

ICS 29.020
K 04
备案号: 37371-2012

DL

中华人民共和国电力行业标准

DL / T 1167 — 2012

同步发电机励磁系统建模导则

Guide for modeling generator excitation system

2012-08-23 发布

2012-12-01 实施

国家能源局 发布

目 次

前言..... II

1 范围..... 1

2 规范性引用文件..... 1

3 术语与定义..... 1

4 建模技术原则..... 2

5 对励磁设备的要求..... 3

6 资料 and 数据的准备..... 3

7 励磁系统的标么值..... 4

8 励磁调节器环节特性辨识的基本方法..... 4

9 励磁系统实测数学模型的建立..... 5

10 模型的选择及参数处理方法..... 17

11 励磁系统模型参数的现场试验校核..... 17

12 近似计算模型的校核..... 19

13 励磁系统建模报告主要内容..... 20

附录 A（规范性附录） 限幅的表达..... 22

附录 B（资料性附录） 低励限制模型..... 23

附录 C（资料性附录） 过励限制模型..... 25

附录 D（资料性附录） 发电机饱和系数的计算..... 27

前 言

本标准按照 GB/T 1.1—2009 起草。

本标准由中国电力企业联合会提出。

本标准由全国电网运行与控制标准化技术委员会归口。

本标准起草单位：浙江省电力公司、浙江省电力公司电力科学研究院、中国电力科学研究院、国家电力调度控制中心、华北电力科学研究院有限公司、广东电网电力科学研究院、华东电力试验研究院有限公司、南方电网科学研究院、华东电力调控分中心和广东电力调度通信中心。

本标准主要起草人：陈新琪、刘增煌、周济、倪秋龙、苏为民、陈迅、赵红光、濮钧、卢嘉华、张伟、曹路、郭强、孙维真、楼伯良、吴涛、盛超、吴跨宇、叶琳、赵勇、李扬絮。

本标准在执行过程中的意见或建议反馈至中国电力企业联合会标准化管理中心（北京市白广路二条一号，100761）。

同步发电机励磁系统建模导则

1 范围

本标准规定了电力系统稳定分析计算用的同步发电机励磁系统数学模型的建立方法。
本标准适用于汽（燃气）轮发电机、水轮发电机、抽水蓄能发电/电动机和核电机组励磁系统建模。

2 规范性引用文件

下列文件对于本文件的应用是必不可少的。凡是注日期的引用文件，仅注日期的版本适用于本文件。
凡是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 7409（所有部分） 同步电机励磁系统 [IEC 34-16（所有部分）]
- DL/T 583 大中型水轮发电机静止整流励磁系统及装置技术条件
- DL/T 843 大型汽轮发电机励磁系统技术条件

3 术语与定义

下列术语与定义适用于本标准。

3.1

原始模型 primary model

由制造厂提供或根据制造厂提供的资料推导出的模型结构及参数。

3.2

实测模型 measured model

参照原始模型进行模型和参数实测后，所得到的实际模型结构及参数。

3.3

计算模型 calculating model

用于稳定计算的模型结构及参数。

- a) 等同计算模型 (identical calculating model) ——与实测模型结构一致、通过仿真校核确认满足要求的计算模型结构及参数。
- b) 近似计算模型 (similar calculating model) ——与实测模型结构有一定差别、通过计算程序仿真、参数调整后基本满足要求的用于稳定计算的模型结构及参数。

