁绕组电源可在 0.02 s 以内切除。

注:试验时,可将一个限流电阻串接在励磁绕组中以限制直流电源的短路电流。

记录电枢绕组电压、励磁绕组电流和集电环电压的时间函数。后者用来精确确定励磁电流衰减的起始瞬间(零时间)和此刻的初始电压值。

以从时间函数求取的瞬态电压和电机剩磁电压间的差值对时间按半对数坐标作关系曲线。

本试验不适用于永磁电机。

14.21.2 静态下进行试验

电机处于静止状态,电枢绕组开路,励磁绕组由独立的直流电源供电,然后突然将励磁绕组短接。必要时励磁绕组电源可在 0.02 s 以内切除。

注:试验时,可将一个限流电阻串接在励磁绕组中以限制直流电源的短路电流。

记录励磁绕组电流的波形图,并对时间按半对数坐标作关系曲线。

本试验不适用于永磁电机。

14.22 转子移除时的外施电压试验

试验时,移除转子,在电枢绕组上外施三相额定频率的对称电压。

将探测线圈放置在齿部上或略小于膛径的位置以消除槽间漏磁。线圈长度等于整个电枢铁心长度;线圈宽度等于一个磁极距。末端部分用钢丝支撑沿着电枢铁心齿端部平面的半径朝电机轴线拉紧,以消除电枢磁舌端绕组周围漏磁的影响(见图 28)。

若电枢每极每相的槽数为分数,则线圈的宽度按构成磁极距的最大整数槽宽来制作。

电枢绕组连接至电源并测量外施电压 U 、电枢绕组磁化电流 I 、输入功率 P 和探测线圈的电压 U_c 。探测线圈的电压应采用高内阻电压计测量。

本试验适用于永磁电机。

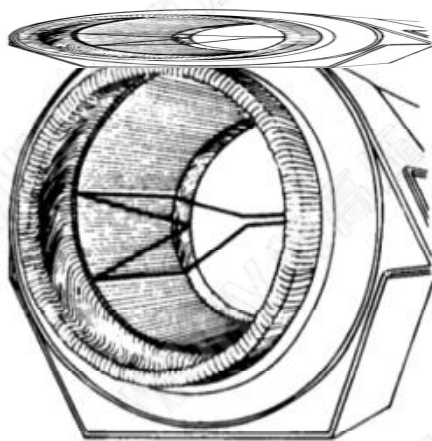


图 28 转子移除时安装探测线圈

14.23 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。该电机由独立电源励磁且试验过程中励磁保持恒定。

提高供电频率或用带有离合器的原动机把被试电机升速到超速,然后切断电源。

本试验测量当电机在两个相差 $\Delta\omega$ 的预设转速之间的自减速时间 Δt ,比如,从 1.10 到 0.90 标么值或从 1.05 到 0.95 标么值。

本试验适用于永磁电机。

14.24 堵转试验

试验时,将转子堵住,在电枢绕组施加额定频率的三相电压,励磁绕组短路或根据需要接入一个启动电阻。

除非阻尼绕组过热或电枢绕组不允许进行此试验,否则试验应以额定电压施加在电枢绕组上进行。

在此情况下,可进行一系列降低电压试验,从而可用外推法确定额定电压下的参数。由于饱和效应,施加的降低电压的值宜足够高,以便准确外推额定电压下的点。通常,试验时的电枢电流宜超过其额定值的 2 倍。

施加电压的时间应限制在读数所需时间和使转子部分发热,且持续时间宜少于 10 s。

记录:

- 所有三相的电枢电压和电流;
- 输入功率(可取)。

本试验不适用于永磁电机。

14.25 降低电压异步运行试验

试验时,被试电机施加额定频率降低的对称电压($0.01 U_N \sim 0.2 U_N$),电压来自外部电源。

励磁绕组短接。若电机的剩磁电压超过外施电压的 0.3 倍,则试验前应将转子去磁。试验时,测量和记录线间电压、线电流和输入功率。在计算中,可考虑使用这些参数在整个波动期间的平均值。

逐步改变电机旋转速度;在每个速度下,电压电枢绕组施加电压一段时间以便测量读数和进行记录。在小转差率(低于 0.05)范围,在需要的精度内保持旋转速度恒定变得困难。这种情况下,可在低减速率下进行带瞬态记录的试验(对小电机,不超过 0.04 倍额定转速每秒;对大电机,由于其成套的内在特性减速率将更小)。

以功率和电流的平均值对转差率作关系曲线(见图 29)。
本试验不适用于永磁电机。

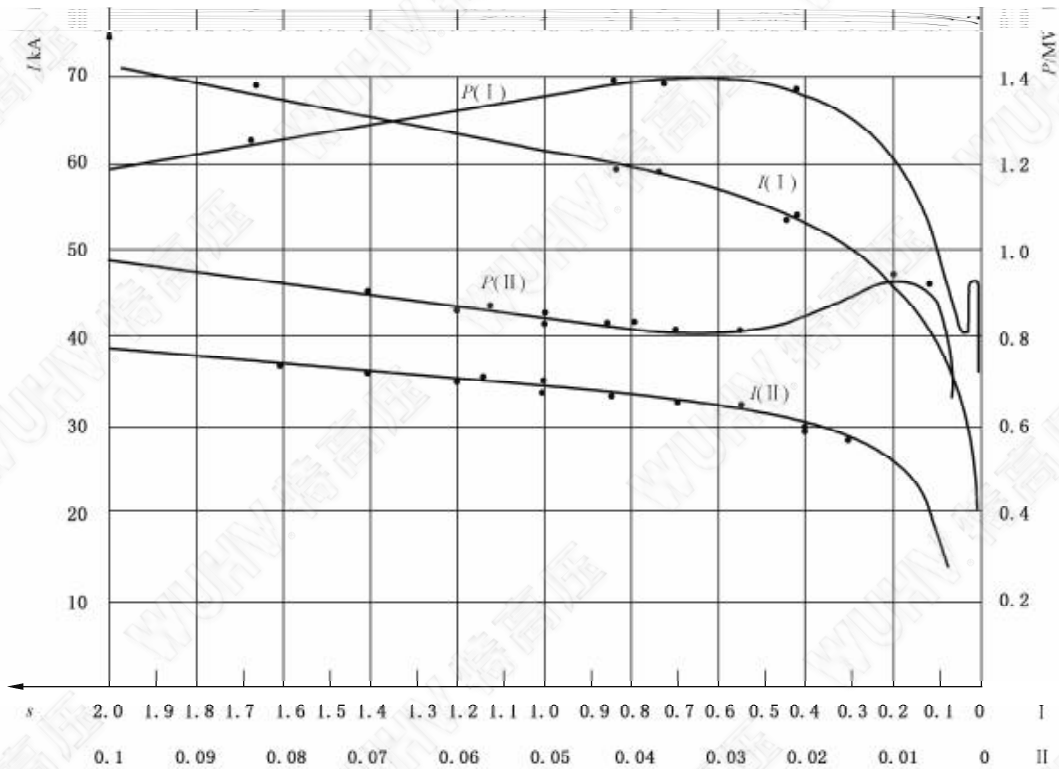


图 29 功率和电流对转差率曲线(示例)

14.26 零功率因数和可调电枢电压时的过励磁试验

试验时,电机运行在发电状态或者电动状态。电机作为发电机运行时其有功功率宜等于零。电机作为电动机运行时其轴上的负载宜为零。

试验中,电枢绕组电流保持恒定且等于额定值,电枢电压在至少额定值到能保持稳定的最低值之间调节。为获得适当的准确性,电枢电压宜降低到其额定值的 0.5 倍以下。

应注意使励磁绕组不发生过热。

本试验不适用于永磁电机。

14.27 静态下外施可调频率电压试验

此试验时,将可调频率电压施加到电枢绕组的一对线端。电机处于静止状态。电枢绕组由一个单相可调频率的功率放大器供电。电机接法为星接,可给 U 端和 V 端供电,第三端 W 端开路或短接到 V 端。励磁绕组短接。图 30 是基本连接原理图。

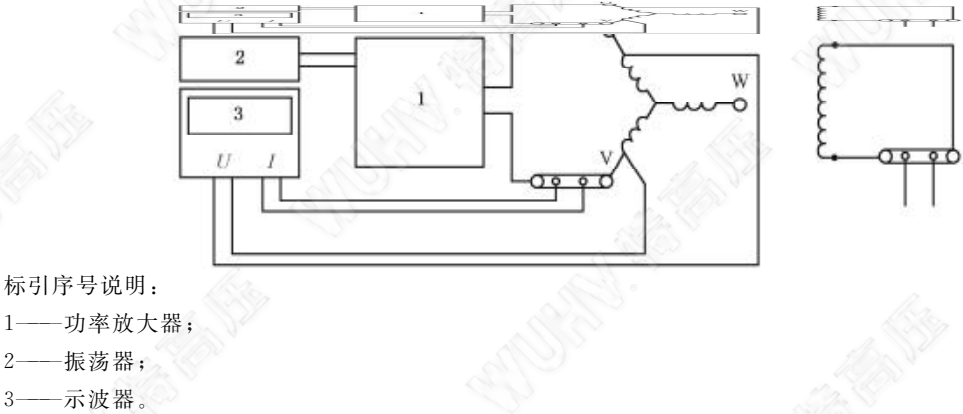


图 30 静态下外施可调频率试验原理图

试验中,转子定位于一个位置使励磁绕组中感应电流为最大值(直轴),另一次定位使感应电流为最小(基本为零)(交轴)。测量和记录供电电压和电枢绕组电流以及它们之间的相位角;由时间函数按公式(89)和公式(90)来确定,见图 31。

$$s = f_t / f_N = (f_b L_b) / (f_N L_1) \dots\dots\dots (89)$$

$$\varphi = 2\pi \cdot (L'_2 + L''_2) / (2L_1) \dots\dots\dots (90)$$

式中:
 L_b ——校准频率周期;
 L_1 ——试验频率周期;
 f_b ——校准试验频率;
 f_t ——试验频率;
 f_N ——额定频率。

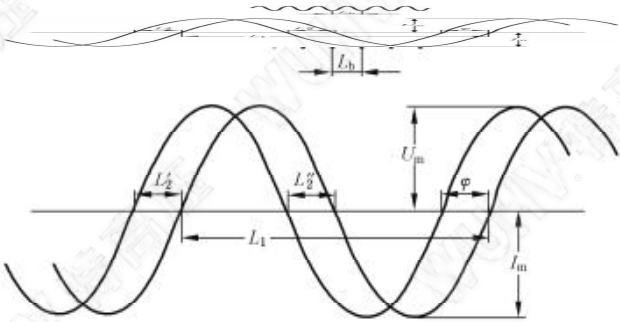


图 31 静态下可变频率试验记录参数(示例)

记录励磁绕组电流仅仅为了评判转子所处位置。对于永磁电机,转子位置得用其他方法确定。相位角也可用具有足够精度的其他方法测量。

试验中应采取一定的保护措施。可能在较高(30%~50%额定电枢电流值)电流也可能在很小电流(5%~10%电枢电流额定值)的时候进行,并且同一相电枢绕组中的直流电流产生的附加磁通叠加在低频电流上,这样交流电流的峰值低于直流电流值。在所有频率下,交流和直流电流宜一样。

