



中华人民共和国国家标准

GB/T 40294—2021/IEC 60034-4-1:2018

确定电励磁同步电机参数的试验方法

Methods for determining electrically excited synchronous machine quantities
from tests

(IEC 60034-4-1:2018, Rotation electrical machines—Part 4-1: Methods
for determining electrically excited synchronous machine quantities from
tests, IDT)

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 I

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 试验概述 7

6 试验程序 9

7 确定各参数 21

附录 A（规范性） 试验交叉引用 45

附录 B（规范性） 频率响应特性计算方案 47

附录 C（规范性） 常用电机模型 49

参考文献 51

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。

本文件使用翻译法等同采用 IEC 60034-4-1:2018《旋转电机 第4-1部分：确定电励磁同步电机参数的试验方法》。

与本文件中规范性引用的国际文件有一致性对应关系的我国文件如下：

——GB/T 25442—2018 旋转电机(牵引电机除外)确定损耗和效率的试验方法(IEC 60034-2-1:2014, IDT)。

本文件作了下列编辑性修改：

——修改了文件名称。

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、上海电器科学研究所(集团)有限公司、东方电气集团东方电机有限公司、重庆大学、上海马拉松革新电气有限公司、中机国际工程设计研究院有限责任公司、康富科技有限公司、哈尔滨大电机研究所、中车永济电机有限公司、上海电气集团上海电机厂有限公司、山东华力电机集团股份有限公司、西安泰富西玛电机有限公司、无锡欧瑞京电机有限公司、浙江临海浙富电机有限公司、台州市台成机电设备有限公司、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、周洪发、金惟伟、周光厚、周伟强、王维、倪立新、万勇、郑守海、张文斌、陈志兴、童陟嵩。

确定励磁同步电机参数的试验方法

1 范围

本文件适用于额定功率为 1 kVA 及以上的三相同步电机。

本文件试验方法主要适用于具有励磁绕组且励磁供电回路中带有集电环和电刷的同步电机,对于无刷同步电机某些试验需要特殊处理;对于永磁电机,所述试验方法的适用性有局限,且应采取专门措施以防电机永久性退磁。

本文件不适用于轴向磁通电机和特殊同步电机,诸如感应型电机、横向磁通电机和磁阻电机。

本文件所述的任一或全部试验项目并非对任何指定电机都要求执行。一些特定的试验可根据制造商和客户间的协议进行。

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(IEC 60034-1:2017,IDT)

IEC 60034-2-1 旋转电机 第 2-1 部分:确定损耗和效率的试验方法(牵引电机除外)[Rotating electrical machines—Part 2-1: Standards methods for determining losses and efficiency from tests (excluding machines for traction vehicles)]

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

下列术语和定义适用于本文件。

ISO 和 IEC 在下列网址维护用于标准化的专业术语数据库:

- IEC 电媒体(IEC Electropedia),网址如下:<http://www.electropedia.org/>;
- ISO 在线浏览平台,网址如下:<http://www.iso.org/obp>。

3.1

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。

3.2

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]

3.3

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]

3.4

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]

3.5

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]

3.6

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]

3.7

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]

3.8

正序电抗 positive sequence reactance

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

[来源:GB/T 2900.25—2008,411-50-14]

3.9

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]

3.10

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]

3.11

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]

3.12

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。

3.13

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,以每一相值来表示。

3.14

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。

3.15

正序电阻 positive sequence resistance

电机在额定转速下运行时,由电枢绕组中对应于正弦正序电枢电流的电阻损耗和负载杂散损耗所引起的同相正序电枢电压与该电流之比。

[来源:GB/T 2900.25—2008,411-50-18]

3.16

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]

3.17

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]

3.18

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]

3.19

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]

3.20

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]

3.21

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]

3.22

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]

3.23

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]

3.24

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]

3.25

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]

3.26

直轴开路等效阻尼电路时间常数 **direct-axis open-circuit equivalent damper circuit time constant**

电机在额定转速下运行,在电枢绕组和励磁绕组均开路情况下运行条件产生突变后,等效电路中的感应电流分量衰减到其初始值的 $1/e$,即 0.368 倍时所需的时间。

3.27

直轴短路等效阻尼绕组时间常数 **direct-axis short-circuit equivalent damper winding time constant**

电机在额定转速下运行,在电枢绕组短路和励磁绕组开路情况下运行条件产生突变后,等效电路中的感应电流分量衰减到其初始值的 $1/e$,即 0.368 倍时所需的时间。

3.28

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]

3.29

电枢绕组短路时间常数 **short-circuit time constant of armature windings**

电机在额定转速下运行,当运行条件产生突变后,短路电枢绕组电流中直流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—2008,411-48-31]

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。

3.36

直轴电抗频率响应特性 frequency response characteristic of direct-axis reactance

是转差率的函数,电机励磁绕组短接,在给定的转差率下运行,由直轴电枢电流所产生的电枢电压基波分量的稳态复值(相量)与该电流基波分量的矢量的复数比。

注:术语相量或矢量,是以复数表示的单一频率的正弦量,是本文件使用的术语。

3.37

交轴电抗频率响应特性 frequency response characteristic of quadrature-axis reactance

是转差率的函数,电机励磁绕组短接,在给定的转差率下运行,由交轴电枢电流所产生的电枢电压基波分量的稳态相量与该电流基波分量的矢量的复数比。

3.38

励磁因数频率响应特性 frequency response characteristic of excitation factor

电机在额定转速下运行,励磁绕组电流在频率 $s \cdot f$ 时产生的电枢电压的稳态相量与施加在励磁绕组上的电压复值的复数比。

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_N : 额定电流, 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)
 K_c : 短路比
 $R_{(0)}$: 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)
 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)
 $X_d(j\omega)$: 直轴电抗频率响应特性复数
 $X_q(j\omega)$: 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 试验概述

确定同步电机参数的试验和优选方法见表 1,同步电机各参数及其试验方法的关系应符合附录 A 中表 A.1。

表 1 试验方法和交叉引用表

参数	章条	简述	试验	优选/ 不确定度
电抗				
直轴同步电抗 X_d	7.2.1	空载饱和,三相稳态短路	6.4 和 6.5	优选(不饱和)
	7.2.2	电动机空载试验	6.6	
	7.2.3	负载试验测定功角	6.9	
直轴瞬态电抗 X'_d	7.3.1	三相突然短路	6.11	优选
	7.3.2	电压恢复	6.12	
	7.3.3	静态电枢绕组直流衰减	6.14	
	7.3.4	由试验值计算	—	
直轴超瞬态电抗 X''_d	7.4.1	三相突然短路	6.11	优选
	7.4.2	电压恢复	6.12	
	7.4.3	转子处于直轴和交轴位置时的外施电压试验	6.15	
	7.4.4	转子处于任意位置时的外施电压试验	6.16	
交轴同步电抗 X_q	7.5.1	反励磁	6.8	优选(不饱和)
	7.5.2	低转差率	6.10	
	7.5.3	负载试验测定功角	6.9	
交轴瞬态电抗 X'_q	7.6.1	静态直流衰减试验	6.14	
	7.6.2	由试验值计算	—	
交轴超瞬态电抗 X''_q	7.7.1	转子处于直轴和交轴位置时的外施电压试验	6.15	优选
	7.7.2	转子处于任意位置时的外施电压试验	6.16	
零序电抗 $X_{(0)}$	7.8.1	三相绕组外施单相电压试验	6.17	优选
	7.8.2	两相对中性点稳态短路	6.19	
负序电抗 $X_{(2)}$	7.9.1	两相稳态短路	6.18	优选
	7.9.2	逆相序	6.20	
	7.9.3	由试验值计算	—	
	7.9.4	静态电枢绕组直流衰减试验	6.14	
电枢漏抗 X_σ	7.10	转子移除	6.22	
保梯电抗 X_p	7.11	空载饱和,三相稳态短路	6.4 和 6.5	
电阻				
零序电阻 $R_{(0)}$	7.12.1	三相绕组外施单相电压试验	6.17	优选
	7.12.2	两相对中性点稳态短路	6.19	
正序电枢电阻 $R_{(1)}$	7.13	由试验值计算	—	
负序电阻 $R_{(2)}$	7.14.1	两相稳态短路	6.18	优选
	7.14.2	逆相序	6.20	

表 1 试验方法和交叉引用表 (续)

参数	章条	简述	试验	优选/ 不确定度
电阻				
电枢电阻 R_a	7.15	电流电压表法或电桥法	6.3	
励磁绕组电阻 R_f	7.15	电流电压表法或电桥法	6.3	
时间常数				
直轴瞬态短路时间常数 τ_d'	7.16.1	三相突然短路	6.11	优选
	7.16.2	静态电枢绕组直流衰减	6.14	
直轴瞬态开路时间常数 τ_{do}'	7.17.1	额定转速、电枢绕组开路时的励磁电流衰减试验	6.21.1	优选
	7.17.2	静态下电枢绕组开路时的励磁电流衰减试验	6.21.2	
	7.17.3	电压恢复	6.12	
	7.17.4	静态电枢绕组直流衰减	6.14	
直轴超瞬态短路时间常数 τ_d''	7.18	三相突然短路	6.11	
直轴超瞬态开路时间常数 τ_{do}''	7.19.1	电压恢复	6.12	优选
	7.19.2	静态电枢绕组直流衰减	6.14	
交轴瞬态短路时间常数 τ_q'	7.20.1	由试验值计算	—	优选
	7.20.2	静态电枢绕组直流衰减	6.14	
交轴瞬态开路时间常数 τ_{qo}'	7.21.1	静态电枢绕组直流衰减	6.14	
交轴超瞬态短路时间常数 τ_q''	7.22.1	由试验值计算	—	优选
	7.22.2	静态电枢绕组直流衰减	6.14	
交轴超瞬态开路时间常数 τ_{qo}''	7.23	静态电枢绕组直流衰减	6.14	
电枢短路时间常数 τ_a	7.24.1	三相突然短路	6.11	优选
	7.24.2	由试验值计算	—	
其他参数				
单位加速时间 τ_j ，储能常数 H	7.25	空载自减速	6.23	优选
额定励磁电流 I_{fN}	7.26.1	直接测量法	6.2	优选
	7.26.2	保梯图法	—	
	7.26.3	ASA 图法	—	
	7.26.4	瑞典图法	—	
额定电枢短路电流时的励磁电流 I_{fk}	7.27.1	三相稳态短路试验	6.5	优选
	7.27.2	零功率因数时的过励磁和可调电枢绕组电压	6.26	
频率响应特性	7.28.2	降压异步运行	6.25	优选
	7.28.3	静态外施可调频率电压	6.27	
	7.28.4	静态电枢绕组直流衰减	6.14	

表 1 试验方法和交叉引用表（续）

参数	章条	简述	试验	优选/ 不确定度
其他参数				
短路比 K_c	7.29	空载饱和 三相稳态短路	6.4 6.5	
额定电压调整率 ΔU_N	7.30.1 7.30.2	直接测量法 由空载饱和曲线和已知的 i_{IN} 作图	6.2 6.4.2	优选
同步电动机初始起动阻 抗 Z_{st}	7.31	堵转	6.24	