3.4

阶跃试验 step test

被控量的给定值阶跃变化的试验。

3.5

阶跃量 step value

阶跃试验中，被控量的最终稳态值与初始值之差。

3.6

超调量 overshoot

阶跃试验中，被控量的最大值与最终稳态值之差相对于阶跃量的百分数。

3.7

起始时间 start time

阶跃信号加入时刻。

3.8

上升时间 upward time

阶跃试验中，从起始时间 t_0 到被控量的变化值初次达到 90% 阶跃量的时间。

3.9

峰值时间 peak time

阶跃试验中，从起始时间 t_0 到被控量的变化值达到最大值的时间。

3.10

调节时间 settling time

阶跃试验中，从起始时间 t_0 到被控量的变化值与阶跃量之差的绝对值小于阶跃量的 5%（图 1 中 C 点）所需时间。

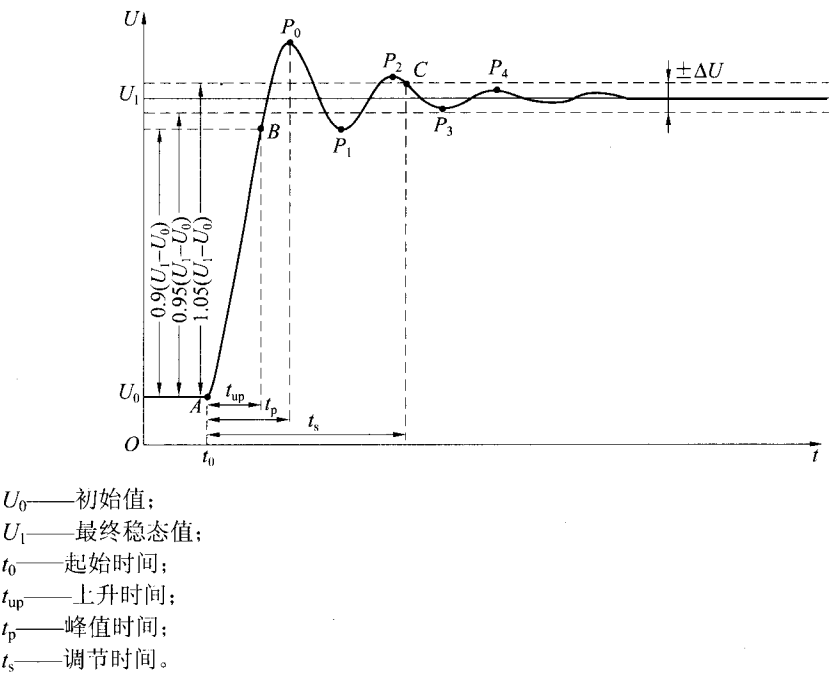


图 1 阶跃响应特性示例曲线

3.11

振荡次数 number of oscillation

在调节时间内被控量的振荡次数。

3.12

频域测量法 frequency-domain measuring

在输入端加入不同频率的正弦信号或噪声信号，测量输出端对于输入端的频率响应特性，采用幅频与相频特性直接对比或者曲线拟合技术来辨识模型及其参数的方法。

3.13

时域测量法 time-domain measuring

在输入端加入扰动信号，一般为阶跃信号，测量输出的时域响应特性，通过分析环节结构与参数，并将仿真的时域响应特性曲线与实测结果进行比较从而辨识模型及其参数的方法。

4 建模技术原则

4.1 励磁系统部件的模型应符合 GB/T 7409 的要求。励磁系统的参数实测与建模工作在励磁系统现场

试验调试合格后进行。

4.2 新投产发电机组励磁系统参数实测与建模试验应在机组正式商业运行前完成。励磁系统发生设备改造、软件升级、参数修改等时，应上报调度机构及励磁监督单位备案并按要求重新安排测试。对于不影响模型的参数修改，上报调度机构及励磁监督单位备案即可。

4.3 通过现场测试和辨识建立实测模型。

4.4 根据实测模型建立计算模型。计算模型应能够满足所在电网调度机构采用的电力系统仿真计算程序的使用要求。

4.4.1 等同计算模型可以是电力系统计算程序中的固定模型，也可以是其自定义模型。进行发电机空载阶跃的仿真，与试验结果对比确定等同计算模型与参数。

4.4.2 在计算程序中没有与实测模型结构基本一致的模型时，选择与实际励磁系统结构最为接近的模型，并通过参数调整使其特性与试验结果基本一致，由此得到近似计算模型。对近似计算模型，要求进行发电机负载扰动下的校核计算。

4.5 进行稳定计算至少应提供自动电压调节器、电力系统稳定器（PSS）、调差特性及强励限制数学模型和参数，进行电压稳定计算和中、长期稳定计算还应当提供低励限制（UEL）、过励限制（OEL）以及伏赫限制数学模型和参数。