在频率为 5 Hz 及以下,阻抗和电阻间的差异变小,电压和电流间的相位角减小,这导致了相位角度测量中的额外误差。

若试验中电枢回路电阻压降得到补偿,误差可能大为减少。

在分流器和辅助电阻中的压降,正比例于测量电流,将此压降从电枢绕组端子处的电压上减去。

15 确定各参数

15.1 分析数据记录

15.1.1 空载饱和特性及三相稳态短路特性曲线

将从 6.4.2(空载饱和特性)和 6.5.2(稳态短路特性)测取的数据按图 32 合并绘制成一组曲线。

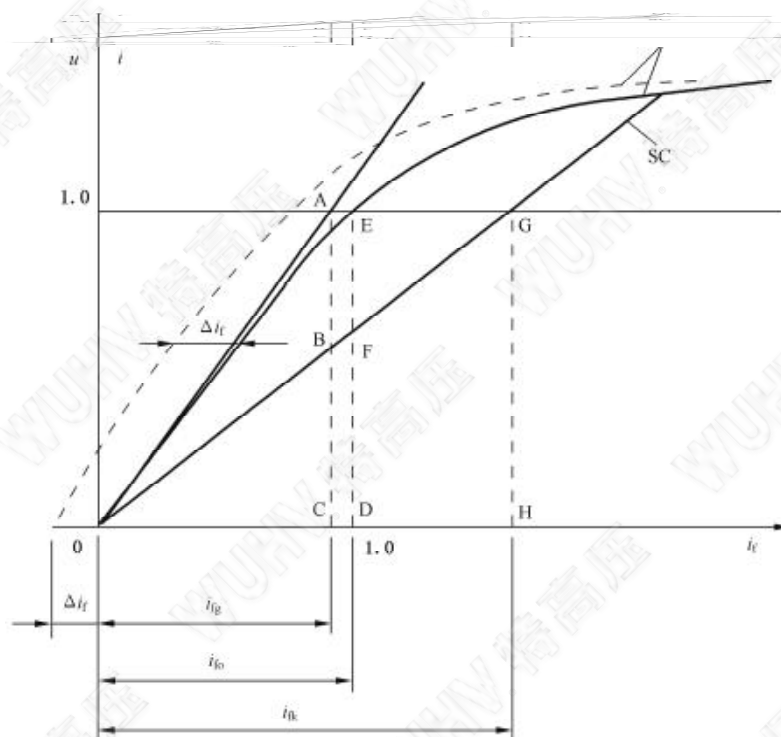


图 32 饱和特性和短路特性组合曲线

图 32 用于确定直轴同步电抗(见 15.2.1 和 15.2.2)和短路比(见 15.2.9)。

15.1.2 三相突然短路试验

从三相短路电流对时间的数据记录(见 14.11)求得每相周期性和非周期性电枢电流分量随时间的变化关系。

由此,可确定短路电流的包络线,包络线贯穿振荡中的每相电流的各个峰值点。

上下包络线上的峰值并不相关(见图 33),应在两个包络线上计算出相关中间点,宜采用合适的插值算法计算相关中间点。

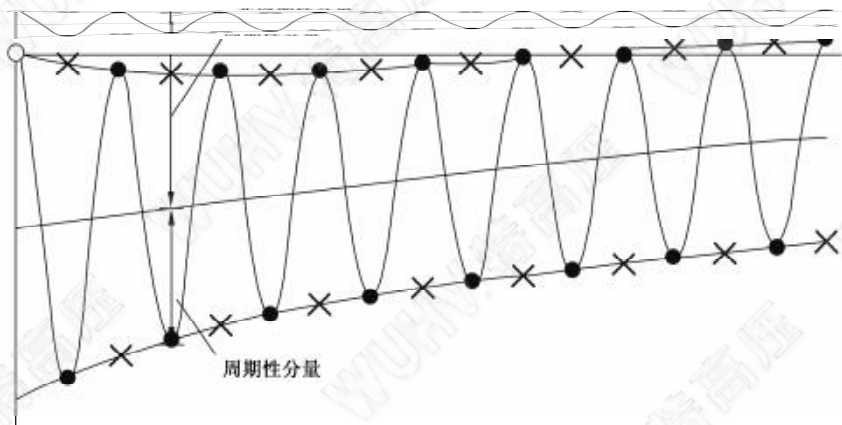


图 33 包络线上确定中间点

每相电流的非周期分量曲线由该相电流上下包络线上电流值的一半求得。初始值由外推到短路时刻确定, $t=0$ 。

短路时电枢电流周期性分量以三相电流包络线上的周期性分量的算术平均值计算。

稳态短路电流以 6.5 三相稳态短路试验中完全衰减了的周期性短路电流上的几个连续幅值的平均值计算。

为确定瞬态($\Delta i'_k$)电流分量,由电枢电流周期性分量减去稳态短路电流值 $i(\infty)$ 。

为确定瞬态($\Delta i'_k$)分量,对在约 5 倍超瞬态时间常数 τ''_d (或 0.2 s)到约为瞬态时间常数 τ'_d 时间段之间的瞬态电流周期性分量值的包络线的余数作自然对数曲线。瞬态电流对数曲线有明显的初始斜率,初始斜率的倒数即为瞬态时间常数。以直线与曲线纵坐标的交叉点来计算初始瞬态电流($\Delta i'_k$)(见图 34)。

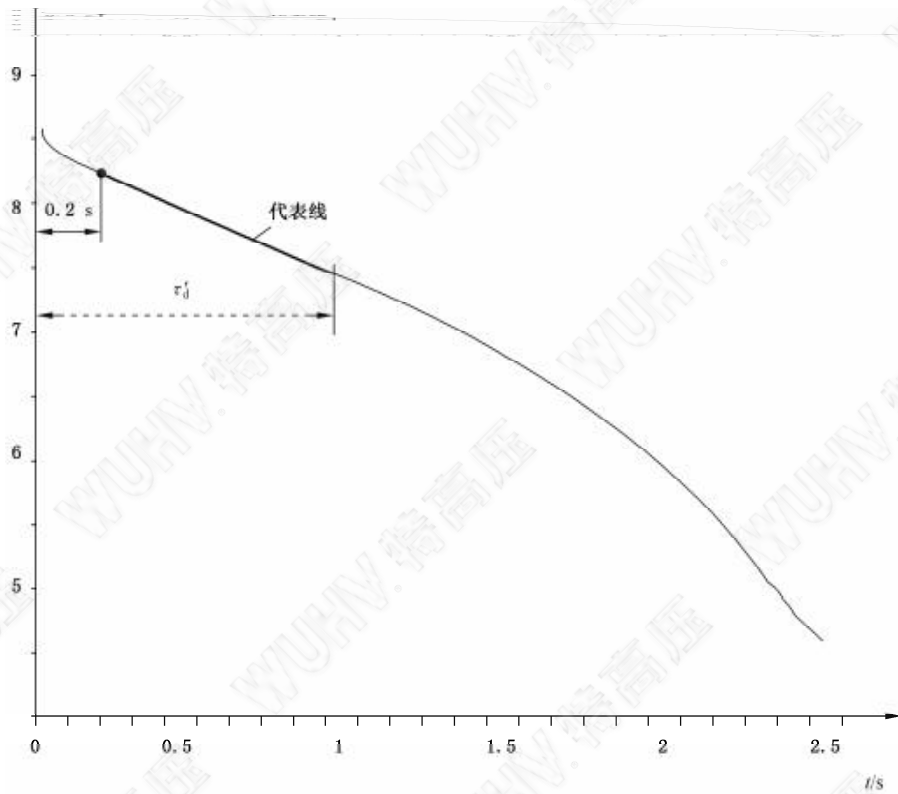


图 34 确定短路电流瞬态分量

为确定超瞬态($\Delta i_k''$)分量,由电枢电流周期性分量减去瞬态值($\Delta i_k'$)和稳态短路电流 $i(\infty)$ 。

为确定超瞬态($\Delta i_k''$)分量,对在限定最大为 $2 \times \tau_d''$ 时间段内的超瞬态电流周期性分量值的包络线的余数作自然对数曲线。超瞬态电流对数曲线有明显的初始斜率,初始斜率的倒数即为超瞬态时间常数。以直线与曲线纵坐标的交叉点来计算初始超瞬态电流($\Delta i_k''$) (见图 35)。

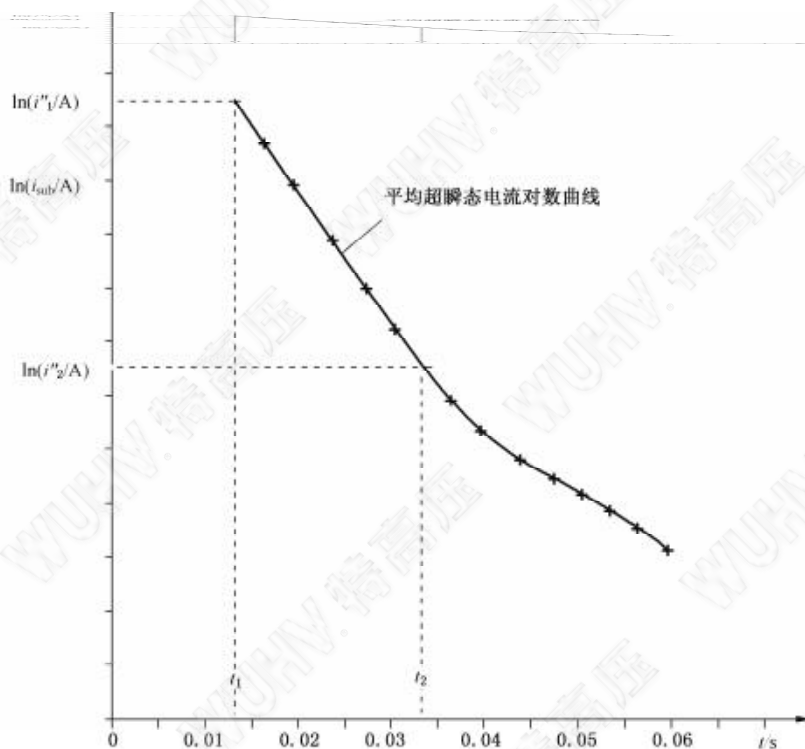


图 35 确定短路电流超瞬态分量

按公式(91)分析确定非周期性分量的最大可能值:

$$i_{a \max} = \frac{2}{\sqrt{3}} \sqrt{i_{a1}^2 + i_{a2}^2 + i_{a1} i_{a2}} \quad \dots\dots\dots (91)$$

式中:

i_{a1}, i_{a2} ——三相中任意两相电流非周期性分量的初始值。

确定非周期性分量初始值的过程中,应带入 i_{a1} 和 i_{a2} 值的符号。

注:当 $i_{a1} + i_{a2} + i_{a3} = 0$ 且电流矢量的相移位分别为 $2\pi/3$ 时此公式有效。

励磁电流的周期性分量随时间变化的曲线由励磁电流记录确定。外推曲线至零时间,得到电流周期性分量的初始值。

若无刷励磁电机的励磁电流无法记录,则电枢短路时间常数宜由电枢非周期性电流分量的衰减曲线来确定。

15.1.3 电压恢复试验

从读数记录上(见 14.12),计算稳态电压与从恢复电压包络线确定的电压间的差值。对恢复电压值包络线的余数作自然对数曲线,并外推到短路开关断开的时刻[见图 36 曲线(1)]。把曲线(1)的直线部分外推至纵坐标轴,得到电压瞬态分量的初始值 $\Delta u'(0)$ 。

曲线(1)确定的电压和电压瞬态分量 $\Delta u'$ 之间的差值得到相应时刻的超瞬变电压 $\Delta u''$ 。

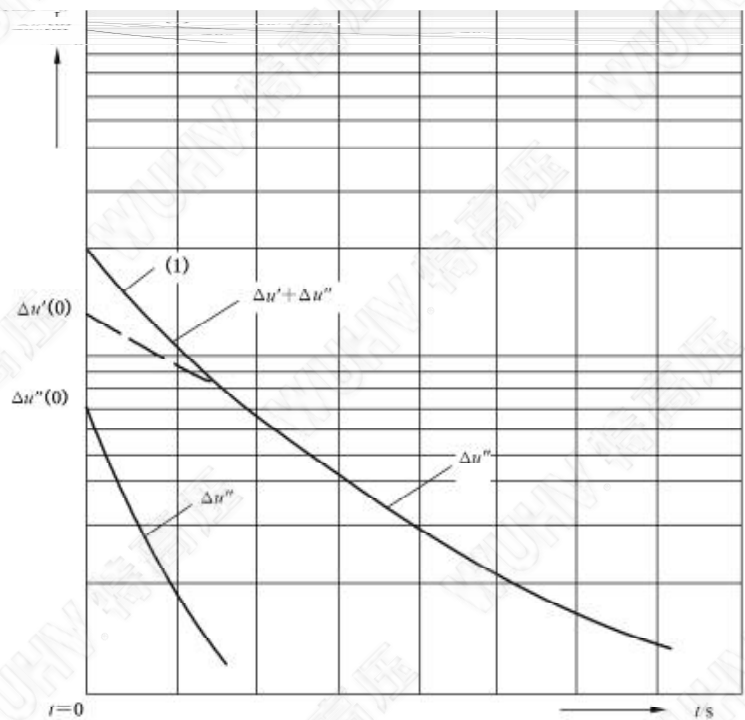


图 36 恢复电压瞬态和超瞬态分量

15.1.4 静态电枢绕组直流衰减

此试验(见 14.14)可在转子处于直轴或交轴位置时进行。电枢绕组中电流值以任意时刻电流 $i(t)$ 与初始电流 $i(0)$ 的比率来衰减。

同样,对于转子处于直轴位置时的试验,励磁绕组中感应电流以衰减中的感应电流和初始感应电流的比率来衰减。将这些衰减中的电流对时间在半对数坐标上作图。

由极限点线性外推求取衰减电流的瞬态、超瞬态初始值和时间常数[见图 37a)]。外推线和纵坐标轴的交叉点即为第一个指数 i_{10} 的初始幅值。其时间常数(τ_1)是最大的,且按 i_{10} 衰减至其初始值的 $1/e \approx 0.368$ 倍所需的时间求取。