6 试验程序

6.1 概述

6.1.1 测试仪器的要求

应尽可能使用数字仪器。

试验时，采用的测量仪器及其附件，如测量互感器、分流器和电桥，应有 IEC 60051 所规定的 0.5 级准确度，除非另有规定。测定直流电阻所用的仪器应至少有 0.2 级准确度。

用于测量电源频率的仪器应有满量程 $\pm 0.1\%$ 的准确度。转速测量设备的准确度宜在每分钟 0.1 转以内。

6.1.2 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，要么要求由独立电源给励磁绕组供电进行励磁电流测量，要么经过特殊处理（例如，在轴端安装集电环）将回路短路。

6.1.3 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要求监控温度。

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。

6.1.4 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(1)导出基值电流:

$$I_N = \frac{S_N}{\sqrt{3}U_N} \dots\dots\dots (1)$$

按公式(2)计算基值阻抗:

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

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,这些公式应被视为近似公式。

6.1.5 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,通常宜把时间常数理解为该分量自其初始值衰减至 $1/e \approx 0.368$ 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(按附录 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' , τ_q' , τ_{qo}' 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。

6.1.6 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'_{do} 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'_q ,那么 τ'_q 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。

6.2 额定负载时直接测定励磁电流

额定励磁电流 I_N 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。

6.3 测定直流绕组电阻

电阻的测定应按 IEC 60034-2-1 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。

6.4 空载饱和试验

6.4.1 试验程序

空载饱和试验按如下方法进行:

- 被试电机用某一原动机驱动作为发电机运行;或
- 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
- 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。

当励磁电流减少到零时,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 确定空载饱和特性

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 8 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,所有测得的电压值应折算到额定频率,即乘以额定频率与试验频率之比。

6.5 稳态三相短路试验

6.5.1 试验程序

稳态三相短路试验按如下方法进行:

- 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,但电压值最低时要能够稳定运行。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

根据三相稳态短路试验(见 6.5.1)的数据绘制电枢短路绕组电流和励磁电流的关系曲线。

按图 8 所示,在额定转速(频率)下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。

6.6 电动机空载试验

本试验按 6.4.1b) 进行,如被试电机以电动机运行、轴端为空载等,则保持励磁电流为零。

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%~70%。

同步记录:

- 电枢电流;
- 线电压;
- 频率(或转速)。

6.7 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宜大于额定值的 ± 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。

6.8 反励磁试验

进行此项试验时,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。

6.9 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。

6.10 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($0.01U_N \sim 0.02U_N$),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以忽略不计。

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,可以如此去磁: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(如果后者可能的话)。

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。

6.11 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,可以使用直流分流器。

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 0.1 倍~0.4 倍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,则要求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 7.1.2 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。

6.12 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,通常可使额定开路电枢电压不高于其额定值的 0.7 倍。

应接近同步地切断三相稳态短路,即在 $\theta \leq 0.5\tau''_d$ (将 τ''_d 定义为电角度)但不迟于 180 电角度内切断各相电流。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:如果该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 7.1.3 分析出数据。

本试验适用但无关于永磁电机。

6.13 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 6.11 所述相同。

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

6.14 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 1)。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。

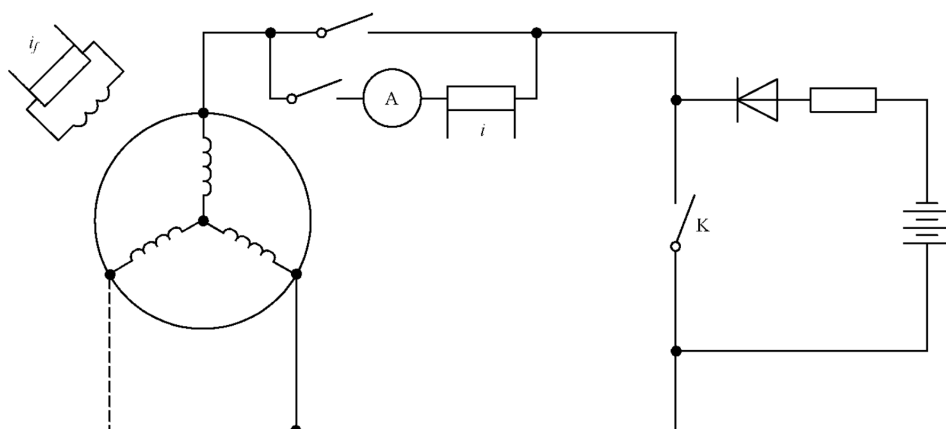


图 1 静态直流衰减试验原理图

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 7.1.4 分析出数据。

本试验不完全适用于永磁电机。

6.15 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,可以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($0.2I_N \sim 0.7I_N$)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。

6.16 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。

6.17 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一方向流过。

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。

6.18 两相稳态短路试验

试验时,将任意两个端子短接(见图 2),并用某种原动机把电机驱动到额定转速。

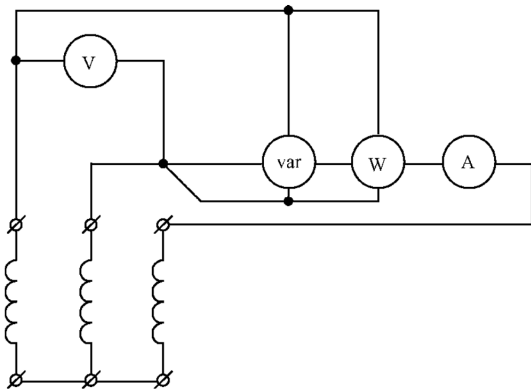


图 2 两相稳态短路试验线路图

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 $0.3I_N$ 时,试验过程宜限制在测量仪表读数所需的时间。

6.19 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 3)。

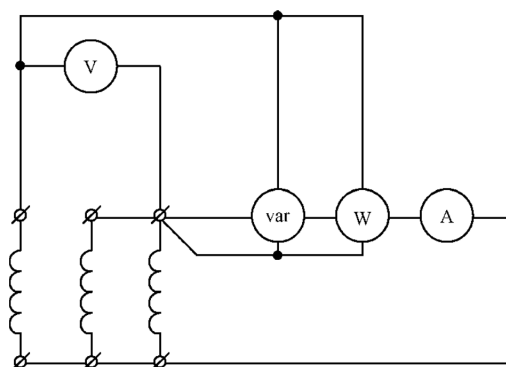


图 3 两相对中性点稳态短路试验线路图

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,有功功率和无功功率均要测量。

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

本试验不完全适用于永磁电机。

6.20 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 $(0.02U_N \sim 0.2U_N)$ 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。

6.21 电枢绕组开路时的励磁电流衰减试验

6.21.1 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以在 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。

6.21.2 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以在 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。

6.22 转子移除(rotor removed)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 4)。

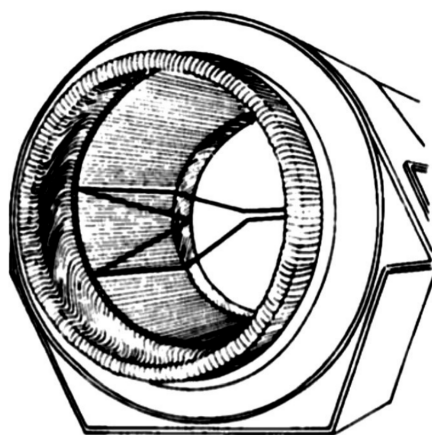


图 4 转子移除时安装探测线圈

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。

6.23 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。

6.24 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起动电阻。

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,可以进行一系列降低电压试验,从而可以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。

6.25 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($0.01U_N \sim 0.2U_N$),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,可以在低减速率下进行带瞬态记录的试验(对小电机来说不超过 0.04 倍额定转速每秒;对大电机来说,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 5)。

本试验不适用于永磁电机。

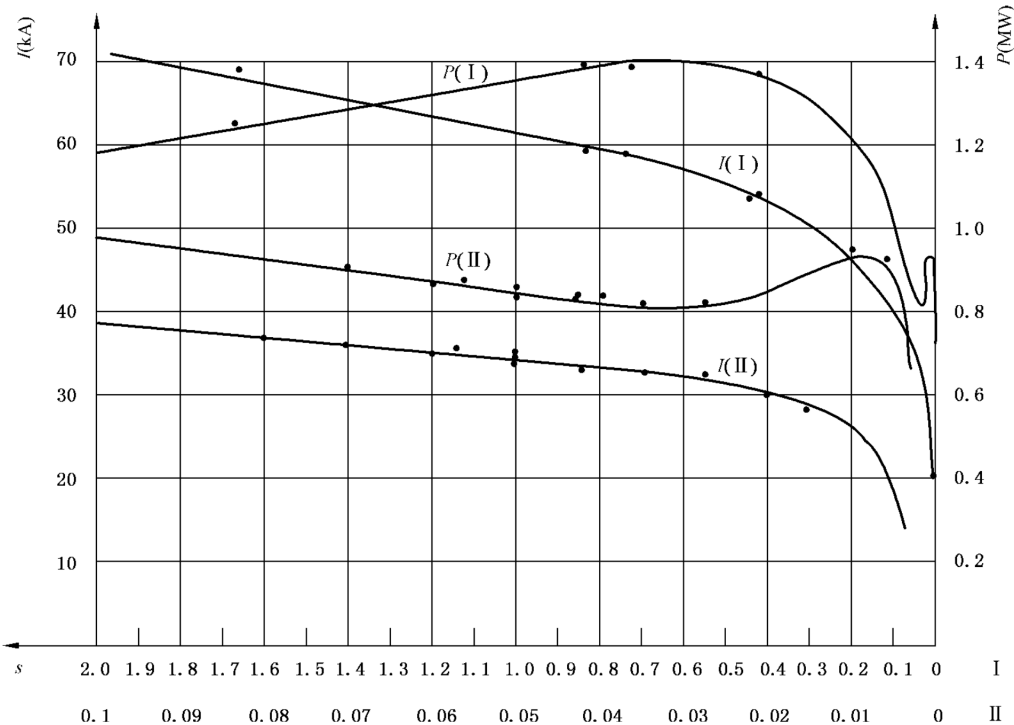


图 5 功率和电流对转差率曲线(示例)

6.26 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,建议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。

6.27 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,可以给 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 6 是基本连接原理图。