5 对励磁设备的要求

对励磁设备的要求如下：

- 在设计、型式试验阶段应进行产品数学模型参数的确认，该设备应通过产品技术鉴定；
- 应提供调节器的数学模型参数（包括电压调节器和各个附加环节）和励磁设备技术数据，励磁系统应符合 GB/T 7409、DL/T 583、DL/T 843 等标准的要求；
- 调节器应具备符合标准规定的、能供第三方进行数学模型参数测试所需的接口；
- 调节器的设置值应以十进制表示，时间常数以秒表示，放大倍数和限幅值以标么值表示，并说明标么值的基准值确定方法；
- 调节器采用的三相全控桥整流器应采用反余弦移相，以保证在不同工况下放大倍数均为恒定值；
- 励磁调节器应在定型生产前完成环节编程正确性检查，或者同类型励磁调节器在其他机组励磁系统建模中已经验证其环节参数正确，否则应通过环节特性测辨方法（参照第 8 章）确认 PID 和软反馈校正环节的模型参数。

6 资料 and 数据的准备

应根据励磁系统类型收集下述资料和数据：

- 励磁变压器额定容量、一次和二次额定电压、短路电抗；
- 直流励磁机空载特性曲线、负载特性曲线、额定电压、额定电流、励磁绕组时间常数、励磁方式、励磁绕组电阻等；
- 交流励磁机额定容量、额定电压、额定电流、额定功率因数、额定磁场电压和电流、空载和负载特性曲线、电枢开路时励磁绕组时间常数 T'_{d0c} 、励磁方式、励磁绕组电阻、同步电抗 X_{dc} 、次暂态电抗 X''_{dc} 和负序电抗 X_{2c} ；
- 副励磁机额定容量、额定电压、额定电流、额定功率因数、额定频率、外特性曲线、空载电压、发电机输出额定电流时的机端电压、发电机输出强励电流时的机端电压；
- 发电机空载特性曲线、发电机定子开路励磁绕组的时间常数 T'_{d0} 等各时间常数、各电抗值、机组转动惯量、额定电压、额定电流、额定视在功率、额定功率因数、额定磁场电压、额定磁场电流、空载额定磁场电压、空载额定磁场电流、在规定温度下的励磁绕组电阻值；

f) 励磁系统功能说明、投产试验报告以及各个环节的整定参数。

7 励磁系统的标么值

励磁系统的标么值按下列要求计算：

- a) 标么值是由实际值除以基准值得到的。
- b) 发电机电压的基准值 U_B 为发电机额定电压，发电机电流的基准值 I_B 为发电机额定电流，发电机功率的基准值 S_B 为发电机额定视在功率，发电机转速（频率）的基准值 $n_B(f_B)$ 为发电机额定转速（频率）。
- c) 发电机磁场电流的基准值 I_{fB} 为发电机空载特性气隙线上产生额定电压所需的磁场电流；发电机磁场绕组电阻的基准值 R_{fB} 为发电机额定工况下发电机励磁回路电阻，也可取为发电机额定磁场电压除以额定磁场电流的数值；发电机磁场电压的基准值 U_{fB} 为磁场电流的基准值乘以磁场绕组电阻的基准值。
- d) 励磁机磁场电流的基准值 I_{efB} 为在励磁机空载特性曲线气隙线上产生一个标么值发电机磁场电压所要求的励磁机磁场电流值；励磁机励磁电阻的基准值 R_{efB} 为发电机额定工况下的励磁机励磁回路的电阻，也可取励磁机额定磁场电压除以励磁机额定磁场电流并考虑回路阻值作为励磁机励磁电阻的基准值 R_{efB} （后者应在参数确认报告中说明，我国存在“大马拉小车”现象，故后者计算误差很大，也可在报告中提出本条款要求）；励磁机磁场电压的基准值 U_{efB} 为励磁机磁场电流基准值乘以励磁机励磁绕组电阻基准值。
- e) 调节器的输入电压、电流和功率的基准值等于发电机电压、电流和功率的基准值。当控制发电机磁场电压时调节器输出电压基准值等于发电机磁场电压的基准值、调节器输出电流基准值等于发电机磁场电流的基准值，当控制励磁机磁场电压时调节器输出电压基准值等于励磁机磁场电压的基准值、调节器输出电流基准值等于励磁机磁场电流的基准值。

8 励磁调节器环节特性辨识的基本方法

8.1 概述

根据模拟式调节器的电路图或数字式调节器的传递函数框图，可以确定各部分的模型，在此基础上测试辨识其参数。根据模型的具体情况，分级测试各环节的输入、输出特性，根据测量结果和预定的计算模型拟合得到未知的参数。对励磁调节器环节特性的测试辨识一般在静态情况下进行，常用的方法有频域测量法和时域测量法，也可以同时采用频域测量和时域测量两种方法。