再以初始曲线和第一个指数间的差值对时间在半对数坐标上作图,确定第二个指数 i_{20} 的幅值及其时间常数 τ_2 [见图 37b)]。

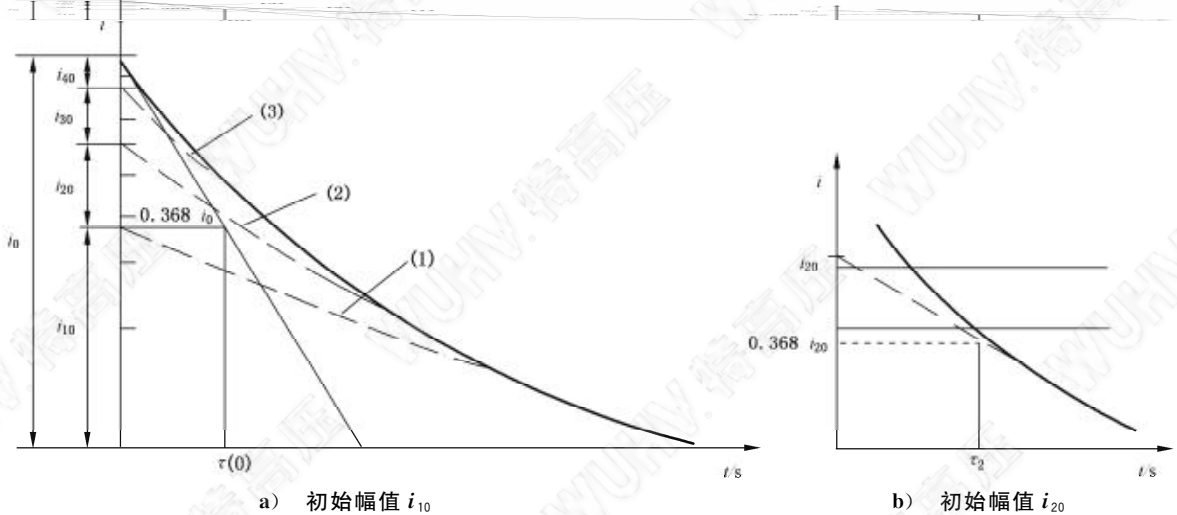


图 37 电流衰减的半对数曲线

以这种方式继续分析曲线,直至无法再求得衰减曲线的非线性的点为止。

考虑到实心转子的时间常数 τ_k 和 τ_{kt} 是一样的,电枢绕组电流衰减和励磁绕组感应电流衰减的分析应在同一试验中同步进行。这样做,可在频率响应特性中,获得更高的准确度。为了在以指数来分析试验数据中得到足够的准确度,应采用合适的计算机程序。

用已知的特性方程 $D_d(p)=0$ 和 $D'_d(p)=0$ (应符合附录 B 的规定) 的根 a_{kd} 和 a'_{kd} 来求取同步电机的直轴时间常数,如公式(92)和公式(93):

$$\tau'_d = \frac{1}{\omega\alpha'_{1d}}; \tau''_d = \frac{1}{\omega\alpha'_{2d}}; \tau'''_d = \frac{1}{\omega\alpha'_{3d}} \quad \dots\dots\dots (92)$$

$$\tau'_{do} = \frac{1}{\omega\alpha_{1d}}; \tau''_{do} = \frac{1}{\omega\alpha_{2d}}; \tau'''_{do} = \frac{1}{\omega\alpha_{3d}} \quad \dots\dots\dots (93)$$

式中: $\omega = 2\pi f$ 。

同样,用已知的特性方程 $D_q(p)=0$ 和 $D'_q(p)=0$ (应符合附录 B 的规定) 的根 a_{kq} 和 a'_{kq} 来求取同步电机的交轴时间常数,如公式(94)和公式(95):

$$\tau'_q = \frac{1}{\omega\alpha'_{1q}}; \tau''_q = \frac{1}{\omega\alpha'_{2q}}; \tau'''_q = \frac{1}{\omega\alpha'_{3q}} \quad \dots\dots\dots (94)$$

$$\tau'_{qo} = \frac{1}{\omega\alpha_{1q}}; \tau''_{qo} = \frac{1}{\omega\alpha_{2q}}; \tau'''_{qo} = \frac{1}{\omega\alpha_{3q}} \quad \dots\dots\dots (95)$$

15.1.5 电枢绕组开路时的突加励磁试验

以稳态电枢电压与由上升中电压包络线确定的电压之间的差值对时间在半对数坐标轴上作图,然后以适当的插值算法外推至励磁机连接开关合闸的时刻(见图 38)。此曲线的直线部分线性外推至纵坐标轴得到瞬态分量的初始值 $\Delta u'(0)$ 。

注:对于大电机,剩磁电压通常可忽略。

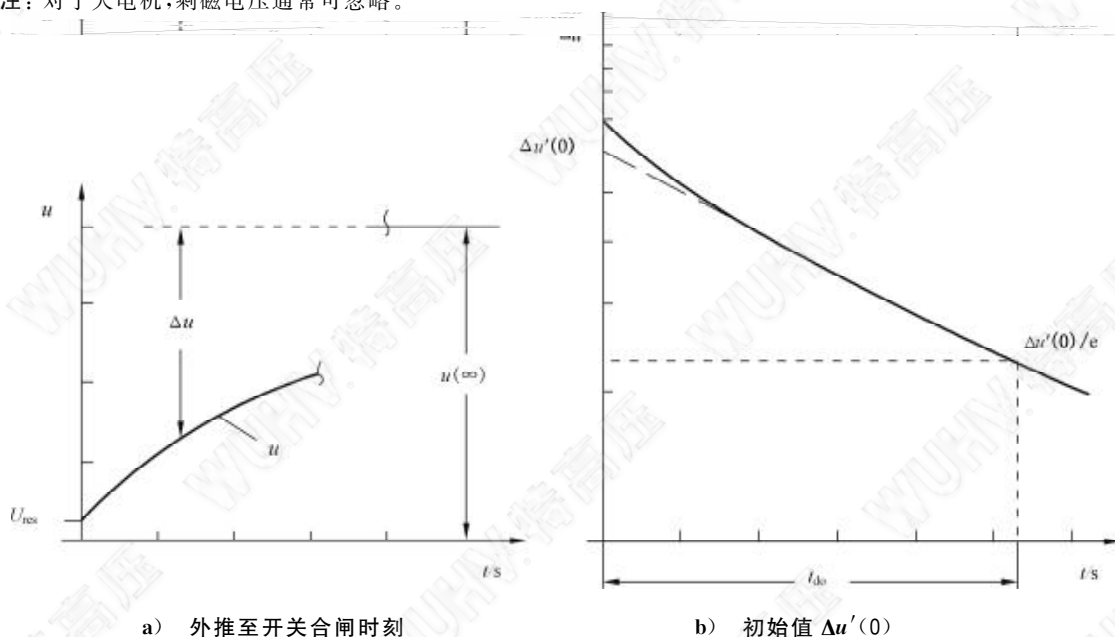


图 38 电枢绕组开路时的突加励磁

15.2 直轴同步电抗

15.2.1 从空载饱和试验与三相稳态短路试验确定

按 15.1.1 绘制的曲线(见图 32)确定 X_d 的不饱和值,按公式(96)确定:

$$X_d = \frac{U_N}{\sqrt{3} I_{BC}}; \left[x_d = \frac{AC}{BC} = \frac{OH}{OC} = \frac{i_{fk}}{i_{fg}} \right] \dots\dots\dots (96)$$

式中:

AC —— 某励磁电流下从气隙线上求取的空载电压;

BC —— 同一励磁电流下从短路特性曲线上求取的稳态短路电流值。

15.2.2 从电动机空载试验确定

按公式(97)确定 X_d 的不饱和值(见图 32):

$$X_d = \frac{U}{\sqrt{3} I}; \left[x_d = \frac{u}{i} \right] \dots\dots\dots (97)$$

其中端电压 U 和电枢绕组电流 I 按 14.6 确定。

15.2.3 从负载试验测量功角确定

从负载试验测量功角确定 X_d 的值,按公式(98)计算:

$$X_d = \frac{E_o / \cos \delta - U}{\sqrt{3} I (\cos \varphi \cdot \tan \delta + \sin \varphi)}; \left[x_d = \frac{e_o / \cos \delta - u}{i (\cos \varphi \cdot \tan \delta + \sin \varphi)} \right] \dots\dots\dots (98)$$

式中:

E_o —— 对应于实际负载下励磁电流时的同步内电势。为确定 E_o , 绘制(与图 32 相同)空载饱和曲线(见 6.4), 从原点经额定电压点画一条直线, E_o 就是横坐标为实际励磁电流时对应于此直线上纵坐标轴的值;

U, I —— 电枢电压和电流;

φ —— 相位角, 由二瓦特计法确定或由 $\cos \varphi = P / (\sqrt{3} UI)$ 计算;

δ —— 测得的功角。

注 1: 公式是以电机两轴模型理论为基础的, 忽略电枢电阻;

注 2: 公式中, 角度值是一个数量且有正负的: 以发电机运行时功角 δ 是正的, 以电动机运行是负的。相位角 φ 在发电机基准系统(the generator reference system)中, 即在零无功负载时, 对于发电机 $\varphi = 0$ ($\cos \varphi = 1$), 对于电动机运行 $\varphi = \pi$ ($\cos \varphi = -1$)。

15.3 直轴瞬态电抗

15.3.1 从三相突然短路试验确定

按公式(99)确定 X_d' 的值:

$$X_d' = \frac{U(0)}{\sqrt{3}} \frac{1}{[I(\infty) + \Delta I_k'(0)]}; \left[x_d' = \frac{u(0)}{i(\infty) + \Delta I_k'(0)} \right] \dots\dots\dots (99)$$

式中:

$U(0)$ —— 空载电压, 在短路前瞬间测得(见 14.11);

$I(\infty), \Delta I_k'$ —— 按 15.1.2 确定。

15.3.2 从电压恢复试验确定

按公式(100)确定 X_d' (不饱和)的值:

$$X_d' = \frac{U(\infty) - \Delta U'(0)}{\sqrt{3} I_k}; \left[x_d' = \frac{u(\infty) - \Delta u'(0)}{i_k} \right] \dots\dots\dots (100)$$

其中输入电压按 15.1.3 从试验数据(见 14.12)分析确定。

15.3.3 从静态电枢绕组直流衰减试验确定

按公式(101)计算:

$$x_d' = \frac{1}{1/x_d + C_{1d}} \quad \dots\dots\dots (101)$$

其中 C_{1d} 应符合附录 B 的规定, x_d 的计算如 15.1.4 所述。

15.3.4 从试验值计算

参数 x_d' 、 x_d 、 τ_{d0}' 和 τ_d' 相互之间的关系可按公式(102)表达:

$$x_d \cdot \tau_d' = x_d' \cdot \tau_{d0}' \quad \dots\dots\dots (102)$$

按此关系从已知 x_d 、 τ_d' 和 τ_{d0}' 的值确定 x_d' 。

15.4 直轴超瞬态电抗

15.4.1 从三相突然短路试验确定

当从突然短路试验确定超瞬态电抗 X_d'' 时,它是短路前瞬间测得的空载电压与从时间函数分析得到的短路电流周期性分量初始值的比(按 15.1.2,见图 33),按公式(103)计算:

$$X_d'' = \frac{U(0)}{\sqrt{3}} \frac{1}{[I(\infty) + \Delta I_k'(0) + \Delta I_k''(0)]}; \left[x_d'' = \frac{u(0)}{i(\infty) + \Delta i_k'(0) + \Delta i_k''(0)} \right] \quad \dots\dots\dots (103)$$

15.4.2 从电压恢复试验确定

当从电压恢复试验确定超瞬态电抗 X_d'' 时,它是稳态电压 $u(\infty)$ 和瞬态电压初始值 $\Delta u'(0)$ 与超瞬态电压初始值 $\Delta u''(0)$ 之和的差对短路切除前瞬间测得的电枢电流(i_k)的比,按公式(104)计算。

$$X_d'' = \frac{U(\infty) - [\Delta U'(0) + \Delta U''(0)]}{\sqrt{3} I_k}; \left[x_d'' = \frac{u(\infty) - [\Delta u'(0) + \Delta u''(0)]}{i_k} \right] \quad \dots\dots\dots (104)$$

其中输入值按 15.1.3 从试验数据(14.12)分析确定。

15.4.3 从转子处于直轴和交轴位置时的外施电压试验确定

当用外施电压试验确定超瞬态电抗 X_d'' 时,按公式(105)计算:

$$X_d'' = \sqrt{Z_d''^2 - R_d''^2} \quad \dots\dots\dots (105)$$

式中, Z_d'' 按公式(106)计算:

$$Z_d'' = \frac{U}{2I}; R_d'' = \frac{P}{2I^2}; \left[x_d'' = \sqrt{z_d''^2 - r_d''^2}; z_d'' = \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot \frac{u}{i}; r_d'' = \frac{3}{2} \cdot \frac{p}{i^2} \right] \quad \dots\dots\dots (106)$$

按 14.15,转子位置处于使励磁绕组中电流为最大时,测得电压 U 、电流 I 和输入功率 P 等各值。

15.4.4 从转子处于任意位置时的外施电压试验确定

从转子处于任意位置时的外施电压试验确定超瞬态电抗 X_d'' ,确定如下:

直轴超瞬态电抗按公式(107)计算(以标么值或物理参数):

$$x_d'' = x_{av} \pm \Delta x \quad \dots\dots\dots (107)$$

式中, x_{av} 和 Δx 按公式(108)计算:

$$x_{av} = \frac{x_{12} + x_{23} + x_{31}}{3}; \Delta x = \frac{2}{3} \sqrt{x_{12}(x_{12} - x_{23}) + x_{23}(x_{23} - x_{31}) + x_{31}(x_{31} - x_{12})} \quad \dots\dots\dots (108)$$

每一对电枢绕组端子间的电抗 x_{12} 、 x_{23} 和 x_{31} 按公式(106)计算(下标“d”根据施加电压的出线端分

别以下标 12、23 和 31 代替)。

若励磁回路中测得的三个电流值中最大的值与测得的最大电枢电抗值相对应,则 Δx 前的符号为正(+);若励磁回路中测得的三个电流值中最大的值与在一对电枢绕组端子间测得的最小电抗值相对应,则 Δx 前的符号为负(-)。