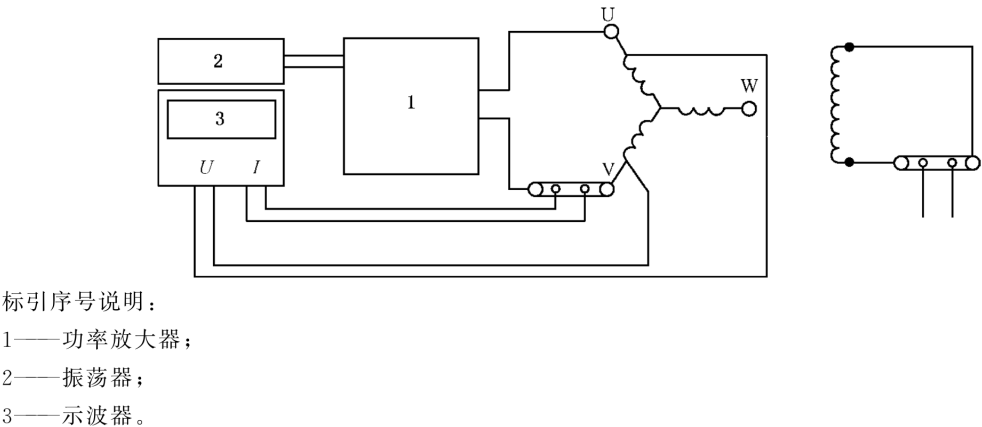
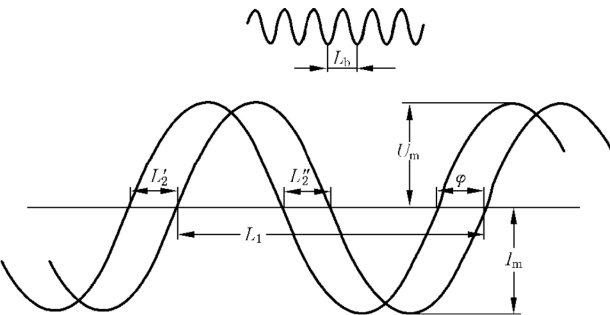


图 6 静态下外施可调频率试验原理图

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(3)和公式(4)来确定,见图 7。



注：

$$s = f_i / f_N = (f_b L_b) / (f_N L_1)$$
$$\varphi = 2\pi \cdot (L_2' + L_2'') / (2L_1)$$

..... (3)

..... (4)

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_i ——试验频率；
- f_N ——额定频率。

图 7 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。相位角也可以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。可能在较大(0.3 倍到 0.5 倍额定电枢电流值)电流也可能在很小电流(0.05 倍到 0.1 倍电枢电流额定值)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。

7 确定各参数

7.1 分析数据记录

7.1.1 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 8 合并绘制成一组曲线。

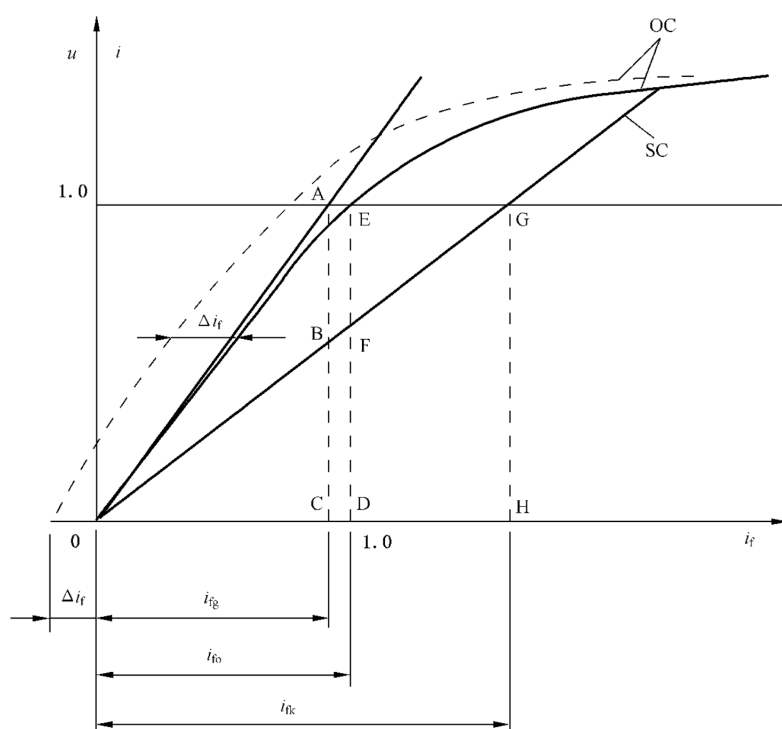


图 8 饱和特性和短路特性组合曲线

曲线图用于确定直轴同步电抗(见 7.2.1 和 7.2.2)和短路比(见 7.29)。

7.1.2 三相突然短路试验

从三相短路电流对时间的数据记录(见 6.11)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 9),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来计算相关中间点。

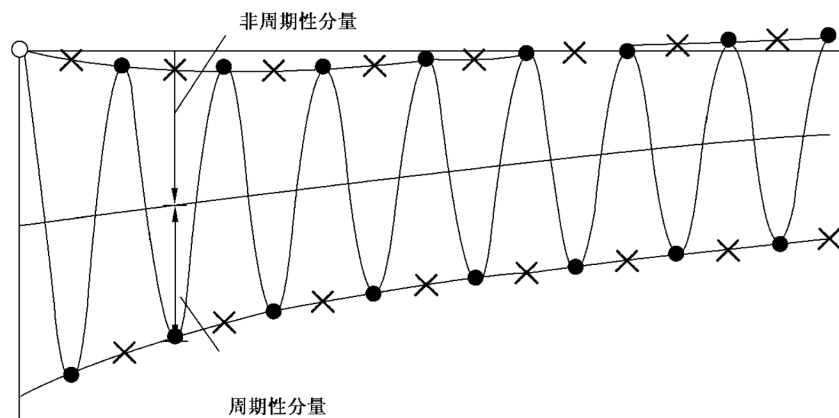


图 9 包络线上确定中间点

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和的一半求得。初始值由外推到短路时刻确定, $t=0$ 。

每相电流的周期性分量曲线由该相电流上下包络线上电流值差的一半求得。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。

稳态短路电流以三相稳态短路试验(见 6.5)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 10)。

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 11)。

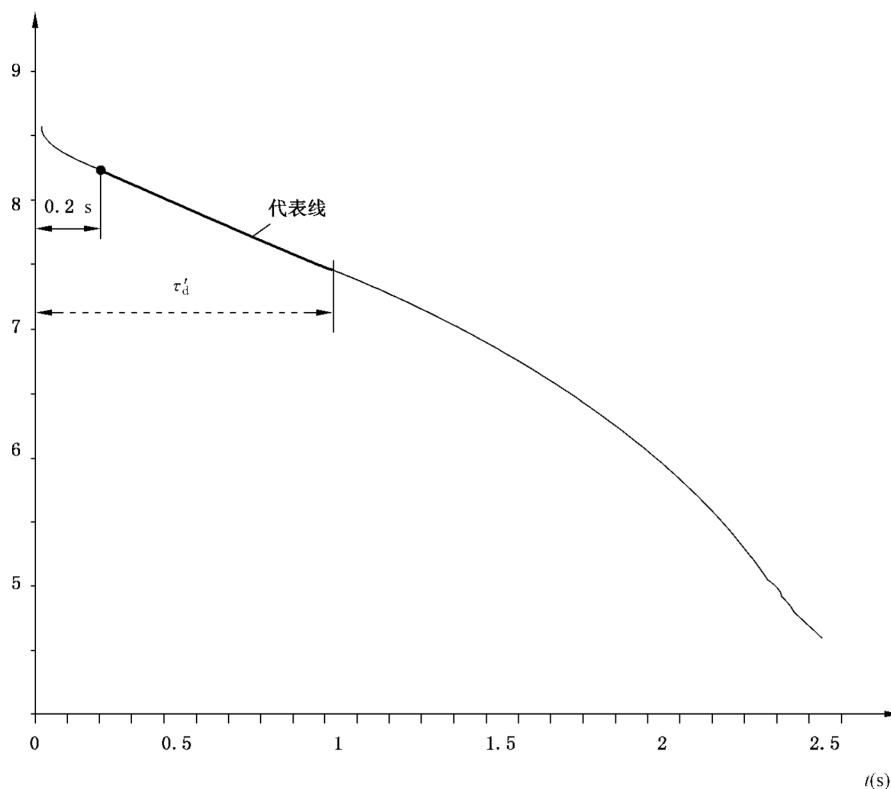


图 10 确定短路电流瞬态分量

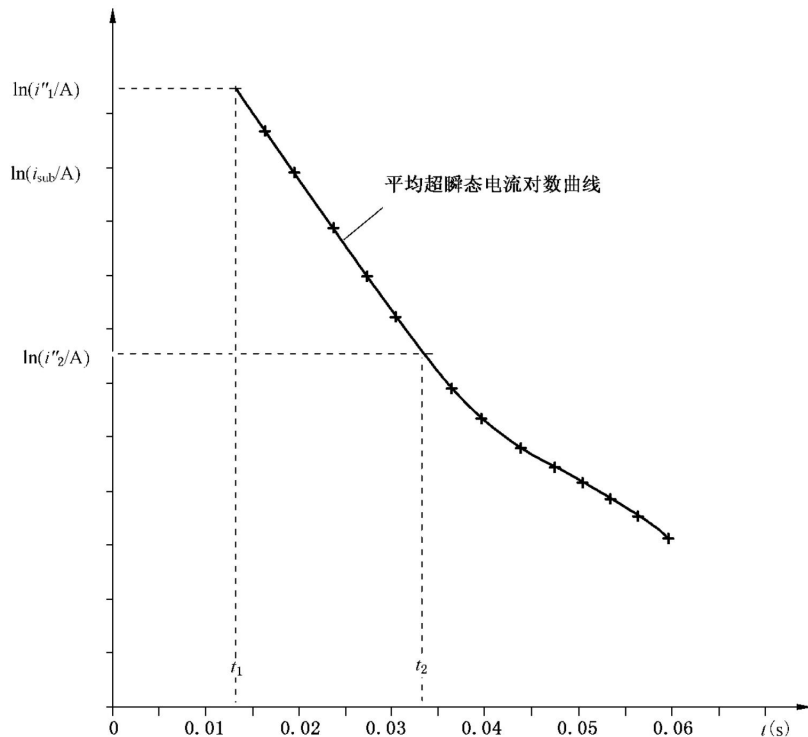


图 11 确定短路电流超瞬态分量

按公式(5)分析确定非周期性分量的最大可能值：

$$i_{a \max} = \frac{2}{\sqrt{3}} \sqrt{i_{a1}^2 + i_{a2}^2 + i_{a1} i_{a2}} \dots\dots\dots (5)$$

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。

7.1.3 电压恢复试验

从读数记录上(见 6.12)，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 12 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 $\Delta u'(0)$ 。