8.2 频域测量法

8.2.1 利用频谱分析仪，测量待辨识环节输出对于输入的频率特性，信号可采用正弦扫频或噪声信号，采用对比或拟合技术辨识模型的参数。

8.2.2 对于简单的一阶模型，可以利用已知频率特性的特征值直接计算参数。

8.2.3 对于非一阶模型，由于对象的模型结构和部分参数一般已知，可以采用参数拟合技术或采用模型的频率特性和实测的频率特性对比的方法确定模型的参数。

8.2.4 测量的频率范围应根据研究对象的特点来选择。

8.3 时域测量法

8.3.1 输入扰动信号，一般为阶跃信号，测量输出响应，采用对比输出响应特性曲线的方法辨识模型的参数。

8.3.2 对于简单的一阶惯性模型，如励磁调节器的电压和功率测量环节等，当采用阶跃响应试验法时，其输出达到稳态变化量的 0.632 倍时所需的时间就是环节的时间常数；输出稳态变化量与输入阶跃量之比，就是环节的增益。

8.3.3 对于非一阶模型，如励磁调节器的 PID 环节、超前环节、励磁调节器的软负反馈环节、励磁调节

器的励磁机时间常数补偿环节（硬负反馈环节）、PSS 环节等，可以采用时域参数辨识或采用相同的输入信号下仿真待辨识模型的响应和实测响应对比的方法来确定环节参数。

8.4 非线性环节的测量

应了解并通过实际测量来检验励磁调节器各环节（包括 PSS 环节）是否存在死区、限幅、逻辑控制（如 PSS 自动投退）、非线性环节、变参数以及是否采用反余弦移相等，要区分内限幅和外限幅两种限幅环节。限幅的表达参见附录 A。

8.5 电压调差率及其极性的测量

8.5.1 电压调差率极性的测量

在发电机发出无功功率的情况下，保持被试机组有功功率和电压给定值不变，当不是采用扩大单元接线时，从负到正调整被试验机组的无功调差率（当采用扩大单元接线时，调差系数在大于 0 的一定范围内调整），测量被试验机组的机端电压应该逐渐变低，无功功率应该逐渐变小，对于发电机—变压器组单元接线方式可确认为极性与计算程序一致；若被试验机组的机端电压逐渐变高，无功功率逐渐变大，对于发电机—变压器组单元接线方式可确认为极性与计算程序相反。

8.5.2 电压调差率的测量

8.5.2.1 方法 1

在功率因数等于 0 的情况下，保持电压给定值不变，甩掉 50%~100% 的额定无功功率，测量甩负荷前后的发电机电压，然后用式（1）计算无功调差系数。

$$D(\%) = \frac{U_{t1} - U_{t0}}{U_{tN}} \frac{I_N}{I_r} \times 100\% \tag{1}$$

式中：

- U_{t0} 、 U_{t1} ——甩负荷前后的发电机机端电压；
- U_{tN} ——发电机额定电压；
- I_r 、 I_N ——甩负荷前的发电机无功电流值和额定电流值。

8.5.2.2 方法 2

此方法可以用于被试验机组有相邻机组或无功补偿设备的情况。在发电机发出无功功率的情况下（有功功率保持不变），保持电压给定值不变，调整相邻机组或无功补偿设备的无功功率，测量调整前后被试验机组的机端电压和无功电流，然后用式（2）计算无功调差系数。

$$D(\%) = \frac{U_{t0} - U_{t1}}{U_{tN}} \frac{I_N}{I_{r1} - I_{r0}} \times 100\% \tag{2}$$

式中：

- U_{t0} 、 U_{t1} ——调整前后的发电机机端电压；
- U_{tN} ——发电机额定电压；
- I_{r0} 、 I_{r1} 、 I_N ——调整前后的发电机无功电流值和额定电流值。工程上也可以用相对应的无功功率 Q_{r0} 、 Q_{r1} 和额定视在功率 S_N 近似代替电流。