15.5 交轴同步电抗

15.5.1 从反励磁试验确定

从反励磁试验确定交轴电抗 X_q ,按公式(109)计算:

$$x_q = (x_d) \cdot \frac{u_r}{u_r + (e)} \quad \dots\dots\dots (109)$$

式中:

(x_d) ——直轴同步电抗,由同一直线化空载饱和特性确定;

u_r ——滑行一个极距瞬间的电压,见图 39;

(e) ——电机滑动一个磁极距时励磁电流 i_{fr} 所对应的空载电势,由通过滑行一个极距瞬间所对应的电压点作直线化的空载饱和特性来确定。

若试验时测得电机滑行一个极距瞬间的电枢电流 i_r ,则按公式(110)确定 x_q :

$$X_q = \frac{U_r}{\sqrt{3} I_r}; \left[x_q = \frac{u_r}{i_r} \right] \quad \dots\dots\dots (110)$$

取决于 u_r ,由此试验求得 x_q 的值可包括饱和状态。为求得饱和值,施加的电压宜减少至 0.6 倍额定值或者更低。

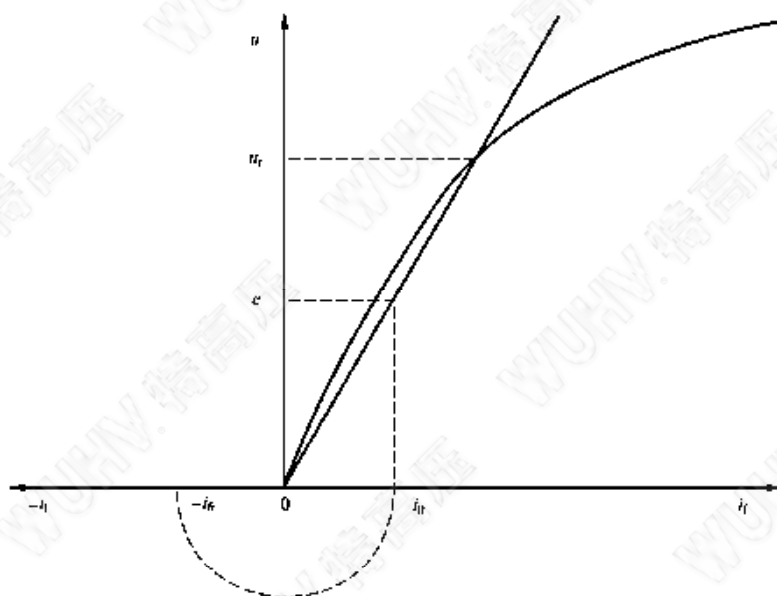


图 39 滑行一个极距时的空载电势和励磁电流

15.5.2 从低转差率试验确定

从低转差率试验(见 14.10)确定交轴电抗 X_q ,在最大励磁绕组电压 U_{fo} 时测得电枢电流和电压, X_q 按公式(111)计算:

$$X_q = \frac{U_{\min}}{\sqrt{3} I_{\max}}; \left[x_q = \frac{u_{\min}}{i_{\max}} \right] \quad \dots\dots\dots (111)$$

如 $I_{\max}$ 与 $U_{\min}$ 不在同一时刻发生,则计算中采用 $I_{\max}$ 及以 $I_{\max}$ 为基点对应的电压。

试验时,若电机的剩磁电压 U_{res} 在试验电源电压的 0.1 倍至 0.3 倍范围内,则电流值按公式(112)确定:

$$I_{\max} = \sqrt{I_{\text{av}}^2 - \left(\frac{U_{\text{res}}}{\sqrt{3}X_d}\right)^2}; \quad i_{\max} = \sqrt{i_{\text{av}}^2 - \left(\frac{u_{\text{res}}}{x_d}\right)^2} \quad \dots\dots\dots (112)$$

式中: I_{av} 是电流包络线相邻两个最大值之和的一半(见图 40)。

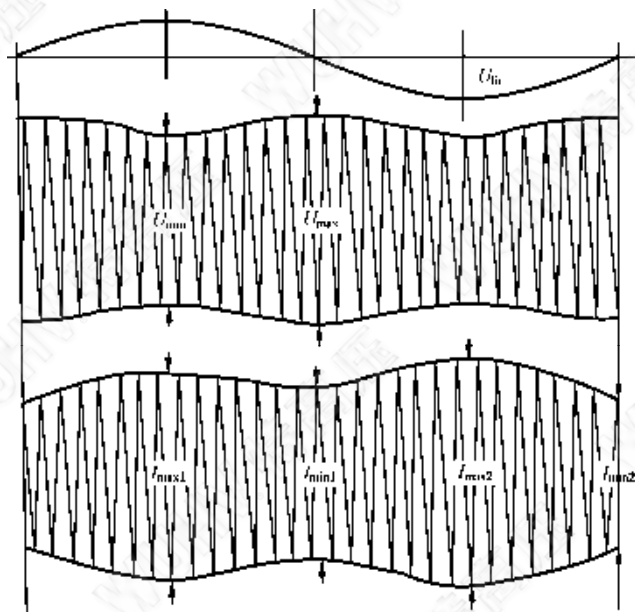


图 40 低转差率试验电流包络线

可对测得的值进行校核,即由同一试验,采用开路励磁绕组电压为零时的电压和电流的测量结果计算 X_d ,并将它与其真实值相比。按公式(113)计算:

$$X_d = \frac{U_{\max}}{\sqrt{3}I_{\min}}; \quad x_d = \frac{u_{\max}}{i_{\min}} \quad \dots\dots\dots (113)$$

当剩磁电压小于试验电源电压的 0.3 倍时, $I_{\min}$ 是电流包络线相邻两个最小值之和的一半。

从低转差率试验确定的 X_q 的结果,只有在此试验下求得的 X_d 值与按 15.2 所得的 X_d 值基本相符时,才可认为是准确的。否则,在若干不同的低转差率值下反复进行此试验,随后用外推法确定零转差率时的 X_q 。从本试验求得的交轴同步电抗值基本上等于其不饱和值。

15.5.3 从负载试验测量功角确定

从负载试验测量功角(见 14.9)确定 X_q 的值,按公式(114)计算:

$$X_q = \frac{U \cdot \tan \delta}{\sqrt{3}I(\cos \varphi - \tan \delta \cdot \sin \varphi)}; \quad x_q = \frac{u \cdot \tan \delta}{i(\cos \varphi - \tan \delta \cdot \sin \varphi)} \quad \dots\dots\dots (114)$$

式中:

U, I ——电枢电压和电流;

φ ——相位角,由二瓦特计法确定或由 $\cos \varphi = P/(\sqrt{3}UI)$ 计算;

δ ——功角,由频闪法测得或任意其他准确的方法测得。

注 1: 公式是以电机两轴模型理论为基础的,忽略电枢电阻;

注 2: 公式中,角度值是一个数量且有正负的:以发电机运行时功角 δ 是正的,以电动机运行是负的。相位角 φ 在发

电机基准系统中,即在零无功负载时,对于发电机 $\varphi=0(\cos\varphi=1)$,对于电动机运行 $\varphi=\pi(\cos\varphi=-1)$ 。

15.6 交轴瞬态电抗

15.6.1 从静态电枢绕组直流衰减试验确定

按公式(115)计算:

$$x_q' = \frac{1}{1/x_q + C_{1q}} \quad \dots\dots\dots(115)$$

其中 C_{1q} 应符合附录 B 的规定, x_q 按 15.1.4 确定。

15.6.2 从试验值计算确定

参数 x_q' 、 x_q 、 τ_{q0}' 和 τ_{q0}' 相互之间的关系可按公式(116)表达:

$$x_q \cdot \tau_{q0}' = x_q' \cdot \tau_{q0} \quad \dots\dots\dots(116)$$

按此关系从已知 x_q 、 τ_{q0}' 和 τ_{q0}' 的值确定 x_q' 。

15.7 交轴超瞬态电抗

15.7.1 从转子处于直轴和交轴位置时的外施电压试验确定

从外施电压试验确定交轴超瞬变电抗 X_q'' 和 15.4.3 所述一样,如公式(117),但是由下标 q 代替下标 d 。

$$X_q'' = \sqrt{Z_q''^2 - R_q''^2} \quad \dots\dots\dots(117)$$

式中 Z_q'' 等按公式(118)计算:

$$Z_q'' = \frac{U}{2I}; R_q'' = \frac{P}{2I^2}; \left[x_q'' = \sqrt{z_q''^2 - r_q''^2}; z_q'' = \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot \frac{u}{i}; r_q'' = \frac{3}{2} \cdot \frac{p}{i^2} \right] \quad \dots\dots\dots(118)$$

按 14.15,转子位置处于使励磁绕组中电流为最小时,测得电压 U 、电流 I 和输入功率 P 等值。

15.7.2 从转子处于任意位置时的外施电压试验确定

从转子处于任意位置时的静态阻抗试验确定超瞬态电抗 X_q'' 的方法与 15.4.4 所述方法一样,但应采用 14.16 的值。

按下列关系确定 Δx 前的符号:

- 若励磁回路中测得的三个电流值中最小的值与测得的最大电枢电抗值相对应,则符号为正(+);
- 若励磁回路中测得的三个电流值中最小的值与测得的最小电抗值相对应,则符号为负(-)。

15.8 零序电抗

15.8.1 从三相绕组外施单相电压试验确定

从三相绕组外施单相电压试验(见 14.17)确定零序电抗和电阻,按公式(119)计算:

$$X_0 = \sqrt{Z_0^2 - R_0^2}; [x_0 = \sqrt{z_0^2 - r_0^2}] \quad \dots\dots\dots(119)$$

式中,根据三相的接法:

——串联时, Z_0 等按公式(120)计算:

$$Z_0 = \frac{U}{3I}; R_0 = \frac{P}{3I^2}; \left[z_0 = \frac{1}{\sqrt{3}} \cdot \frac{u}{i}; r_0 = \frac{p}{i^2} \right] \quad \dots\dots\dots(120)$$

——并联时, Z_0 等按公式(121)计算:

$$Z_0 = \frac{3U}{I}; R_0 = \frac{3P}{I^2}; \left[z_0 = 3\sqrt{3} \cdot \frac{u}{i}; r_0 = \frac{9p}{i^2} \right] \dots\dots\dots (121)$$

15.8.2 从两相对中性点稳态短路试验确定

从两相对中性点稳态短路试验(见 14.22)确定零序电抗 X_0 , 计算如下:

$$X_0 = \frac{U_0}{I_0}; \left[x_0 = \frac{3u_0}{i_0} \right] \dots\dots\dots (122)$$

公式(122)适用于当电压或电流谐波可忽略不计的情况, 或:

$$X_0 = \frac{U_0^2}{Q} \cdot \frac{Q^2}{P^2 + Q^2}; \left[x_0 = \frac{u_0^2}{q} \cdot \frac{q^2}{p^2 + q^2} \right] \dots\dots\dots (123)$$

公式(123)适用于应考虑电压或电流谐波的情况, 此时, U 、 P 和 Q 分别为测得的电压值、有功功率和无功功率。

对几个中性线电流值计算零序电抗。用这些试验数据作 X_0 对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。

15.9 负序电抗

15.9.1 从两相稳态短路试验确定

从两相稳态短路试验确定负序电抗 $X_{(2)}$, 计算如下:

$$X_{(2)} = \frac{P}{\sqrt{3} I_{k2}^2}; \left[x_{(2)} = \sqrt{3} \frac{p}{i_{k2}^2} \right] \dots\dots\dots (124)$$

公式(124)适用于电压或电流谐波可忽略不计的情况, 或:

$$X_{(2)} = \frac{U^2}{P} \cdot \frac{P^2}{P^2 + Q^2} \cdot \frac{1}{\sqrt{3}}; \left[x_{(2)} = \frac{u^2}{p} \cdot \frac{p^2}{p^2 + q^2} \cdot \frac{1}{\sqrt{3}} \right] \dots\dots\dots (125)$$

公式(125)适用于应考虑电压或电流谐波的情况。

对测得的每一个短路电流值计算负序电抗。用这些试验数据作 $X_{(2)}$ 对电流的关系曲线。

注 1: 采用电流基波分量, 若此电流也包含了谐波, 则求得的这个电抗值可能会不同。毕竟, 准确的 X_2 值是由正弦波电流确定的。

注 2: 取电流等于 $\sqrt{3}$ 倍额定相电流时的 $X_{(2)}$ 值作为额定电流时的负序电抗值。

15.9.2 从逆相序试验确定

从 14.20 的逆相序试验确定负序电抗和电阻, 按公式(126)计算:

$$X_{(2)} = \sqrt{Z_{(2)}^2 - R_{(2)}^2}; Z_{(2)} = \frac{U}{\sqrt{3} I}; R_{(2)} = \frac{P}{3I^2}; \left[x_{(2)} = \sqrt{z_{(2)}^2 - r_{(2)}^2}; z_{(2)} = \frac{u}{i}; r_{(2)} = \frac{p}{i^2} \right] \dots\dots\dots (126)$$

式中:

P ——输入功率, 单位为瓦特(W);

I ——所测电流平均值, 单位为安培(A);