由曲线(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 $\Delta u''$ 。

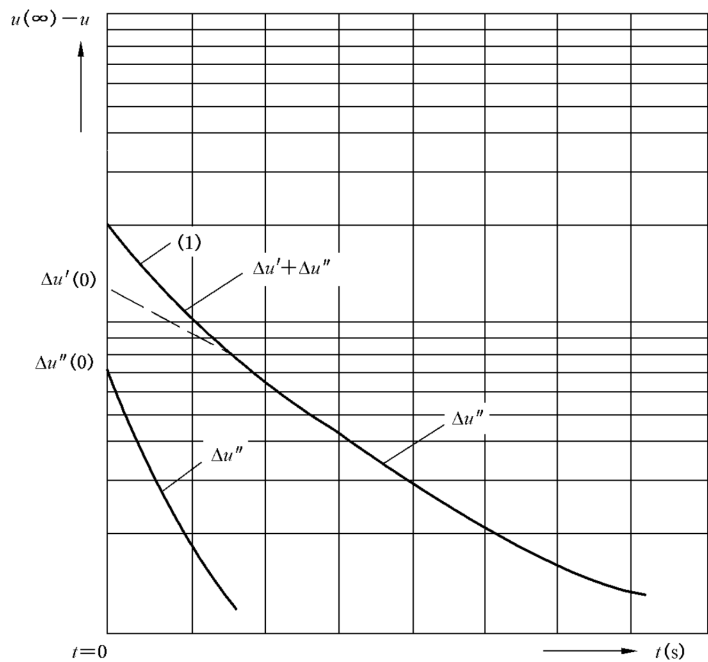


图 12 恢复电压瞬态和超瞬态分量

7.1.4 静态电枢绕组直流衰减

此试验(见 6.14)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 13a)]。外推线和纵坐标轴的交叉点即为第一个指数 i_{10} (the first exponential) 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 $1/e \approx 0.368$ 倍所需的时间来求取。

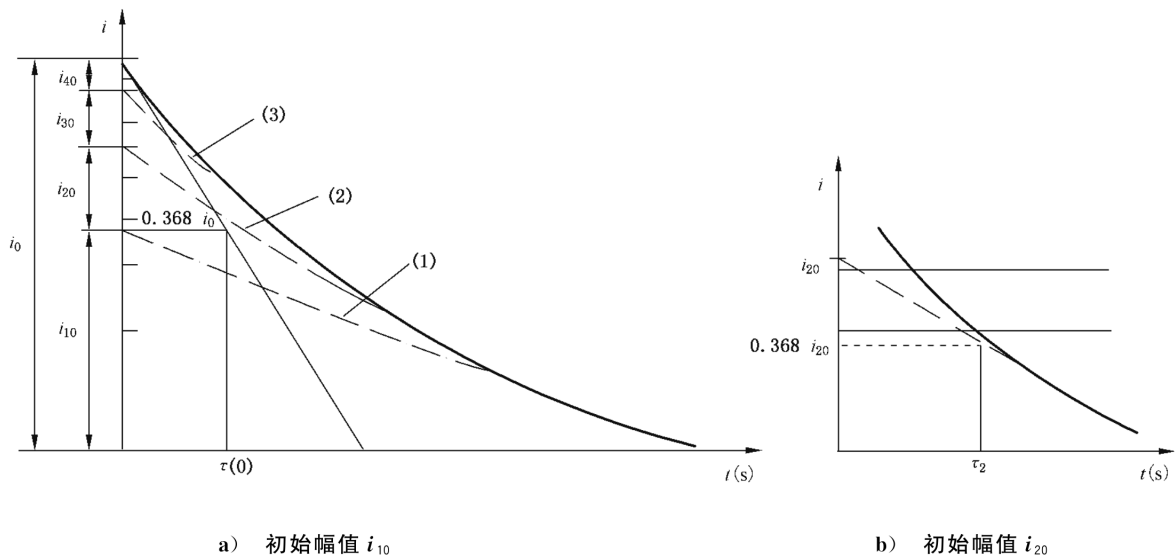


图 13 电流衰减的半对数曲线

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 13b)]。

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_{kf} 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,可以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 $D'_d(p)=0$ (按附录 B 的规定) 的根 α_{kd} 和 α'_{kd} 来求取同步电机的直轴时间常数,如公式(6)和公式(7):

$$\tau'_d = \frac{1}{\omega\alpha'_{1d}}; \tau''_d = \frac{1}{\omega\alpha'_{2d}}; \tau'''_d = \frac{1}{\omega\alpha'_{3d}}; \dots\dots\dots (6)$$

$$\tau'_{do} = \frac{1}{\omega\alpha_{1d}}; \tau''_{do} = \frac{1}{\omega\alpha_{2d}}; \tau'''_{do} = \frac{1}{\omega\alpha_{3d}}; \dots\dots\dots (7)$$

式中: $\omega=2\pi f$ 。

同样地,用已知的特性方程 $D_q(p)=0$ 和 $D'_q(p)=0$ (按附录 B 的规定) 的根 α_{kq} 和 α'_{kq} 来求取同步电机的交轴时间常数,如公式(8)和公式(9):

$$\tau'_q = \frac{1}{\omega\alpha'_{1q}}; \tau''_q = \frac{1}{\omega\alpha'_{2q}}; \tau'''_q = \frac{1}{\omega\alpha'_{3q}}; \dots\dots\dots (8)$$

$$\tau'_{qo} = \frac{1}{\omega\alpha_{1q}}; \tau''_{qo} = \frac{1}{\omega\alpha_{2q}}; \tau'''_{qo} = \frac{1}{\omega\alpha_{3q}}; \dots\dots\dots (9)$$

7.1.5 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 14)。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,剩磁电压通常可以忽略。

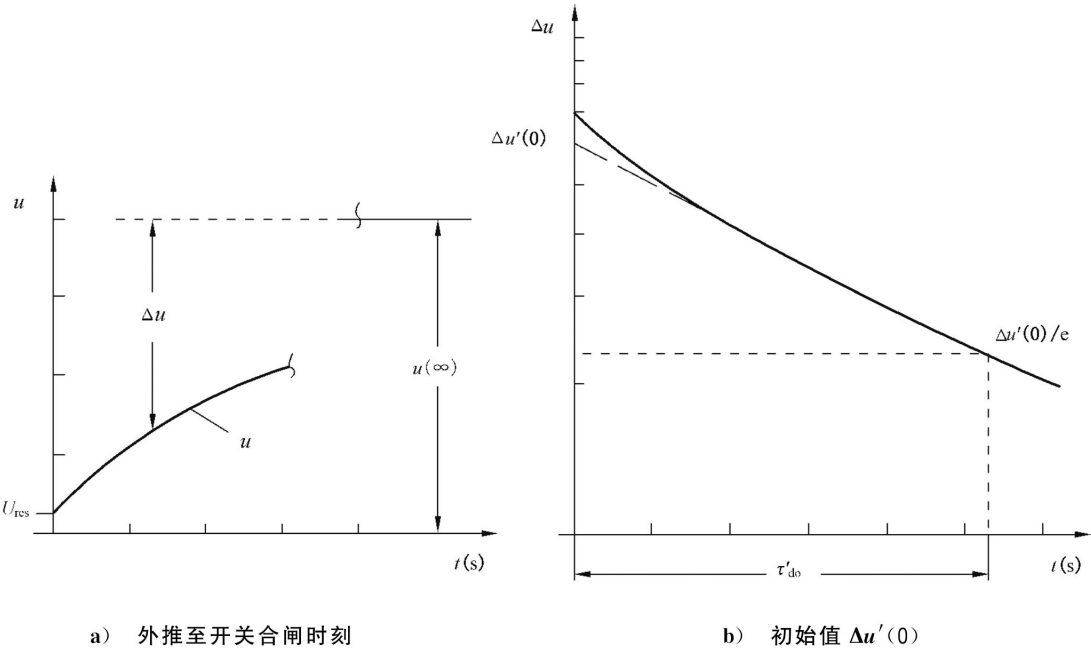


图 14 电枢绕组开路时的突加励磁

7.2 直轴同步电抗

7.2.1 从空载饱和试验与三相稳态短路试验确定

按 7.1.1 绘制的曲线(见图 8)确定 X_d 的不饱和值,如公式(10):

$$X_d = \frac{U_N}{\sqrt{3} I_{BC}}; \left[x_d = \frac{AC}{BC} = \frac{OH}{OC} = \frac{i_{fk}}{i_{fg}} \right] \dots\dots\dots (10)$$

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。

7.2.2 从电动机空载试验确定

按公式(11)确定 X_d 的不饱和值(见图 8):

$$X_d = \frac{U}{\sqrt{3} I}; \left[x_d = \frac{u}{i} \right] \dots\dots\dots (11)$$

其中端电压 U 和电枢绕组电流 I 按 6.6 确定。

7.2.3 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(12)计算:

$$X_d = \frac{E_0 / \cos \delta - U}{\sqrt{3} I (\cos \varphi \cdot \tan \delta + \sin \varphi)}; \left[x_d = \frac{e_0 / \cos \delta - u}{i (\cos \varphi \cdot \tan \delta + \sin \varphi)} \right] \dots\dots\dots (12)$$

式中:

E_0 —— 对应于实际负载下励磁电流时的同步内电势。为确定 E_0 , 绘制(与图 8 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_0 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 $\varphi = \pi (\cos \varphi = -1)$ 。

7.3 直轴瞬态电抗

7.3.1 从三相突然短路试验确定

按公式(13)确定 X'_d 的值:

$$X'_d = \frac{U(0)}{\sqrt{3}} \frac{1}{[I(\infty) + \Delta I'_k(0)]}; \left[x'_d = \frac{u(0)}{i(\infty) + \Delta i'_k(0)} \right] \dots\dots\dots (13)$$

式中:

$U(0)$ —— 空载电压, 在短路前瞬间测得(见 6.11);

$I(\infty), \Delta I'_k$ —— 按 7.1.2 确定。

7.3.2 从电压恢复试验确定

按公式(14)确定 X'_d (不饱和)的值:

$$X'_d = \frac{U(\infty) - \Delta U'(0)}{\sqrt{3} I_k}; \left[x'_d = \frac{u(\infty) - \Delta u'(0)}{i_k} \right] \dots\dots\dots (14)$$

其中输入电压按 7.1.3 从试验数据(见 6.12)分析确定。

7.3.3 从静态电枢绕组直流衰减试验确定

按公式(15)计算:

$$x'_d = \frac{1}{1/x_d + C_{1d}} \dots\dots\dots (15)$$

其中 C_{1d} 按附录 B 的规定, x_d 的计算如 7.1.4 所述。

7.3.4 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(16)表达:

$$x_d \cdot \tau'_d = x'_d \cdot \tau'_{d0} \dots\dots\dots (16)$$

按此关系从已知 x_d 、 τ'_d 和 τ'_{d0} 的值确定 x'_d 。

7.4 直轴超瞬态电抗

7.4.1 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 7.1.2,见图 9),按公式(17)计算:

$$X''_d = \frac{U(0)}{\sqrt{3}} \frac{1}{[I(\infty) + \Delta I'_k(0) + \Delta I''_k(0)]}; \left[x''_d = \frac{u(0)}{i(\infty) + \Delta i'_k(0) + \Delta i''_k(0)} \right] \dots\dots (17)$$