U ——所测电压平均值, 单位为伏特(V)。

对测得的每一个电源电压值计算负序电抗和电阻。用这些试验数据作 X_2 和 R_2 对电流的关系曲线。

15.9.3 从试验值计算确定

从已知的试验值 X_d'' (见 15.4)和 X_q'' (见 15.6)按公式(127)计算负序电抗 $X_{(2)}$:

$$X_{(2)} = \frac{x_d'' + x_q''}{2} \dots\dots\dots (127)$$

注：经验表明，对于凸极电机：两极间连接，全阻尼绕组， $x_q''/x_d'' \approx 1 \sim 1.3$ ；仅直轴层叠极阻尼绕组， $x_q''/x_d'' \approx 1.8 \sim 3$ ；实心钢极靴， $x_q''/x_d'' \approx 1.5 \sim 1.8$ 。对于圆柱形实心钢转子电机： $x_q''/x_d'' \approx 1$ 。

15.9.4 从静态直流衰减试验确定

已知频率响应特性 $x_d(jS)$ 和 $x_q(jS)$ ，负序电抗以一虚部来确定，如公式(128)：

$$x_{(2)} = \text{Im} \left\{ \frac{j}{\frac{1}{2} \left[\frac{1}{x_d(jS)_{s=2}} + \frac{1}{x_q(jS)_{s=2}} \right]} \right\} \dots\dots\dots (128)$$

15.10 电枢漏抗

电枢漏抗可用转子移除时在电枢绕组外施三相对称电压的方法来确定。它的测定需要已知一些绕组参数。

从转子移除时的外施电压试验(见 14.22)确定漏抗 X_σ ，按公式(129)计算：

$$X_\sigma = X_a - X_b \dots\dots\dots (129)$$

转子移除时的总漏抗 X_a 按公式(130)确定：

$$X_a = \sqrt{Z^2 - R^2}, Z = \frac{U}{\sqrt{3}I}, R = \frac{P}{3I^2} \dots\dots\dots (130)$$

由于磁通穿过电枢有效面积而导致的电抗 X_b 计算如下(按 14.22 放置探测线圈)，电枢有效面积是由电枢绕组在空腔(平时是转子所处的位置)中产生的：

——对于整数槽绕组，按公式(131)计算：

$$X_b = \frac{U_c}{I} \cdot \frac{Nk_w}{N_c} \dots\dots\dots (131)$$

——对于分数槽绕组，按公式(132)计算：

$$X_b = \frac{U_c}{I} \cdot \frac{Nk_w}{N_c \cdot \sin\left(\frac{q'}{3q} \cdot \frac{\pi}{2}\right)} \dots\dots\dots (132)$$

式中：

U_c ——探测线圈电压，单位为伏特(V)；

I ——电枢电流，单位为安培(A)；

N ——电枢绕组各相电路串联的匝数；

N_c ——探测线圈的匝数；

k_w ——电枢绕组系数；

q ——每极每相的槽数(整数或分数)；

q' ——构成磁极距的最大的整数槽数。

注：本文件提供了一个从电机设计参数计算 X_b 的公式[见公式(133)]，但本试验方法为优选方法。

如不用探测线圈， X_b 可按公式(133)作经验计算：

$$X_b = \frac{3}{20} \cdot \frac{W^2 \cdot k_w^2 \cdot f \cdot L'}{I} \cdot 10^{-6} \dots\dots\dots (133)$$

式中：

f ——电源频率，单位为赫兹(Hz)；

P ——极对数；

L' ——按公式(134)计算确定。

$$L' = L_{Fe} - \frac{n_v b_s}{20} + \frac{\tau}{6} \quad \dots\dots\dots (134)$$

式中:

L_{Fe} —— 定子铁心(包括通风沟)总长,单位为米(m);

n_v —— 定子通风沟数;

n_v —— 通风沟轴向宽度,单位为米(m);

τ —— 极距,单位为米(m)。

15.11 保梯电抗

保梯电抗按图 41 用作图法来确定。

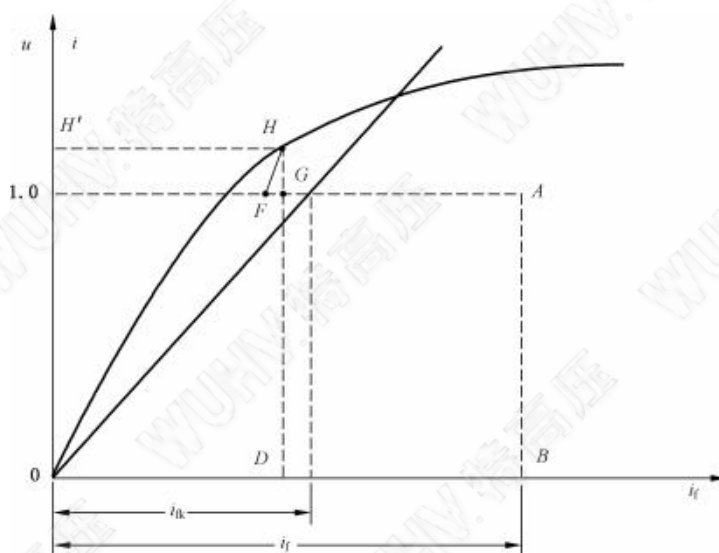


图 41 确定保梯电抗

将空载饱和特性和三相稳态短路特性按 15.1.1 绘制在同一图上。从试验(见 14.26)得到的 i_f , 即在额定电枢电流和零功率因数过励磁时测得的, 取其长度为 OB, 点 A 是此励磁电流和额定电压的交叉点。由 A 点向左平行于横坐标作一直线, 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} 。通过 F 点作一直线平行于空载特性的初始较低部分, 向上与空载特性的上部相交(H 点)。H 点至 G 点(与 AF 线的交点)垂直线的长度即是额定电枢电流在电抗 X_p 上的压降。用标么值表示, $x_p = HG$ 。

15.12 零序电阻

15.12.1 从三相绕组外施单相电压试验确定

按 15.8.1 从试验(见 14.17)一并确定零序电阻 $R_{(0)}$ 、 $Z_{(0)}$ 和 $X_{(0)}$ 。

15.12.2 从两相对中性点稳态短路试验确定

从两相对中性点稳态短路试验, 根据公式(135)用几个中性线电流值计算零序电阻 $R_{(0)}$:

$$R_{(0)} = \frac{U_0^2}{P} \cdot \frac{P^2}{P^2 + Q^2}; \left[r_{(0)} = \frac{u_0^2}{p} \cdot \frac{p^2}{p^2 + q^2} \right] \quad \dots\dots\dots (135)$$

用这些试验数据, 作 $R_{(0)}$ 对中性线电流的关系曲线。

注 1: 需要一些不同的励磁来获得若干个中性线电流值;

注 2: 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。

15.13 正序电枢绕组电阻

从已知的损耗,包括按 7.2 测定的额定电流时电枢绕组的 $P_{cu}=3I^2R_a$ 和附加负载损耗(杂散损耗) P_{LL} ,按公式(136)计算:

$$R_{(1)} = \frac{P_{cu} + P_{LL}}{3I_N^2}; [r_{(1)} = p_{cu} + p_{LL}] \quad \dots\dots\dots (136)$$

$R_{(1)}$ 值对应的温度为测定损耗时的绕组温度。

15.14 负序电阻

15.14.1 从两相稳态短路试验确定

从两相稳态短路试验确定负序电阻 $R_{(2)}$,按公式(137)计算:

$$R_{(2)} = \frac{U^2}{Q} \cdot \frac{Q^2}{P^2 + Q^2} \cdot \frac{1}{\sqrt{3}}; \left[r_{(2)} = \frac{u^2}{q} \cdot \frac{q^2}{p^2 + q^2} \cdot \frac{1}{\sqrt{3}}; \right] \quad \dots\dots\dots (137)$$

对测得的每一个短路电枢电流计算负序电阻。用这些试验数据,作 $R_{(2)}$ 对电流的关系曲线。

注 1: 采用电流基波分量,若此电流也包含了谐波,则求得的这个电阻值可能会不同。

注 2: 取电流等于 $\sqrt{3}$ 倍额定相电流时的 $R_{(2)}$ 值作为额定电流时的负序电阻值。

15.14.2 从逆相序试验确定

从逆相序试验确定负序电抗和负序电阻,按公式(138)计算:

$$X_{(2)} = \sqrt{Z_{(2)}^2 - R_{(2)}^2}; Z_{(2)} = \frac{U}{\sqrt{3}I}; R_{(2)} = \frac{P}{3I^2}; \left[x_{(2)} = \sqrt{z_{(2)}^2 - r_{(2)}^2}; z_{(2)} = \frac{u}{i}; r_{(2)} = \frac{p}{i^2}; \right] \quad \dots\dots\dots (138)$$

式中:

P ——输入功率,单位为瓦特(W);

I ——测得的电流的平均值,单位为安培(A);

U ——测得的电源电压的平均值,单位为伏特(V)。

对测得的每一个电源电压计算负序电抗和负序电阻。用这些试验数据,作 $X_{(2)}$ 和 $R_{(2)}$ 对电流的关系曲线。

15.15 电枢绕组电阻和励磁绕组电阻

采用电压电流表法(见 14.3)时,绕组电阻按公式(139)计算:

$$R_a = \frac{U}{I}; \left[r_a = 3 \cdot \frac{u}{i} \right] \quad \dots\dots\dots (139)$$

式中:

I ——绕组电流,单位为安培(A);

U ——绕组上施加的电压,单位为伏特(V)。

电阻值取平均值。在确定平均值时,宜舍掉与平均值差异超过 $\pm 0.01\%$ 的电阻值。

在每一对电枢绕组线端测量电阻时,1 相的电阻 R_1 计算如下(以物理量表示):

——对星型绕组,按公式(140)计算:

$$R_1 = \frac{R_{12} + R_{31} - R_{23}}{2} \quad \dots\dots\dots (140)$$

——对三角绕组,按公式(141)计算:

$$R_1 = \frac{2R_{12} \cdot R_{23}}{R_{12} + R_{23} - R_{31}} - \frac{R_{12} + R_{23} - R_{31}}{2} \dots\dots\dots (141)$$

其中 R_{12} 、 R_{23} 和 R_{31} 分别是在 1-2、2-3 和 3-1 端子间测得的电阻。

电阻值取平均值。在确定平均值时,宜舍掉与平均值差异超过 $\pm 0.01\%$ 的电阻值。

15.16 直轴瞬态短路时间常数

15.16.1 从三相突然短路试验确定

从三相突然短路试验确定直轴瞬态短路时间常数 τ_d' ,是指电枢电流的渐变分量衰减到其初始值的 $1/e$,即 0.368 倍时所需的时间。

15.16.2 从静态直流衰减试验确定

按 15.1.4 用已知的特性方程 $D_d(p)=0$ 和 $D_d'(p)=0$ 的根来求取直轴时间常数。

15.17 直轴瞬态开路时间常数

15.17.1 由额定转速下电枢绕组开路时的励磁电流衰减试验确定

按 14.21.1 来确定直轴瞬态开路时间常数,是电压衰减到其初始值的 $1/e$,即 0.368 倍时所需的时间。

15.17.2 由静态下电枢绕组开路时的励磁电流衰减试验确定

按 14.21.2 来确定直轴瞬态开路时间常数,是励磁电流衰减到其初始值的 $1/e$,即 0.368 倍时所需的时间。

15.17.3 从电压恢复试验确定

按 14.12 来确定直轴瞬态开路时间常数,是电压衰减到其初始值的 $1/e$,即 0.368 倍时所需的时间。

15.17.4 从静态下直流衰减试验确定

按 15.1.4 用已知的特性方程 $D_d(p)=0$ 和 $D_d'(p)=0$ 的根来求取同步电机的直轴时间常数。

15.18 直轴超瞬态短路时间常数

从三相突然短路试验确定 τ_d'' ,是电枢电流的迅变分量衰减到其初始值的 $1/e$,即 0.368 倍时所需的时间(见 15.1.2)。

15.19 直轴超瞬态开路时间常数

15.19.1 从电压恢复试验确定

从电压恢复试验确定直轴超瞬态开路时间常数,是按 15.1.2 确定的迅变分量 $\Delta U''$ 衰减到其初始值的 $1/e$,即 0.368 倍时所需的时间。

15.19.2 从静态下直流衰减试验确定

按 15.1.4 用已知的特性方程 $D_d(p)=0$ 和 $D_d'(p)=0$ 的根来求取直轴时间常数。

15.20 交轴瞬态短路时间常数

15.20.1 从试验值计算确定

从试验值 x_q 、 x_q' 和 τ_{q0}' 按公式(142)计算确定交轴瞬变短路时间常数:

$$\tau_q' = \tau_{q0}' \cdot \frac{x_q'}{x_q} \dots\dots\dots (142)$$

15.20.2 从静态下直流衰减试验确定

和 15.19.2 一样,按 15.1.4 用已知的特性方程 $D_q(p)=0$ 和 $D_q'(p)=0$ 的根来求取交轴时间常数。

15.21 交轴瞬态开路时间常数

按 15.1.4 用已知的特性方程 $D_q(p)=0$ 和 $D_q'(p)=0$ 的根来求取交轴时间常数。

15.22 交轴超瞬态短路时间常数

15.22.1 从试验值计算确定

从试验值 x_q' (见 15.6.1)、 x_q'' (见 15.7) 和 τ_{q0}'' (见 15.23) 按公式(143)计算确定交轴超瞬态短路时间常数:

$$\tau_q'' = \tau_{q0}'' \cdot \frac{x_q''}{x_q'} \dots\dots\dots (143)$$

15.22.2 从静态下直流衰减试验确定

按 15.1.4 用已知的特性方程 $D_q(p)=0$ 和 $D_q'(p)=0$ 的根来求取交轴时间常数。

15.23 交轴超瞬态开路时间常数

同样按 15.1.4 用已知的特性方程 $D_q(p)=0$ 和 $D_q'(p)=0$ 的根来求取交轴时间常数。

15.24 电枢短路时间常数

15.24.1 从三相突然短路试验确定

电枢短路时间常数 τ_a , 是励磁电流周期性分量衰减到其初始值的 $1/e$, 即 0.368 倍时所需的时间。

注: 对于未使用临时集电环由自带励磁机励磁的无刷励磁电机, 时间常数不宜采用励磁电流周期性分量衰减的方法来确定。

另一种方法是以每一相电枢电流的非周期性分量的衰减来确定时间常数, 取各相的这些分量衰减到其初始值的 $1/e$, 即 0.368 倍时所需的时间的平均值作为时间常数。在确定电枢短路时间常数中, 若某相的非周期性分量初始值小于求得的最大初始值的 40%, 则宜舍掉。

若在突然短路试验中电枢电流是以无感分流器测量的, 则允许采用电枢电流非周期性分量的衰减来确定电枢短路时间常数。

15.24.2 从试验值计算确定

额定频率 f_N 时的电枢短路时间常数, 由已知的试验值 $X_{(2)}$ (见 15.9) 和 R_a (见 15.15) 按公式(144)计算确定:

$$\tau_a = \frac{x_{(2)}}{2\pi \cdot f_N \cdot r_a} \dots\dots\dots (144)$$

式中, $x_{(2)}$ 用饱和值。

15.25 额定加速时间和储能常数

从空载自减速试验(见 14.23)确定电机加速时间和储能常数时,按公式(145)计算:

$$\tau_j = \omega_N \frac{\Delta t}{\Delta \omega} \cdot \frac{P_{\text{mech}} + P_{\text{Fe}}}{P_N}; H = \frac{\omega_N}{2} \cdot \frac{\Delta t}{\Delta \omega} \cdot \frac{P_{\text{mech}} + P_{\text{Fe}}}{S_N} \dots\dots\dots (145)$$

式中:

P_{mech} ——额定转速时的机械损耗,单位为千瓦(kW);

P_{Fe} ——额定转速和对应于试验电压值的铁心损耗,单位为千瓦(kW);

ω_N ——额定角速度,单位为弧度每秒(rad/s);

S_N ——额定视在功率,单位为千伏安(kV·A)。

15.26 额定励磁电流

15.26.1 直接测定

额定励磁电流 I_{IN} 是电机运行在额定电压、额定电流、额定功率因数和额定转速时励磁绕组中的电流。

在额定工况(见 14.2)运行过程中直接测量确定额定励磁电流。

15.26.2 保梯图

用保梯图确定额定励磁电流,应用到空载饱和特性(见 14.4.2)、稳态短路特性(见 14.5.2)和保梯电抗 X_p 。

以额定电枢电流向量 i_N 沿横坐标展开作为基准,用测得的功率因数角 φ_N (对过励发电机取正)为角度作出额定电压的向量 u_N (见图 42)。

由电压向量终端作一额定电枢电流时保梯电抗压降向量 ($x_p i_N$) 与电枢电流向量相垂直。通常电枢绕组电阻的压降忽略不计。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。

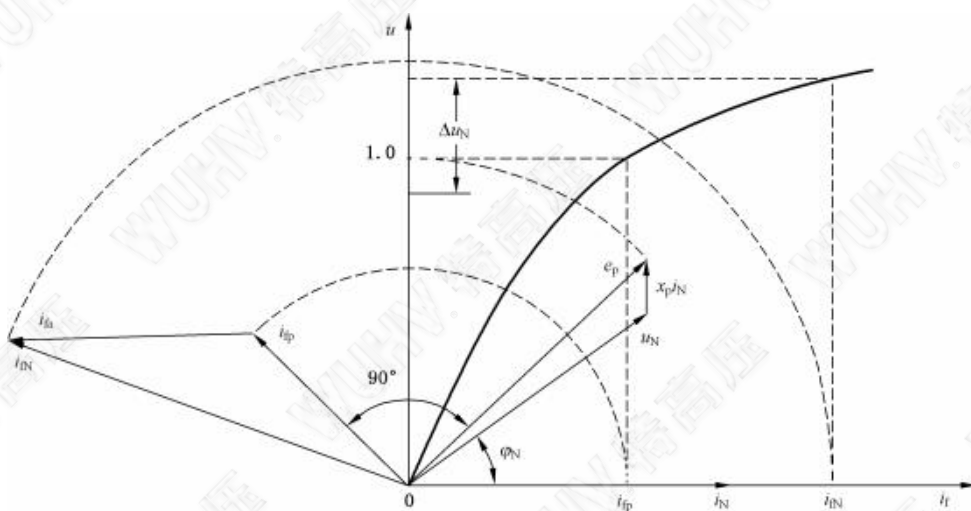


图 42 保梯图

对于发电机该向量宜如图(见图 42)中所示与电枢电流向量同向,对于电动机则方向相反。

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；从空载曲线上求得对应于此电势的励磁电流 i_{fp} ，并由原点与电势 e_p 向量呈 90° 角作 i_{fp} 向量。

在额定电枢电流时补偿电枢反应的励磁电流分量 i_{fa} ，等于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时的 X_p 压降的励磁电流之间的差（见图 41）。由 i_{fp} 向量终端与电枢电流向量平行作 i_{fa} 向量。额定励磁电流 i_{fN} 即等于 i_{fa} 与 i_{fp} 的向量和。

若从保梯图（或从 ASA 图和瑞典图）求取励磁电流值仅是用于估算励磁电流的额定值，那么，若保梯电抗 X_p 未知，对于额定频率低于 100 Hz 的电机则可在作图 42 时以 ax_a 代替 X_p ，其中 x_a 为转子移除时测得的电枢电抗， a 为系数，对凸极电机取 1.0，而隐极电机取 0.6 或 0.65（除非相同结构的电机有更准确的经验数据）。若从保梯图（或从 ASA 图和瑞典图）求取励磁电流值是用于在零功率因数负载试验中确定励磁绕组温升，则宜从空载特性和三相稳态特性及零功率因数时对应额定电压和额定电枢电流的励磁电流来确定保梯电抗。

转子移除试验（见 14.22）是在电枢绕组端子上外施额定频率的三相电压。选择电源电压使得电枢电流接近额定值。试验中，测量端电压 U 、线电流 I 和输入有功功率 P 。

15.26.3 ASA 图

用 ASA 向量图确定额定励磁电流，应用到空载饱和特性（见 14.4.2）、稳态短路特性（见 14.5.2）和保梯电抗 X_p 。

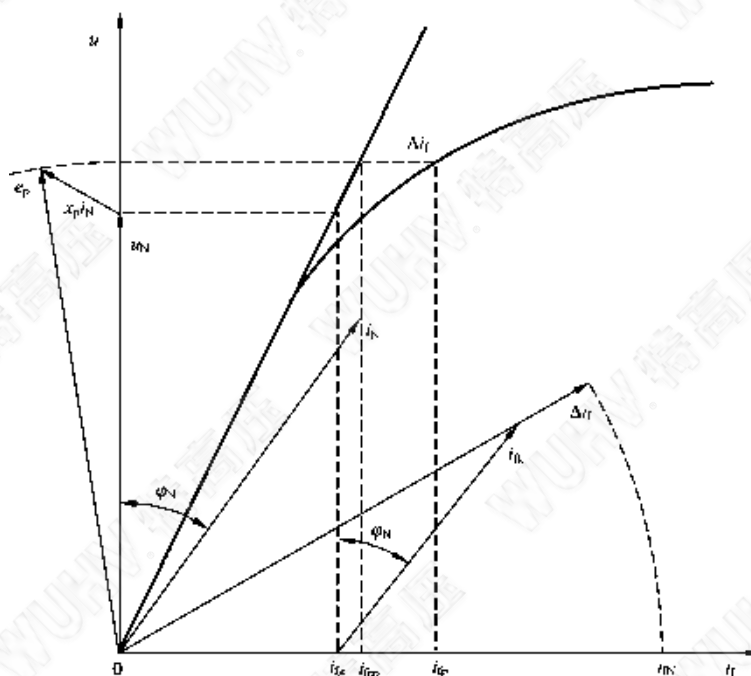


图 43 ASA 图

按 15.1.1 确定电势 e_p 。从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} 。由原点沿横坐标作电流 i_{fg} 向量。从其终端与垂直线向右呈额定功率因数角 φ_N （对过励发电机取正）作在三相稳态短路特性上对应额定电枢电流的励磁电流 i_{fk} （见 15.1.1）向量。

Δi_f 为空载饱和特性上对应电压 e_p （见图 43）的励磁电流 i_{fp} 和气隙线上对应同一电压 e_p 的励磁电流 i_{fcp} 的差，沿这些励磁电流（ i_{fg} 、 i_{fk} ）几何向量和的方向作 Δi_f 向量，这三个向量的和即等于额定励磁电流。

额定励磁电流也可用公式（146）计算确定（按标么值或物理值）：

$$i_{\text{IN}} = \Delta i_{\text{f}} + \sqrt{(i_{\text{fg}} + i_{\text{fk}} \sin \varphi_{\text{N}})^2 + (i_{\text{fk}} \cos \varphi_{\text{N}})^2} \quad \dots\dots\dots (146)$$

若保梯电抗未知且 ASA 图仅(无零功率因数负载试验)是用来估算励磁电流额定值,则在作图 43 时可用 αx_{a} (见 15.26.2)来代替。

15.26.4 瑞典图

用瑞典图确定额定励磁电流,应用到空载饱和特性(见 14.4.2)、三相稳态短路特性(见 14.5.2)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(见 14.7)。

在横坐标轴上量取三个励磁电流值(见图 44):

OD——空载特性上对应额定电压的励磁电流;

OB——对应零功率因数时额定电压和电枢电流的励磁电流;

OC——稳态短路特性上对应额定电枢电流的励磁电流。

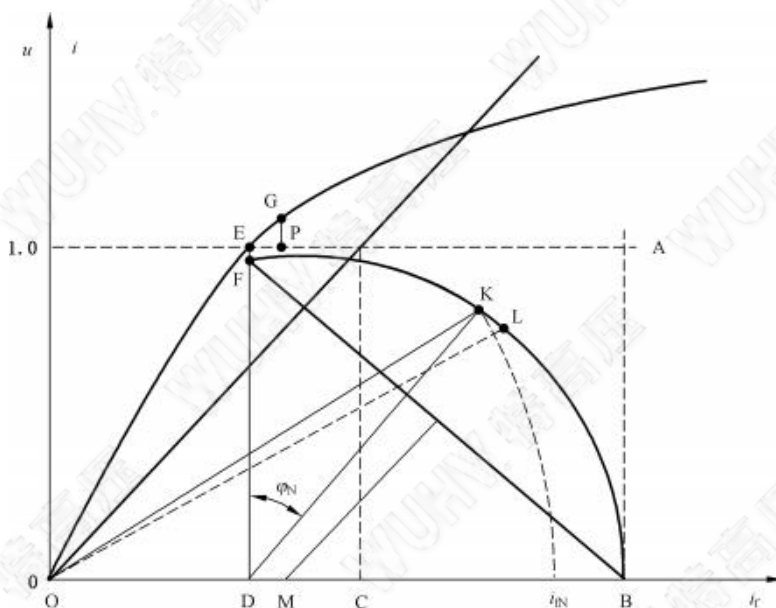


图 44 瑞典图

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

由 D 点作一与 FD 呈功率因数角 φ_{N} (对过励发电机取正) 的直线, 与 FB 弧相交于 K 点。OK 的长度即等于该电机的额定励磁电流。

必要时, 可按下列方法确定电枢电阻压降的影响。沿 FKB 圆弧量取 KL, 使其长度等于 EP。EP 为空载电压增加 PG 所需的励磁电流分量。PG 为额定电流下正序电枢电阻压降。则 OL 的长度即等于所求的励磁电流。当电机作为电动机运行时, 正序电枢电阻压降由 E 向下量取, L 点在 K 点的左侧量取。

若没有零功率因数下额定电压和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 αx_{a} 压降(见 15.26.2)加在额定电枢电压上(见图 41 的 H' 点)。

由 H' 点作一平行于横坐标轴直线, 与空载特性交于 H 点。由此点, 向横坐标轴作垂线交于 D 点(见图 41)。D 点向右, 沿横坐标轴加上 i_{fa} 向量(长度为 DB)。励磁电流等于 OB 的长度, 就是作瑞典图时所用到的电流。

15.27 额定电枢稳态短路电流对应的励磁电流

15.27.1 从三相稳态短路试验确定

从 14.5 试验,如图 32 所示绘制短路曲线来确定额定电枢短路电流时的励磁电流。

15.27.2 从零功率因数过励试验确定

在额定电枢电流 i_N 下进行 14.26 试验,将试验点以电压对励磁电流的关系作图,见图 45。绘制成一条曲线即是零功率因数曲线的上半部分。将空载饱和曲线(见 15.1.1)也绘制在同一图中。然后将零功率因数曲线平行于空载曲线外推直至相交于横坐标轴。OD 的长度即为对应额定电枢稳态短路电流时的励磁电流 i_{fk} 。在零功率因数曲线上取对应额定电压的 A 点,横坐标轴上 OB 的长度等于零功率因数过励下额定电压和额定电流时的励磁电流。