7.4.2 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(18)计算:

$$X''_d = \frac{U(\infty) - [\Delta U'(0) + \Delta U''(0)]}{\sqrt{3} I_k}; \left[x''_d = \frac{u(\infty) - [\Delta u'(0) + \Delta u''(0)]}{i_k} \right] \dots\dots (18)$$

其中输入值按 7.1.3 从试验数据(6.12)分析确定。

7.4.3 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(19)计算:

$$X''_d = \sqrt{Z''_d{}^2 - R''_d{}^2} \dots\dots\dots (19)$$

式中, Z''_d 按公式(20)计算:

$$Z''_d = \frac{U}{2I}; R''_d = \frac{P}{2I^2}; \left[x''_d = \sqrt{z''_d{}^2 - r''_d{}^2}; z''_d = \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot \frac{u}{i}; r''_d = \frac{3}{2} \cdot \frac{p}{i^2} \right] \dots\dots\dots (20)$$

按 6.15,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。

7.4.4 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(21)计算(以标么值或物理参数):

$$x''_d = x_{av} \pm \Delta x \dots\dots\dots (21)$$

式中, x_{av} 和 Δx 按公式(22)计算:

$$x_{av} = \frac{x_{12} + x_{23} + x_{31}}{3}; \Delta x = \frac{2}{3} \sqrt{x_{12}(x_{12} - x_{23}) + x_{23}(x_{23} - x_{31}) + x_{31}(x_{31} - x_{12})} \quad (22)$$

每一对电枢绕组端子间的电抗 x_{12} 、 x_{23} 和 x_{31} 按 7.4.3 中给出的公式计算(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(-)。

7.5 交轴同步电抗

7.5.1 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(23)计算:

$$x_q = (x_d) \cdot \frac{u_r}{u_r + (e)} \quad \dots\dots\dots (23)$$

式中:

(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;

u_r ——滑行一个极距瞬间的电压,见图 15;

(x_d) ——直轴同步电抗,由同一直线化空载饱和特性确定。

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(24)确定 x_q :

$$X_q = \frac{U_r}{\sqrt{3} I_r}; \left[x_q = \frac{u_r}{i_r} \right] \quad \dots\dots\dots (24)$$

取决于 u_r ,由此试验求得 x_q 的值可以包括饱和状态。为求得不饱和值,施加的电压通常宜减少至 0.6 倍额定值或者更低。

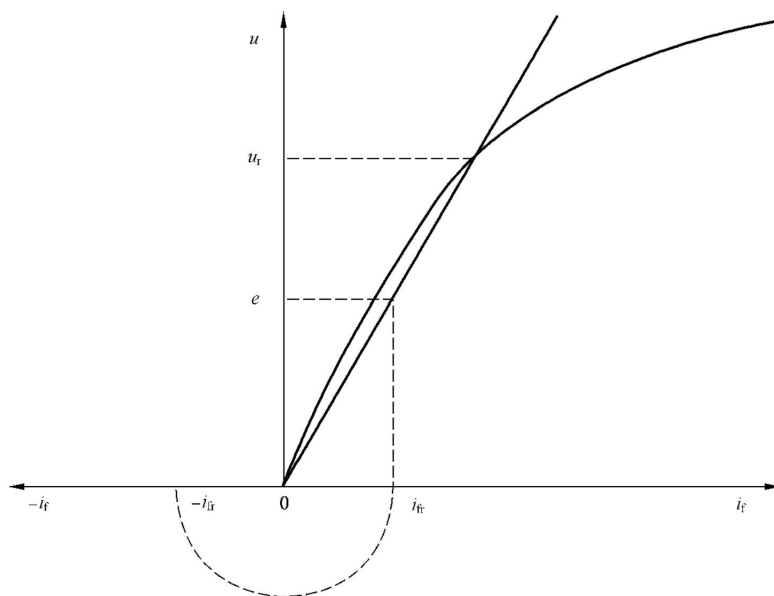


图 15 滑行一个极距时的空载电势和励磁电流

7.5.2 从低转差率试验确定

从低转差率试验(见 6.10)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(25)计算:

$$X_q = \frac{U_{\min}}{\sqrt{3} I_{\max}}; \left[x_q = \frac{u_{\min}}{i_{\max}} \right] \dots\dots\dots (25)$$

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(26)确定:

$$I_{\max} = \sqrt{I_{\text{av}}^2 - \left(\frac{U_{\text{res}}}{\sqrt{3} X_d} \right)^2}; \left[i_{\max} = \sqrt{i_{\text{av}}^2 - \left(\frac{u_{\text{res}}}{x_d} \right)^2} \right] \dots\dots\dots (26)$$

其中, I_{av} 是电流包络线相邻两个最大值之和的一半(见图 16)。

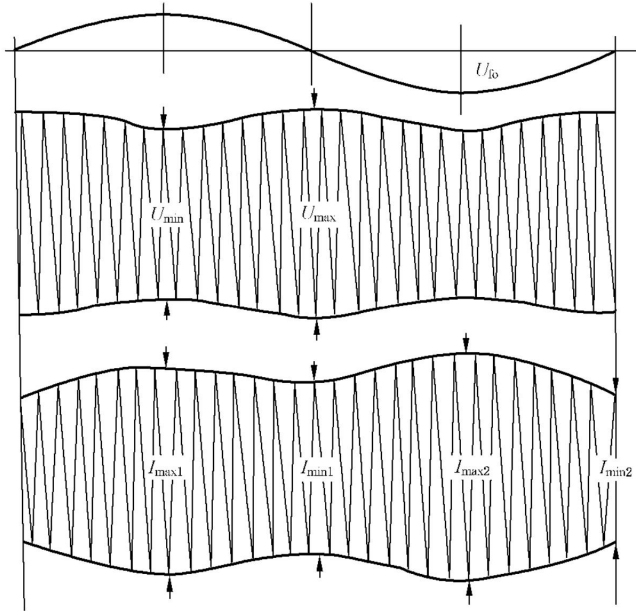


图 16 低转差率试验电流包络线

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(27)计算:

$$X_d = \frac{U_{\max}}{\sqrt{3} I_{\min}}; \left[x_d = \frac{u_{\max}}{i_{\min}} \right] \dots\dots\dots (27)$$

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 7.2 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。

7.5.3 从负载试验测量功角确定

从负载试验测量功角(见 6.9)确定 X_q 的值,按公式(28)计算:

$$X_q = \frac{U \cdot \tan \delta}{\sqrt{3} I (\cos \varphi - \tan \delta \cdot \sin \varphi)}; \left[x_q = \frac{u \cdot \tan \delta}{i (\cos \varphi - \tan \delta \cdot \sin \varphi)} \right] \dots\dots\dots (28)$$

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(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 $\varphi=\pi(\cos\varphi=-1)$ 。

7.6 交轴瞬态电抗

7.6.1 从静态电枢绕组直流衰减试验确定

按公式(29)计算:

$$x'_{\text{q}} = \frac{1}{1/x_{\text{q}} + C_{1\text{q}}} \quad \dots\dots\dots (29)$$

其中 $C_{1\text{q}}$ 应符合附录 B 的规定, x_{q} 的计算如 7.1.4 所述。

7.6.2 从试验值计算确定

参数 x'_{q} 、 x_{q} 、 τ'_{q0} 和 τ'_{q} 相互之间的关系可按公式(30)表达:

$$x_{\text{q}} \cdot \tau'_{\text{q}} = x'_{\text{q}} \cdot \tau'_{\text{q0}} \quad \dots\dots\dots (30)$$

按此关系从已知 x_{q} 、 τ'_{q} 和 τ'_{q0} 的值确定 x'_{q} 。

7.7 交轴超瞬态电抗

7.7.1 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} ,与 7.4.3 所述一样,如公式(31),但是由下标 q 代替下标 d 。

$$X''_{\text{q}} = \sqrt{Z''_{\text{q}}^2 - R_{\text{q}}^2} \quad \dots\dots\dots (31)$$

式中 Z''_{q} 等按公式(32)计算:

$$Z''_{\text{q}} = \frac{U}{2I}; R_{\text{q}} = \frac{P}{2I^2}; \left[x''_{\text{q}} = \sqrt{z''_{\text{q}}^2 - r_{\text{q}}^2}; z''_{\text{q}} = \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot \frac{u}{i}; r_{\text{q}} = \frac{3}{2} \cdot \frac{p}{i^2} \right] \quad \dots\dots\dots (32)$$

按 6.15,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 等各值。

7.7.2 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 7.4.4 所述方法一样,但要采用 6.16 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(-)。

7.8 零序电抗

7.8.1 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 6.17)确定零序电抗和电阻,按公式(33)计算:

$$X_0 = \sqrt{Z_0^2 - R_0^2}; [x_0 = \sqrt{z_0^2 - r_0^2}] \quad \dots\dots\dots (33)$$

式中,根据三相的接法:

——串联时, Z_0 等按公式(34)计算:

$$Z_0 = \frac{U}{3I}; R_0 = \frac{P}{3I^2}; \left[z_0 = \frac{1}{\sqrt{3}} \cdot \frac{u}{i}; r_0 = \frac{p}{i^2} \right] \dots\dots\dots (34)$$

——并联时, Z_0 等按公式(35)计算:

$$Z_0 = \frac{3U}{I}; R_0 = \frac{3P}{I^2}; \left[z_0 = 3\sqrt{3} \cdot \frac{u}{i}; r_0 = \frac{9p}{i^2} \right] \dots\dots\dots (35)$$

7.8.2 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 6.22)确定零序电抗 X_0 , 计算按公式(36):

$$X_0 = \frac{U_0}{I_0}; \left[x_0 = \frac{3u_0}{i_0} \right] \dots\dots\dots (36)$$

公式(36)适用于当电压或电流谐波可以忽略不计的情况, 或:

$$X_0 = \frac{U_0^2}{Q} \cdot \frac{Q^2}{P^2 + Q^2}; \left[x_0 = \frac{u_0^2}{q} \cdot \frac{q^2}{p^2 + q^2} \right] \dots\dots\dots (37)$$

公式(37)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。

7.9 负序电抗

7.9.1 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 $X_{(2)}$, 计算按公式(38):

$$X_{(2)} = \frac{P}{\sqrt{3} I_{k2}^2}; \left[x_{(2)} = \sqrt{3} \frac{p}{i_{k2}^2} \right] \dots\dots\dots (38)$$

公式(38)适用于电压或电流谐波可以忽略不计的情况, 或:

$$X_{(2)} = \frac{U^2}{P} \cdot \frac{P^2}{P^2 + Q^2} \cdot \frac{1}{\sqrt{3}}; \left[x_{(2)} = \frac{u^2}{p} \cdot \frac{p^2}{p^2 + q^2} \cdot \frac{1}{\sqrt{3}} \right] \dots\dots\dots (39)$$