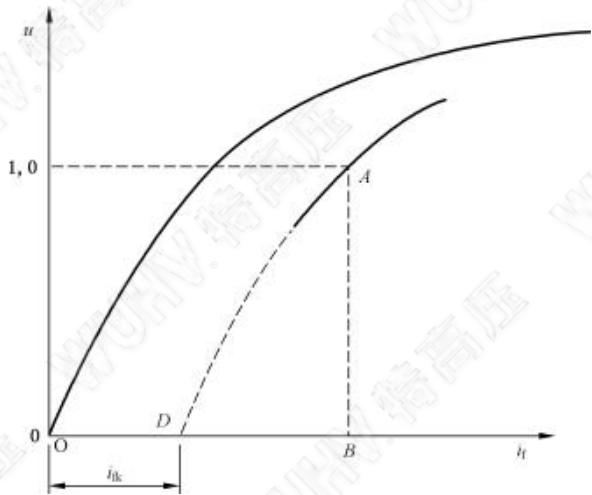


图 45 从零功率因数过励试验确定励磁电流

15.28 频率响应特性

15.28.1 概述

频率响应特性是帕克同步电机方程的专用传递函数。这些传递函数可用于同步电机的瞬态现象的研究,对实心转子电机尤为重要。

对于静态下的电机,传递函数可按公式(147)和公式(148)表达:

$$u_d(p) = [r + px_d(p)] \cdot i_d(p) + G(p) \cdot i_f(p) \quad \dots\dots\dots (147)$$

$$u_q(p) = [r + px_q(p)] \cdot i_q(p) \quad \dots\dots\dots (148)$$

式中:

- p ——拉普拉斯算子;
- $i_d(p)$ 、 $i_q(p)$ 、 $i_f(p)$ ——电枢电流的直轴和交轴分量、励磁电流,单位为安培(A);
- $x_d(p)$ 、 $x_q(p)$ ——直轴电抗因子和交轴电抗因子;
- $G(p)$ ——传递因子。

注: $f(t)$ 拉普拉斯变换式定义为公式(149):

$$F(p) = \int_0^\infty f(t)e^{-pt} dt \quad \dots\dots\dots (149)$$

频率响应特性 $1/x(js)$ 和 $G(js)$ 是 $p=js$ 时的复数表达式。

15.28.2 从降低电压同步运行试验确定

在每个转速(转差率)点按公式(150)、公式(151)和公式(152)计算阻抗、电阻和电抗:

$$Z(s) = \frac{U_{av}}{\sqrt{3} I_{av}}; \left[z(s) = \frac{u_{av}}{i_{av}} \right] \dots\dots\dots (150)$$

$$R(s) = \frac{P_{av}}{\sqrt{3} I_{av}^2}; \left[r(s) = \frac{p_{av}}{i_{av}^2} \right] \dots\dots\dots (151)$$

$$X(s) = \sqrt{Z^2(s) - R^2(s)}; \left[x(s) = \sqrt{z^2(s) - r^2(s)} \right] \dots\dots\dots (152)$$

然后,以求得的值对转差率作曲线从而得到在低频率时的频率响应特性。

注1: 由于施加的电压低,铁心损耗忽略不计,而且得到的电抗是不饱和值。

注2: 求得的电抗约相当于静止时不饱和超瞬态电抗和的一半加上零转差率时同步电抗和的一半。

对每个转差率下的阻抗的平均值按图 46 作图。宜在同一图上作功率因数对转差率的曲线。

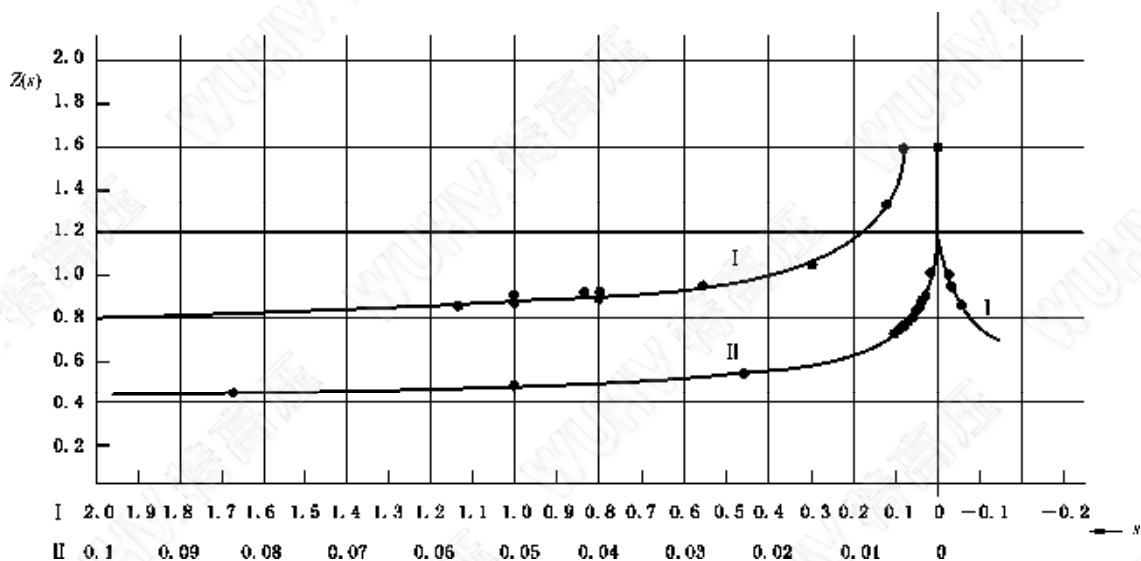


图 46 低频时的频率响应特性(示例)

15.28.3 从静态下外施可调频率电压试验确定

分别在直轴和交轴求取每个频率下的参数。该公式对应直轴和交轴,因此下述计算中仅对一个轴。已由记录求得某一试验频率 f_t 下的 U 和 I 以及它们各相的差异(见 14.27),则静态下的回路阻抗按公式(153)确定:

$$Z_{\text{stat}}(js) = \frac{U(js)}{I(js)} \cdot K_{\text{con}} \dots\dots\dots (153)$$

式中:

$Z_{\text{stat}}(js)$ ——外施的各频率电压时电机沿交轴和直轴位置的稳态阻抗,单位为欧姆(Ω);

$U(js)$ ——外施频率为 f_t 的电压,以转差率表示 $s = f_t/f_N$,单位为伏特(V);

$I(js)$ ——测得的电流,单位为安培(A);

K_{con} ——基于电枢绕组连接方式的因子。若端子外施电压时第三端子开路,则 $K_{\text{con}} = 1/2$;若两相并行连接并与第三相串接,则 $K_{\text{con}} = 2/3$ 。

对于外施额定频率电压以转差率 s 运行的电机,其阻抗按公式(154)计算确定:

$$Z(js) = \frac{Z_{\text{stat}}(js) - R_{1s}}{s} + R_1 \quad \dots\dots\dots (154)$$

式中:

$Z_{\text{stat}}(js)$ ——如上;

R_{1s} ——外施电压和频率时的交流电枢绕组电阻。可从频率对应于 s 时的移除转子试验确定,或者按公式(155)计算:

$$R_{1s} \approx R_s \left\{ 1 + \left[R_1 - R_a \left(\frac{f}{f_N} \right)^2 \right] \right\} \quad \dots\dots\dots (155)$$

注:转差率值为 0.25 及以下时, $R_{1s} \approx R_a$, 其误差在 5% 以内。

电机的导纳可用 $Z(js)$ 值的倒数确定,按公式(156)计算:

$$Y(js) = \frac{1}{Z(js)} \quad \dots\dots\dots (156)$$

用由数据记录或其他合适的设备求得的电压和电流间的角度 φ , 对应以某一转差率运行的电机的电抗和电阻的值按公式(157)和公式(158)计算:

$$X(js) = \text{im}[Z_{\text{stat}}(js)] \frac{|Z_{\text{stat}}(js)| \sin \varphi}{s} \quad \dots\dots\dots (157)$$

$$R(js) = \text{Re}[Z_{\text{stat}}(js)] + R_1 = \frac{|Z_{\text{stat}}(js)| \cos \varphi - P_{1s}}{s} + R_1 \quad \dots\dots\dots (158)$$

由此试验求得的各值是不饱和参数。

电机的频率响应即为求得的每一轴的参数的转差率函数曲线。

利用频率响应特性可求得同步电机的各参数(电抗、电阻和时间常数)。转差率为 1 时的电抗和电阻约等于超瞬态值。电抗和电阻外推至零转差率则得到同步时的值。

15.28.4 从静态下电枢绕组的直流衰减试验确定

以下各特性均以标么值表示。按 15.1.4 从 14.15 试验求得的各值:

- $i(t)$ ——电枢绕组试验电流(或是试验曲线和稳态值的差值)与此电流初始值的比;
- $i_f(t)$ ——衰减中的励磁绕组电流标么值;
- i_0 ——以标么值表示的电枢绕组直轴或交轴电流的初始值;
- r ——电枢绕组回路相电阻标么值公式(159)确定。

$$r = r_a + K_{\text{con}} \Delta r \quad \dots\dots\dots (159)$$

式中:

r_a ——电枢绕组直流电阻标么值;

Δr ——附加(外部的)电枢回路电阻标么值;

K_{con} ——基于电枢绕组连接方式的因子。若端子外施电压时第三端子开路,则 $K_{\text{con}} = 1/2$; 若两相并行连接并与第三相串接,则 $K_{\text{con}} = 2/3$ 。

频率响应函数的实际计算,应符合附录 B 的规定。

应将参数 X_d 、 X_d'' 、 X_q 和 X_q'' 与用本文件给出的方法求得的各值进行核验,且频率响应特性应进行相应修正。若差异大于 10%, 直流衰减应重复进行,以便与实际频率响应特性更接近一致。

15.29 短路比

从空载饱和特性和三相稳态短路特性确定短路比 K_c , 取空载饱和曲线上对应额定电压时的励磁电流与短路特性曲线上对应额定电流时的励磁电流之比(见图 32), 按公式(160)计算:

$$K_c = \frac{OD}{OH} = \frac{i_{f0}}{i_{fk}} \dots\dots\dots (160)$$

15.30 额定电压调整率

15.30.1 直接测定

从直接测量来确定额定电压调整率见 14.2。

15.30.2 从空载饱和特性和已知的额定负载时的励磁电流来确定

从空载特性(见 14.4)和按 15.26 求得的额定励磁电流 I_{fN} 用作图法来确定额定电压调整率 ΔU_N 。

直接测量法为优选方法。当被试电机进行零功率因数负载时采用作图法。当在额定工况运行过程中采用直接测量法确定额定励磁电流时,被试电机应以其自带的自动调节系统来励磁,因为当电机用自动系统励磁时的励磁电流可能与采用他励励磁(尤其是带静态励磁系统的电机)时的励磁电流存在差异。

15.31 同步电动机初始起动阻抗

初始起动阻抗可从电机堵转试验(见 14.24)按公式(161)确定:

$$Z_{st} = \frac{U}{\sqrt{3} I_{av}}; \left[z_{st} = \frac{u}{i_{av}} \right] \dots\dots\dots (161)$$

式中:

U ——外施的线电压;

I_{av} ——试验中测得的稳定状态三相线电流的平均值。

若试验是在几个降低的电压下进行的,则对每个电压计算初始起动阻抗的值,且额定电压时的值可在 Z_{st} 对所施电压的关系曲线上外推初始起动转矩至额定电压来确定。

若测得了输入功率,则初始起动电阻和电抗分别按公式(162)和公式(163)确定:

$$R_{st} = \frac{P}{3 I_{av}^2}; \left[r_{st} = \frac{p}{i_{av}^2} \right] \dots\dots\dots (162)$$

$$X_{st} = \sqrt{Z_{st}^2 - R_{st}^2}; \left[x_{st} = \sqrt{z_{st}^2 - r_{st}^2} \right] \dots\dots\dots (163)$$

附录 A
(规范性)

空载短路法求取励磁绕组温升时的 $\Delta\theta$ 值

$\Delta\theta$ 值可近似按公式(A.1)计算：

$$\Delta\theta = \frac{\Delta\theta_i (40 - \theta_c)}{k + \Delta\theta_i + \theta_c} \dots\dots\dots (A.1)$$

式中：

- $\Delta\theta_i$ —— 试验时测得的励磁绕组的温升，单位为开尔文(K)；
- θ_c —— 对应于 $\Delta\theta_i$ 时的冷却介质温度，单位为摄氏度(℃)；
- k —— 见公式(51)，铜绕组取 235，对铝绕组则为 225。

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

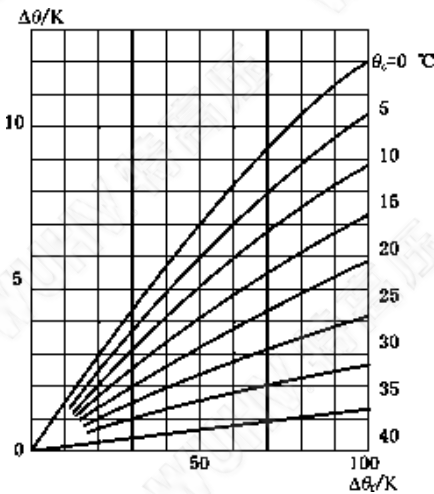


图 A.1 励磁绕组(铜)温升近似值

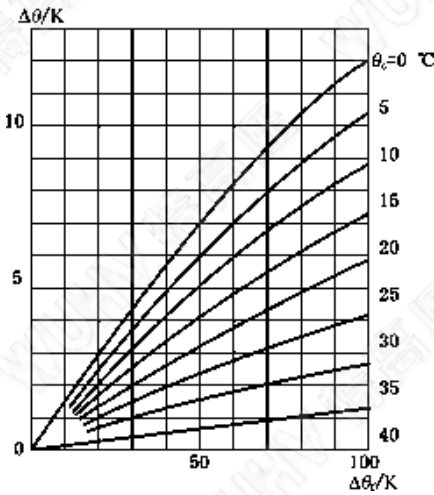


图 A.2 励磁绕组(铝)温升近似值

附录 B

(规范性)

频率响应特性计算方案

B.1 基础

从试验得到的函数 $f(t)$ 近似为指数函数的和。设 $f(t)$ 为一个短路电流函数 $i_k(t)$ ，由初始值 i_{k0} 和指数 α_k 为特征的 n 个分量组成，如公式(B.1)：

$$i_k(t) = i_{k0} \cdot e^{\alpha_k t}; k=1 \cdots n \quad \text{.....(B.1)}$$

函数中， α_k 为实数，且对应时间常数 $\tau_k = -1/\alpha_k$ 。

相关拉普拉斯变换如公式(B.2)：

$$i_k(p) = \frac{i_{k0}}{p + \alpha_k} \quad \text{.....(B.2)}$$

电流时间函数和该电流拉普拉斯变换如公式(B.3)：

$$i(t) = \sum_{k=1}^n i_k(t); \rightarrow i(p) = \sum_{k=1}^n \frac{i_{k0}}{p + \alpha_k} \quad \text{.....(B.3)}$$

电流函数可能包含一常数分量，这种情况下 $\alpha_k = 0$ 。拉普拉斯变换可表达为 p 的多项式函数。

B.2 参数计算

从 14.14 和 15.1.4 所述过程求得电流 $i(t)$ 和 $i_f(t)$ ，且它们表现为指数函数，故电抗和传递因子按公式(B.4)、公式(B.5)和公式(B.6)计算如下：

$$\frac{1}{x_d(p)} = \frac{1}{x_d''} \frac{D_d(p)}{D_d'(p)} = \frac{1}{x_d''} \frac{(\alpha_{1d} + p)(\alpha_{2d} + p) \cdots (\alpha_{nd} + p)}{(\alpha'_{1d} + p)(\alpha'_{2d} + p) \cdots (\alpha'_{nd} + p)} \quad \text{.....(B.4)}$$

$$\frac{1}{x_q(p)} = \frac{1}{x_q''} \frac{D_q(p)}{D_q'(p)} = \frac{1}{x_q''} \frac{(\alpha_{1q} + p)(\alpha_{2q} + p) \cdots (\alpha_{nq} + p)}{(\alpha'_{1q} + p)(\alpha'_{2q} + p) \cdots (\alpha'_{nq} + p)} \quad \text{.....(B.5)}$$

$$G(p) = N \frac{A(p)}{D_d(p)} = N \frac{(\gamma_1 + p)(\gamma_2 + p) \cdots (\gamma_{n-1} + p)}{(\alpha_{1d} + p)(\alpha_{2d} + p) \cdots (\alpha_{nd} + p)} \quad \text{.....(B.6)}$$

设 $p = js$ 时，即得到频率响应特性 $1/x_d(js)$ 、 $1/x_q(js)$ 和 $G(js)$ 。

计算特性方程 $D_d(p) = 0$ 、 $D_d'(p) = 0$ 、 $D_q(p) = 0$ 、 $D_q'(p) = 0$ 和 $A(p) = 0$ 的根求得各参量。也可按 15.1.4 利用 i_{k0} 的幅值和电流衰减曲线的指数衰减因子 λ_k 来确定：

—— $D_d(p) = 0$ 的根 $-\alpha_1$ 、 $-\alpha_2$ 、 $\cdots$ 、 $-\alpha_n$ 是公式(B.7)的根：

$$\sum_{k=1}^n \frac{i_k \lambda_k}{p + \lambda_k} = 0 \quad \text{.....(B.7)}$$

—— $D_d'(p) = 0$ 的根 $-\alpha'_1$ 、 $-\alpha'_2$ 、 $\cdots$ 、 $-\alpha'_n$ 是公式(B.8)的根：

$$\sum_{k=1}^n \frac{i_k}{p + \lambda_k} = 0 \quad \text{.....(B.8)}$$

—— $A(p) = 0$ 的根 $-\gamma_1$ 、 $-\gamma_2$ 、 $\cdots$ 、 $-\gamma_n$ 是公式(B.9)的根：

$$\sum_{k=1}^n \frac{i_{kf}}{p + \lambda_{kf}} = 0 \quad \text{.....(B.9)}$$

利用已知的特性方程的根的值，频率响应特性按公式(B.10)、公式(B.11)和公式(B.12)计算如下：

$$\frac{1}{X_d(js)} = \frac{1}{X_d} + \sum_{k=1}^n \left[\frac{C_{kd}}{1 + \left(\frac{\alpha'_{kd}}{s}\right)^2} + j \frac{C_{kd} \left(\frac{\alpha'_{kd}}{s}\right)}{1 + \left(\frac{\alpha'_{kd}}{s}\right)^2} \right] \quad \text{.....(B.10)}$$

$$\frac{1}{X_q(js)} = \frac{1}{X_q} + \sum_{l=1}^m \left[\frac{C_{lq}}{1 + \left(\frac{\alpha'_{lq}}{s}\right)^2} + j \frac{C_{lq} \left(\frac{\alpha'_{lq}}{s}\right)}{1 + \left(\frac{\alpha'_{lq}}{s}\right)^2} \right] \dots\dots\dots (B.11)$$

$$G(js) = \sum_{k=1}^n \left[\frac{A_k \alpha_{kd}}{\alpha_{kd}^2 + s^2} - j \frac{A_k s}{\alpha_{kd}^2 + s^2} \right] \dots\dots\dots (B.12)$$

式中：

$$C_{kd} = \frac{1}{X_d''} \frac{(\alpha_{1d} - \alpha'_{kd})(\alpha_{2d} - \alpha'_{kd}) \dots (\alpha_{nd} - \alpha'_{kd})}{(\alpha_{1d} - \alpha'_{kd}) \dots (\alpha'_{k-1,d} - \alpha'_{kd})(\alpha'_{k+1,d} - \alpha'_{kd}) \dots (\alpha_{nd} - \alpha'_{kd})} \dots\dots\dots (B.13)$$

$$C_{lq} = \frac{1}{X_q''} \frac{(\alpha_{1q} - \alpha'_{lq})(\alpha_{2q} - \alpha'_{lq}) \dots (\alpha_{mq} - \alpha'_{lq})}{(\alpha_{1q} - \alpha'_{lq}) \dots (\alpha'_{l-1,q} - \alpha'_{lq})(\alpha'_{l+1,q} - \alpha'_{lq}) \dots (\alpha_{mq} - \alpha'_{lq})} \dots\dots\dots (B.14)$$

$$A_k = N \frac{(\gamma_1 - \alpha_{kd})(\gamma_{n-1} - \alpha_{kd})}{(\alpha_{1d} - \alpha_{kd}) \dots (\alpha_{k-1,d} - \alpha_{kd})(\alpha_{k+1,d} - \alpha_{kd}) \dots (\alpha_{nd} - \alpha_{kd})} \dots\dots\dots (B.15)$$

公式(B.15)中的 N 按公式(B.16)计算：

$$N = \frac{\alpha_{1d} \alpha_{2d} \dots \alpha_{nd}}{\gamma_1 \gamma_1 \dots \gamma_{n-1}} \frac{\sum_{k=1}^{n+1} (i_{kf} / \lambda_{kf})}{i_{od}} \dots\dots\dots (B.16)$$

注意：

$$X_d = r \sum_{k=1}^{n+1} \frac{i_{kd}}{\lambda_{kd}}$$

$$X_q = r \sum_{l=1}^{m+1} \frac{i_{lq}}{\lambda_{lq}}$$

$$X_d'' = \frac{r}{\sum_{k=1}^{n+1} i_{kd} \lambda_{kd}}$$

$$X_q'' = \frac{r}{\sum_{l=1}^{m+1} i_{lq} \lambda_{lq}}$$

式中：

r 按 15.28.4 确定。

附 录 C
(规范性)
常用电机模型

以帕克方程为基础,电机可用直、交轴分量的等值电路模型来表示。图 C.1 是凸极电机的模型,每个轴上包含一个阻尼网;它考虑了励磁漏磁耦合和直轴阻尼绕组。

注 1: 图 C.1 模型以电动机基准系统绘制。

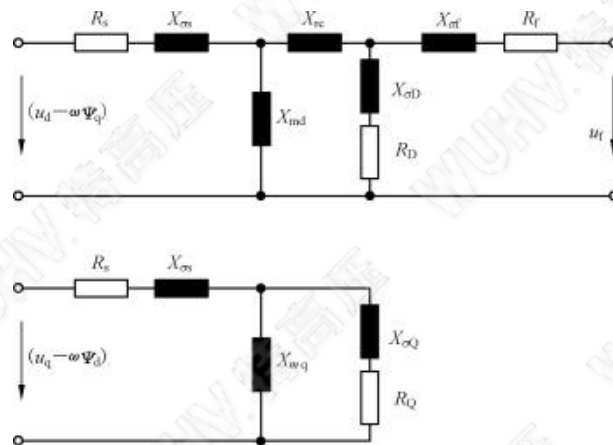


图 C.1 凸极电机的等值电路模型

磁链定义见公式(C.1):

$$\begin{bmatrix} \omega \Psi_d \\ \omega \Psi_D \\ \omega \Psi_f \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X_d & X_{md} & X_{md} \\ X_{md} & X_D & X_{Df} \\ X_{md} & X_{Df} & X_f \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_d \\ i_D \\ i_f \end{bmatrix}; \begin{bmatrix} \omega \Psi_q \\ \omega \Psi_Q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X_q & X_{mq} \\ X_{mq} & X_Q \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_q \\ i_Q \end{bmatrix} \quad \dots\dots\dots (C.1)$$

其中各电抗分量按公式(C.2)~公式(C.6)进行计算:

$$X_d = X_{md} + X_{\sigma s} \quad \dots\dots\dots (C.2)$$

$$X_q = X_{mq} + X_{\sigma s} \quad \dots\dots\dots (C.3)$$

$$X_D = X_{Df} + X_{\sigma D} = X_{md} + X_{re} + X_{\sigma D} \quad \dots\dots\dots (C.4)$$

$$X_Q = X_{mq} + X_{\sigma Q} \quad \dots\dots\dots (C.5)$$

$$X_d = X_{Df} + X_{\sigma f} = X_{md} + X_{re} + X_{\sigma f} \quad \dots\dots\dots (C.6)$$

注 2: 耦合电抗值 X_{re} 可能是正(如透平发电机)或负(如在多数凸极电机中)。

注 3: 通常,用 $X_{re}=0$ 来简化电机模型,这导致转子参数计算误差较大。

本文件描述的程序所求得的参量用等值电路参量表示如下:

——电抗按公式(C.7)~公式(C.9)进行计算:

$$X_d' = X_d - \frac{X_{md}^2}{X_f} \quad \dots\dots\dots (C.7)$$

$$X_d'' = X_d - \frac{X_{md}^2 (X_f - X_{md})^2}{X_f X_D X_f - X_{md}^2} \quad \dots\dots\dots (C.8)$$

$$X_q'' = X_d - \frac{X_{mq}^2}{X_Q} \quad \dots\dots\dots (C.9)$$

——时间常数按公式(C.10)~公式(C.15)进行计算:

$$\tau_a = \frac{1}{\omega R_s} \frac{2}{1/X_d'' + 1/X_q''} \dots\dots\dots (C.10)$$

$$\tau_{kd0} = \frac{X_D}{\omega R_D}; \tau_{kd} = \frac{X_D - X_{md}^2/X_d}{\omega R_D} \dots\dots\dots (C.11)$$

$$\tau_{d0}' = \frac{X_f}{\omega R_f}; \tau_{d0}'' = \frac{X_D - X_{md}^2/X_f}{\omega R_D} \dots\dots\dots (C.12)$$

$$\tau_d' = \frac{X_d'}{X_d} \tau_{fd0}; \tau_d'' = \frac{X_d''}{X_d} \tau_{d0}'' \dots\dots\dots (C.13)$$

$$\tau_{q0}'' = \frac{X_Q}{\omega R_Q} \dots\dots\dots (C.14)$$

$$\tau_q'' = \frac{X_q''}{X_q'} \tau_{q0}'' \dots\dots\dots (C.15)$$

注 4：图 C.1 提供的电路模型无瞬态交轴参数。此时， $n_d=3$ ； $n_q=2$ 。

参 考 文 献

- [1] GB/T 2900.25—2008 电工术语 旋转电机
-