公式(39)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。

7.9.2 从逆相序试验确定

从 6.20 的逆相序试验确定负序电抗和电阻, 按公式(40)计算:

$$X_{(2)} = \sqrt{Z_{(2)}^2 - R_{(2)}^2}; Z_{(2)} = \frac{U}{\sqrt{3} I}; R_{(2)} = \frac{P}{3I^2}; \left[x_{(2)} = \sqrt{z_{(2)}^2 - r_{(2)}^2}; z_{(2)} = \frac{u}{i}; r_{(2)} = \frac{p}{i^2} \right] \quad (40)$$

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。

7.9.3 从试验值计算确定

从已知的试验值 X''_d (见 7.4) 和 X''_q (见 7.6) 按公式(41)计算负序电抗 $X_{(2)}$:

$$X_{(2)} = \frac{x''_d + x''_q}{2} \dots\dots\dots (41)$$

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: $x''_q/x''_d \approx 1$ 。

7.9.4 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(42):

$$x_{(2)} = \text{Im} \left\{ \frac{j}{\frac{1}{2} \left[\frac{1}{x_d(jS)_{s=2}} + \frac{1}{x_q(jS)_{s=2}} \right]} \right\} \dots\dots\dots (42)$$

7.10 电枢漏抗

电枢漏抗可以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 6.22)确定漏抗 X_σ , 按公式(43)计算:

$$X_\sigma = X_a - X_b \dots\dots\dots (43)$$

转子移除时的总漏抗 X_a 按公式(44)确定:

$$X_a = \sqrt{Z^2 - R^2}, Z = \frac{U}{\sqrt{3}I}, R = \frac{P}{3I^2} \dots\dots\dots (44)$$

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 6.22 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(45)计算:

$$X_b = \frac{U_c}{I} \cdot \frac{Nk_w}{N_c} \dots\dots\dots (45)$$

——对于分数槽绕组, 按公式(46)计算:

$$X_b = \frac{U_c}{I} \cdot \frac{Nk_w}{N_c \cdot \sin\left(\frac{q'}{3q} \cdot \frac{\pi}{2}\right)} \dots\dots\dots (46)$$

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: 文献也提供了一个从电机设计参数计算 X_b 的公式, 但本试验方法为优选方法。

7.11 保梯电抗

保梯电抗按图 17 用作图法来确定。

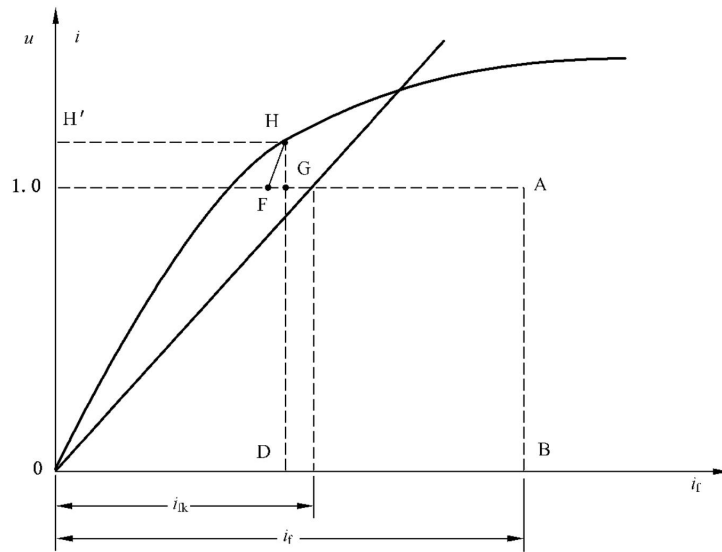


图 17 确定保梯电抗

将空载饱和特性和三相稳态短路特性按 7.1.1 绘制在同一图上。从试验(见 6.26)得到的 i_t , 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, $x_p = HG$ 。

7.12 零序电阻

7.12.1 从三相绕组外施单相电压试验确定

按 7.8.1 从试验(见 6.17)一并确定零序电阻 $R_{(0)}$ 、 $Z_{(0)}$ 和 $X_{(0)}$ 。

7.12.2 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(47)用几个中性线电流值计算零序电阻 $R_{(0)}$:

$$R_{(0)} = \frac{U_0^2}{P} \cdot \frac{P^2}{P^2 + Q^2}; \left[r_{(0)} = \frac{u_0^2}{p} \cdot \frac{p^2}{p^2 + q^2} \right] \dots\dots\dots (47)$$

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。

7.13 正序电枢绕组电阻

从已知的损耗, 包括按 IEC 60034-2-1 测定的额定电流时电枢绕组的 $P_{cu} = 3I^2 R_a$ 和附加负载损耗(杂散损耗) P_{LL} , 按公式(48)计算:

$$R_{(1)} = \frac{P_{cu} + P_{LL}}{3I_N^2}; [r_{(1)} = p_{cu} + p_{LL}] \dots\dots\dots (48)$$

$R_{(1)}$ 值对应的温度为测定损耗时的绕组温度。

7.14 负序电阻

7.14.1 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(49)计算:

$$R_{(2)} = \frac{U^2}{Q} \cdot \frac{Q^2}{P^2 + Q^2} \cdot \frac{1}{\sqrt{3}}; \left[r_{(2)} = \frac{u^2}{q} \cdot \frac{q^2}{p^2 + q^2} \cdot \frac{1}{\sqrt{3}}; \right] \dots\dots\dots (49)$$

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。

7.14.2 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(50)计算:

$$X_{(2)} = \sqrt{Z_{(2)}^2 - R_{(2)}^2}; Z_{(2)} = \frac{U}{\sqrt{3}I}; R_{(2)} = \frac{P}{3I^2}; \left[x_{(2)} = \sqrt{z_{(2)}^2 - r_{(2)}^2}; z_{(2)} = \frac{u}{i}; r_{(2)} = \frac{p}{i^2}; \right] \quad (50)$$

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。

7.15 电枢绕组电阻和励磁绕组电阻

采用电压电流表法(见 6.3)时,绕组电阻按公式(51)计算:

$$R_a = \frac{U}{I}; \left[r_a = 3 \cdot \frac{u}{i} \right] \dots\dots\dots (51)$$

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(52)计算:

$$R_1 = \frac{R_{12} + R_{31} - R_{23}}{2} \dots\dots\dots (52)$$

——对三角绕组,按公式(53)计算:

$$R_1 = \frac{2R_{12} \cdot R_{23}}{R_{12} + R_{23} - R_{31}} - \frac{R_{12} + R_{23} - R_{31}}{2} \dots\dots\dots (53)$$

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。

7.16 直轴瞬态短路时间常数

7.16.1 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。

7.16.2 从静态直流衰减试验确定

按 7.1.4 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。

7.17 直轴瞬态开路时间常数

7.17.1 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 6.21.1 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。

7.17.2 由静态下电枢绕组开路时的励磁电流衰减试验确定

按 6.21.2 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。

7.17.3 从电压恢复试验确定

按 6.12 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。

7.17.4 从静态下直流衰减试验确定

按 7.1.4 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。

7.18 直轴超瞬态短路时间常数

从三相突然短路试验确定 τ''_d ,是电枢电流的暂变分量衰减到其初始值的 $1/e$,即 0.368 倍时所需的时间(见 7.1.2)。

7.19 直轴超瞬态开路时间常数

7.19.1 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 7.1.2 确定的暂变分量 $\Delta U''$ 衰减到其初始值的 $1/e$,即 0.368 倍时所需的时间。

7.19.2 从静态下直流衰减试验确定

按 7.1.4 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。

7.20 交轴瞬态短路时间常数

7.20.1 从试验值计算确定

从试验值 x_q 、 x'_q 和 τ'_{q0} 按公式(54)计算确定交轴瞬变短路时间常数:

$$\tau'_q = \tau'_{q0} \cdot \frac{x'_q}{x_q} \dots\dots\dots (54)$$

7.20.2 从静态下直流衰减试验确定

与 7.19.2 一样,按 7.1.4 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。

7.21 交轴瞬态开路时间常数

7.21.1 从静态下直流衰减试验确定

按 7.1.4 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。

7.22 交轴超瞬态短路时间常数

7.22.1 从试验值计算确定

从试验值 x'_q (见 7.6.1)、 x''_q (见 7.7) 和 τ''_{q0} (见 7.23) 按公式(55) 计算确定交轴超瞬态短路时间常数:

$$\tau''_q = \tau''_{q0} \cdot \frac{x''_q}{x_q} \quad \dots\dots\dots (55)$$

7.22.2 从静态下直流衰减试验确定

按 7.1.4 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。

7.23 交轴超瞬态开路时间常数

同样按 7.1.4 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。

7.24 电枢短路时间常数

7.24.1 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, 时间常数不能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 0.4 倍, 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。

7.24.2 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 7.9) 和 R_a (见 7.15) 按公式(56) 计算确定:

$$\tau_a = \frac{X_{(2)}}{2\pi \cdot f_N \cdot r_a} \quad \dots\dots\dots (56)$$

使用饱和值 $X_{(2)}$ 。

7.25 额定加速时间和储能常数

从空载自减速试验(见 6.23) 确定电机加速时间和储能常数时, 按公式(57) 计算:

$$\tau_J = \omega_N \frac{\Delta t}{\Delta \omega} \cdot \frac{P_{\text{mech}} + P_{\text{Fe}}}{P_N}; H = \frac{\omega_N}{2} \cdot \frac{\Delta t}{\Delta \omega} \cdot \frac{P_{\text{mech}} + P_{\text{Fe}}}{S_N} \quad \dots\dots\dots (57)$$

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(kVA)。

7.26 额定励磁电流

7.26.1 直接测定

额定励磁电流 I_N 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 6.2)运行过程中直接测量确定额定励磁电流。

7.26.2 保梯图

用保梯图确定额定励磁电流,要用到空载饱和特性(见 6.4.2)、稳态短路特性(见 6.5.2)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 18)。

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。

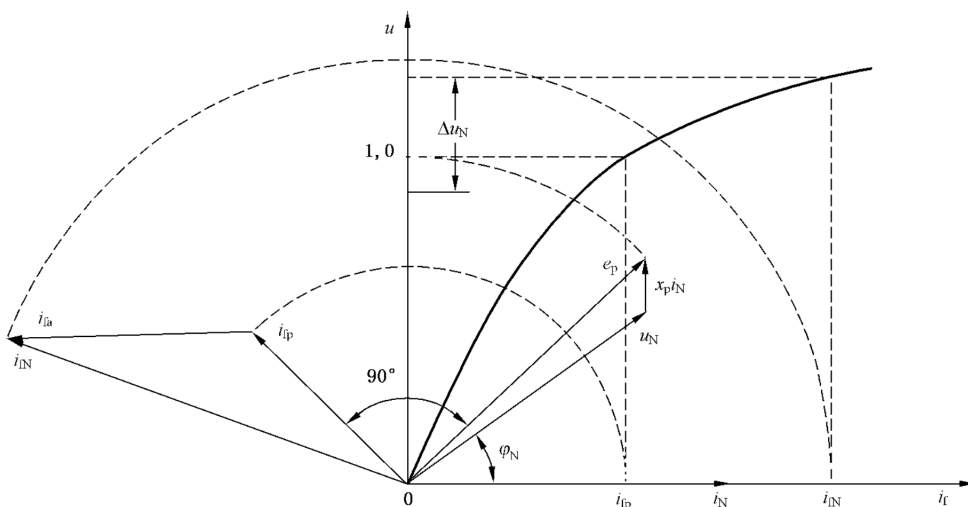


图 18 保梯图

对于发电机,该向量宜如图 18 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 17)。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_N 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 的电机则可以在作图 18 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(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 6.22)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 。

7.26.3 ASA 图

用 ASA 向量图确定额定励磁电流,要用到空载饱和特性(见 6.4.2)、稳态短路特性(见 6.5.2)和保

梯电抗 X_p 。

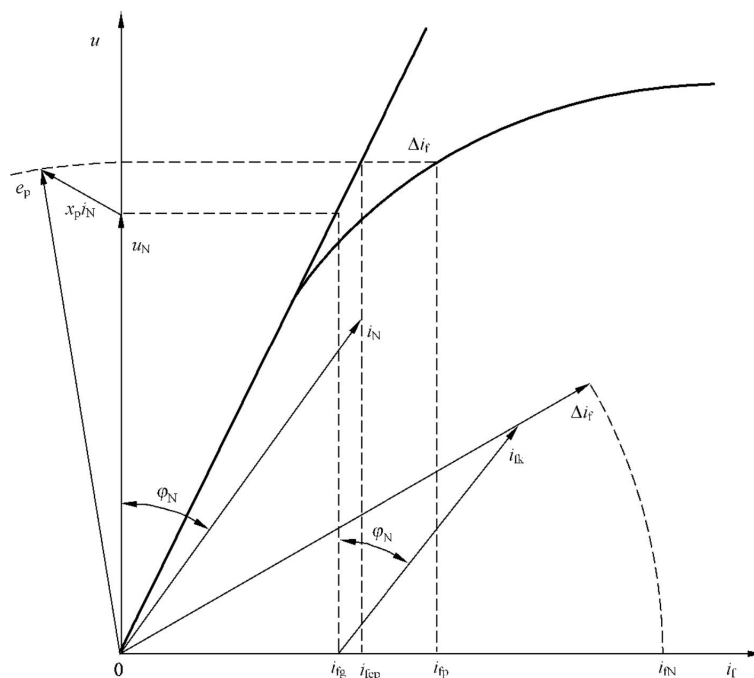


图 19 ASA 图

按 7.1.1 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_{ig} 。由原点沿横坐标作电流 i_{ig} 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_{ik} (见 7.1.1) 向量。

Δi_f 为空载饱和特性上对应电压 e_p (见图 19) 的励磁电流 i_{ip} 和气隙线上对应同一电压 e_p 的励磁电流 i_{iep} 的差, 沿这些励磁电流 (i_{ig} 、 i_{ik}) 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。

额定励磁电流也可以用公式 (58) 计算确定 (按标幺值或物理值):

$$i_{fN} = \Delta i_f + \sqrt{(i_{ig} + i_{ik} \sin \varphi_N)^2 + (i_{ik} \cos \varphi_N)^2} \quad \dots\dots\dots (58)$$

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 19 时可以用 ax_a (见 7.26.2) 来代替。

7.26.4 瑞典图

用瑞典图确定额定励磁电流, 要用到空载饱和特性 (见 6.4.2)、三相稳态短路特性 (见 6.5.2) 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 6.7)。

在横坐标轴上量取三个励磁电流值 (见图 20):

- OD 为空载特性上对应额定电压的励磁电流;
- OB 为对应零功率因数时额定电压和电枢电流的励磁电流;
- OC 为稳态短路特性上对应额定电枢电流的励磁电流。

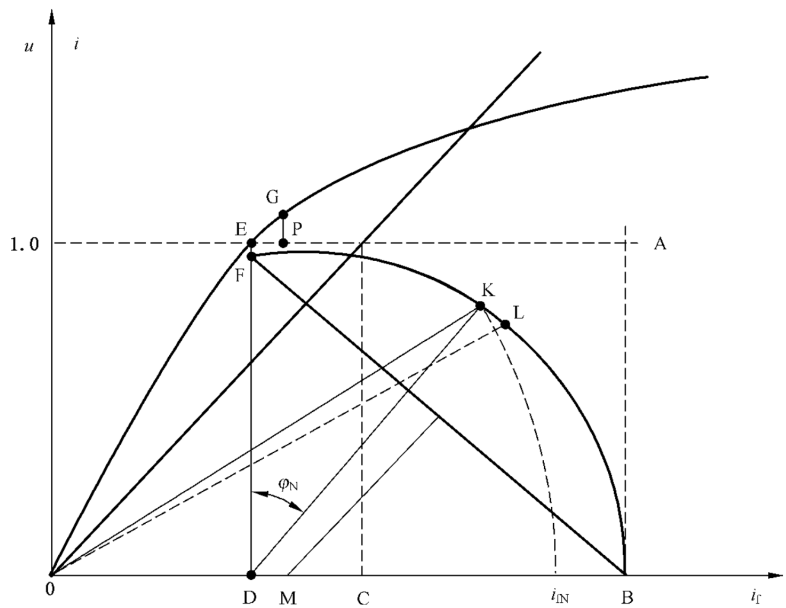


图 20 瑞典图

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, 可按下列方法计及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 ax_a 压降 (见 7.26.2) 加在额定电枢电压上 (见图 17 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 17)。D 点向右, 沿横坐标轴加上 i_{ta} 向量 (长度为 DB)。励磁电流等于 OB 的长度, 就是作瑞典图时所要用的电流。

7.27 额定电枢稳态短路电流对应的励磁电流

7.27.1 从三相稳态短路试验确定

从 6.5 试验, 如图 8 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。

7.27.2 从零功率因数过励试验确定

在额定电枢电流 i_N 下进行 6.26 试验, 将试验点以电压对励磁电流的关系作图, 见图 21。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 7.1.1) 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。

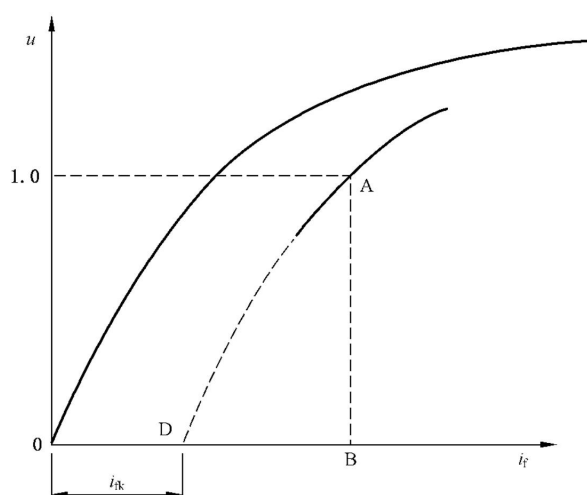


图 21 从零功率因数过励试验确定励磁电流

7.28 频率响应特性

7.28.1 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(59)和公式(60)表达:

$$u_d(p) = [r + px_d(p)] \cdot i_d(p) + G(p) \cdot i_f(p) \quad \dots\dots\dots (59)$$

$$u_q(p) = [r + px_q(p)] \cdot i_q(p) \quad \dots\dots\dots (60)$$

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(61):

$$F(p) = \int_0^{\infty} f(t) e^{-pt} dt \quad \dots\dots\dots (61)$$

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

7.28.2 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(62)、公式(63)和公式(64)计算阻抗、电阻和电抗:

$$Z(s) = \frac{U_{av}}{\sqrt{3} I_{av}}; \left[z(s) = \frac{u_{av}}{i_{av}} \right] \quad \dots\dots\dots (62)$$

$$R(s) = \frac{P_{av}}{\sqrt{3} I_{av}^2}; \left[r(s) = \frac{p_{av}}{i_{av}^2} \right] \quad \dots\dots\dots (63)$$

$$X(s) = \sqrt{Z^2(s) - R^2(s)}; \left[x(s) = \sqrt{z^2(s) - r^2(s)} \right] \quad \dots\dots\dots (64)$$

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总和的一半加上零转差率时同步电抗总和的一半。

对每个转差率下的阻抗的平均值按图 22 作图。最好在同一图上作功率因数对转差率的曲线。

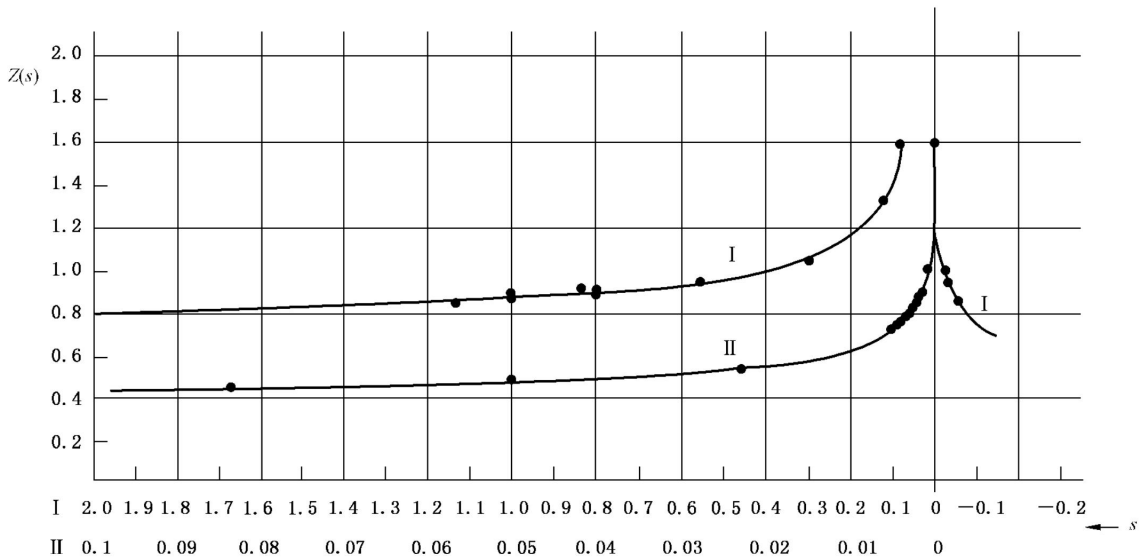


图 22 低频时的频率响应特性(示例)

7.28.3 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 6.27),则静态下的回路阻抗按公式(65)确定:

$$Z_{\text{stat}}(js) = \frac{U(js)}{I(js)} \cdot K_{\text{con}} \quad \dots\dots\dots (65)$$

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 ——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 ——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(66)计算确定:

$$Z(js) = \frac{Z_{\text{stat}}(js) - R_{1s}}{s} + R_1 \quad \dots\dots\dots (66)$$

式中:

$Z_{\text{stat}}(js)$ ——同上;

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(67)计算:

$$R_{1s} \approx R_s \left[1 + \left(R_1 - R_a \left(\frac{f}{f_N} \right)^2 \right) \right] \quad \dots\dots\dots (67)$$

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(68)计算:

$$Y(js) = \frac{1}{Z(js)} \quad \dots\dots\dots (68)$$

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(69)和公式(70)计算:

$$X(js) = \text{im} [Z_{\text{stat}}(js)] \frac{|Z_{\text{stat}}(js)| \sin \varphi}{s} \dots\dots\dots (69)$$

$$R(js) = \text{Re} [Z_{\text{stat}}(js)] + R_1 = \frac{|Z_{\text{stat}}(js)| \cos \varphi - P_{1s}}{s} + R_1 \dots\dots\dots (70)$$

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。

7.28.4 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。利用按 7.1.4 从 6.14 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按公式(71)确定。

$$r = r_a + K_{\text{con}} \Delta r \dots\dots\dots (71)$$

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。

7.29 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 8),按公式(72)计算:

$$K_c = \frac{OD}{OH} = \frac{i_{f0}}{i_{fk}} \dots\dots\dots (72)$$

7.30 额定电压调整率

7.30.1 直接测定

从直接测量来确定额定电压调整率(见 6.2)。

7.30.2 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 6.4)和按 7.26 求得的额定励磁电流 I_{IN} 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。

7.31 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 6.24)按公式(73)确定:

$$Z_{\text{st}} = \frac{U}{\sqrt{3} I_{\text{av}}}; \left[z_{\text{st}} = \frac{u}{i_{\text{av}}} \right] \dots\dots\dots (73)$$

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(74)和公式(75)确定:

$$R_{\text{st}} = \frac{P}{3 I_{\text{av}}^2}; \left[r_{\text{st}} = \frac{p}{i_{\text{av}}^2} \right] \dots\dots\dots (74)$$

$$X_{\text{st}} = \sqrt{Z_{\text{st}}^2 - R_{\text{st}}^2}; \left[x_{\text{st}} = \sqrt{z_{\text{st}}^2 - r_{\text{st}}^2} \right] \dots\dots\dots (75)$$

附录 A

(规范性)

试验交叉引用

同步电机各参数及其试验方法的关系见表 A.1。

表 A.1 交叉引用表

试验		参数	
章条	简述	简述	章条
6.2	直接测定	额定励磁电流 i_{fN}	7.26.1
		额定电压调整率 ΔU_N	7.30.1
6.3	电压表电流表法或电桥法	电枢电阻 R_a	7.15
		励磁绕组电阻 R_f	7.15
6.4.2	采用空载饱和特性和已知 i_{fN} 的作图法	额定电压调整率 ΔU_N	7.30.2
6.4 和 6.5	空载饱和、三相稳态短路	直轴同步电抗 X_d	7.2.1
		保梯电抗 X_p	7.11
		额定电枢短路电流时的励磁电流 i_{fk}	7.27.1
		短路比 K_c	7.29
6.6	电动机空载试验	直轴同步电抗 X_d	7.2.2
6.7	零功率因数过励	额定励磁电流(瑞典图)	7.26.4
6.8	反励磁	交轴同步电抗 X_q	7.5.1
6.9	负载测量功角	直轴同步电抗 X_d	7.2.3
		交轴同步电抗 X_q	7.5.3
6.10	低转差率	交轴同步电抗 X_q	7.5.2
6.11	三相突然短路	直轴瞬态电抗 X'_d	7.3.1
		直轴超瞬态电抗 X''_d	7.4.1
		直轴瞬态短路时间常数 τ'_d	7.16.1
		直轴超瞬态短路时间常数 τ''_d	7.18
		电枢短路时间常数 τ_a	7.24.1
6.12	电压恢复	直轴瞬态电抗 X'_d	7.3.2
		直轴超瞬态电抗 X''_d	7.4.2
		直轴瞬态开路时间常数 τ'_{do}	7.17.3
		直轴超瞬态开路时间常数 τ''_{do}	7.19.1
6.13	切断电源线后三相突然短路	见 6.11	
6.14	静态下电枢绕组的直流衰减,从试验值计算	直轴瞬态电抗 X'_d	7.3.3
		交轴瞬态电抗 X'_q	7.6.1
		负序电抗 $X_{(2)}$	7.9.4

表 A.1 交叉引用表 (续)

试验		参数	
章条	简述	简述	章条
6.14	静态下电枢绕组的直流衰减,从试验值计算	直轴瞬态短路时间常数 τ'_d	7.16.2
		直轴瞬态开路时间常数 τ'_{do}	7.17.4
		直轴超瞬态开路时间常数 τ''_{do}	7.19.2
		交轴瞬态短路时间常数 τ'_q	7.20.2
		交轴瞬态开路时间常数 τ'_{qo}	7.21
		交轴超瞬态短路时间常数 τ''_q	7.22.2
		频率响应特性	7.28.4
6.15	转子处于直轴和交轴位置时的外施电压试验	交轴超瞬态电抗 X''_q	7.7.1
		直轴超瞬态电抗 X''_d	7.4.3
6.16	转子处于任意位置时的外施电压试验	直轴超瞬态电抗 X''_d	7.4.4
		交轴超瞬态电抗 X''_q	7.7.2
6.17	三相绕组外施单相电压	零序电抗 $X_{(0)}$	7.8.1
		零序电阻 $R_{(0)}$	7.12.1 (7.8.1)
6.18	两相稳态短路	负序电抗 $X_{(2)}$	7.9.1
		负序电阻 $R_{(2)}$	7.14.1
6.19	两相对中性点稳态短路	零序电抗 $X_{(0)}$	7.8.2
		零序电阻 $R_{(0)}$	7.12.2
6.20	逆相序	负序电抗 $X_{(2)}$	7.9.2
		负序电阻 $R_{(2)}$	7.14.2
6.21.1	额定转速下电枢绕组开路时的励磁电流衰减	直轴瞬态开路时间常数 τ'_{do}	7.17.1
6.21.2	静态下电枢绕组开路时的励磁电流衰减	直轴瞬态开路时间常数 τ'_{do}	7.17.2
6.22	转子移除时外施电压	电枢漏抗 X_σ	7.10
6.23	空载自减速	加速时间 τ_J , 储能常数 H	7.25
6.24	堵转	同步电动机的初始起动阻抗 Z_{st}	7.31
6.25	降压异步运行	频率响应特性	7.28.2
6.26	零功率因数过励和可调电枢电压	额定电枢短路电流时的励磁电流 i_{fk}	7.27.2
6.27	静态下外施可调频率电压	频率响应特性	7.28.3

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 $\alpha_k = 0$ 。拉普拉斯变换可以表达为 p 的多项式函数。

B.2 参数计算

从 6.14 和 7.1.4 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 7.1.4 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 $-a_1$ 、 $-a_2$ 、 \cdots 、 $-a_n$ 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 $-a'_1$ 、 $-a'_2$ 、 \cdots 、 $-a'_n$ 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：

$$X_d = r \sum_{k=1}^{n+1} \frac{i_{kd}}{\lambda_{kd}} \dots\dots\dots (B.17)$$

$$X_q = r \sum_{l=1}^{m+1} \frac{i_{lq}}{\lambda_{lq}} \dots\dots\dots (B.18)$$

$$X''_d = \frac{r}{\sum_{k=1}^{n+1} i_{kd} \lambda_{kd}} \dots\dots\dots (B.19)$$

$$X''_q = \frac{r}{\sum_{l=1}^{m+1} i_{lq} \lambda_{lq}} \dots\dots\dots (B.20)$$

式中：

r ——按 7.28.4 确定。

附录 C

(规范性)

常用电机模型

以帕克方程为基础,电机可以用直、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;此模型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。

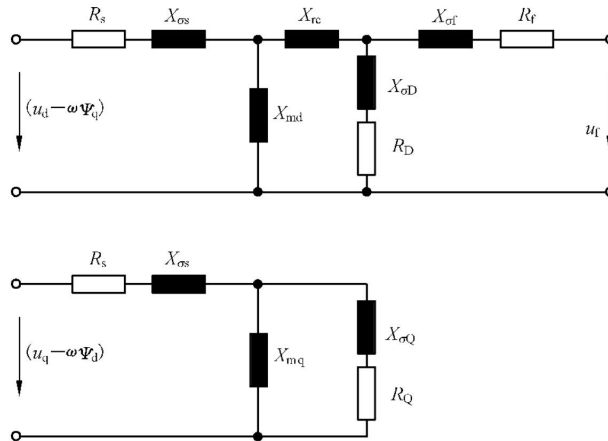


图 C.1 凸极电机的等值电路模型

磁链定义见公式(C.1):

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

其中各电抗分量按公式(C.2)~公式(C.6)进行计算:

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

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

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

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

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

注 2: 耦合电抗值 X_{rc} 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 $X_{rc}=0$ 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:

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

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

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

——时间常数按公式(C.10)~公式(C.15)进行计算:

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

$$\tau_{\text{kd}0} = \frac{X_{\text{D}}}{\omega R_{\text{D}}}; \tau_{\text{kd}} = \frac{X_{\text{D}} - X_{\text{md}}^2/X_{\text{d}}}{\omega R_{\text{D}}} \dots\dots\dots (\text{C.11})$$

$$\tau'_{\text{d}0} = \frac{X_{\text{f}}}{\omega R_{\text{f}}}; \tau''_{\text{d}0} = \frac{X_{\text{D}} - X_{\text{md}}^2/X_{\text{f}}}{\omega R_{\text{D}}} \dots\dots\dots (\text{C.12})$$

$$\tau'_{\text{d}} = \frac{X'_{\text{d}}}{X_{\text{d}}} \tau_{\text{fd}0}; \tau''_{\text{d}} = \frac{X''_{\text{d}}}{X'_{\text{d}}} \tau''_{\text{d}0} \dots\dots\dots (\text{C.13})$$

$$\tau''_{\text{q}0} = \frac{X_{\text{Q}}}{\omega R_{\text{Q}}} \dots\dots\dots (\text{C.14})$$

$$\tau''_{\text{q}} = \frac{X''_{\text{q}}}{X'_{\text{q}}} \tau''_{\text{q}0} \dots\dots\dots (\text{C.15})$$

注 4：图 C.1 提供的电路模型无瞬态交轴参数。此时， $n_{\text{d}}=3$ ； $n_{\text{q}}=2$ 。

参 考 文 献

- [1] GB/T 2900.25—2008 电工术语 旋转电机
-

中 华 人 民 共 和 国
国 家 标 准

确定电励磁同步电机参数的试验方法

GB/T 40294—2021/IEC 60034-4-1:2018

*

中国标准出版社出版发行
北京市朝阳区和平里西街甲2号(100029)
北京市西城区三里河北街16号(100045)

网址: www.spc.org.cn

服务热线: 400-168-0010

2021年5月第一版

*

书号: 155066 · 1-67578

版权专有 侵权必究



GB/T 40294-2021



码上扫一扫 正版服务到