9 励磁系统实测数学模型的建立

9.1 基本步骤

- 9.1.1 收集资料，确定励磁系统数学模型类型。
- 9.1.2 根据资料情况，确定现场试验项目，编写试验方案，进行现场试验。
- 9.1.3 整理数据，建立励磁系统实测模型。

在励磁系统实测数学模型的建立过程中，需整理并提供如下数据：

- a) 各变量的基准值；

- b) 根据频域或时域测量数据确定环节参数;
- c) 建立励磁系统实测模型。

9.2 发电机励磁系统的组成

发电机励磁系统由励磁功率部分、励磁控制部分、发电机电压测量和无功电流补偿部分以及电力系统稳定器（简称 PSS）组成，如图 2 所示。

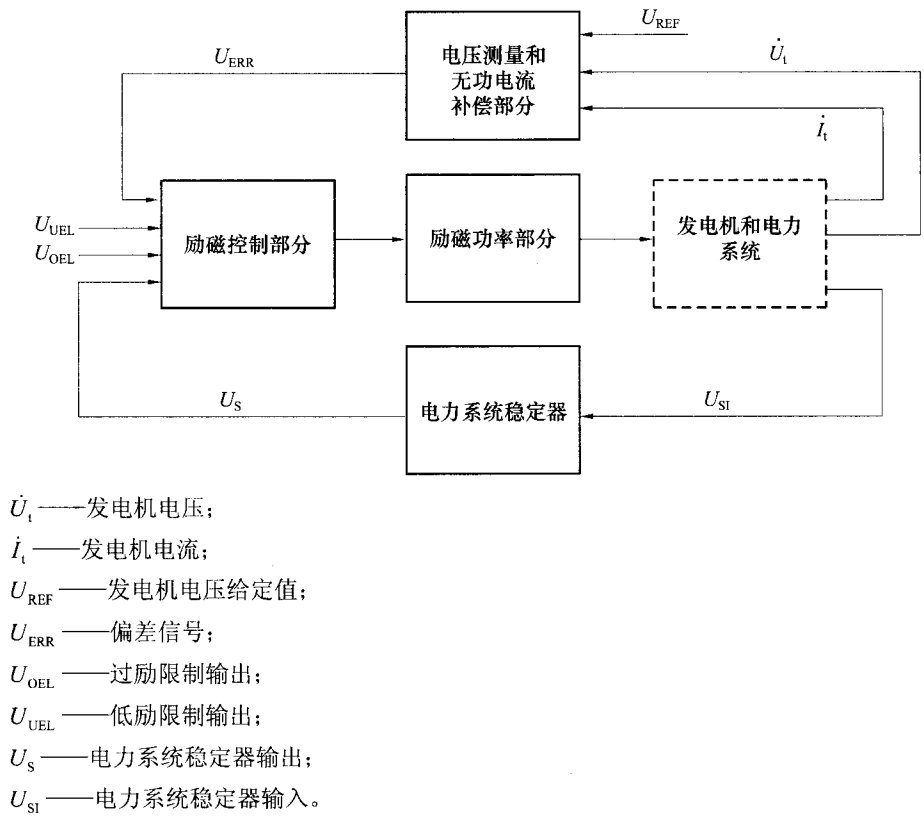


图 2 励磁系统组成

发电机电压测量和电流补偿部分形成实现控制的偏差信号。

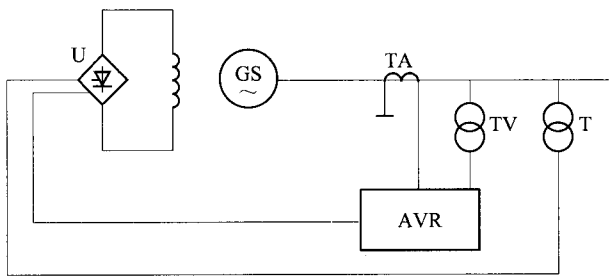
励磁控制部分实现励磁稳定控制和限制功能，由 PID 或软反馈校正环节、功率控制环节、补偿励磁机时间常数的反馈环节、顶值限制环节、过磁通（V/Hz）限制环节、过励限制环节和低励限制环节等组成。

励磁系统按照励磁功率部件不同，分为以下三种类型：

- a) 直流励磁机励磁系统;
- b) 交流励磁机励磁系统，包括静止或旋转、可控或不可控的整流器;
- c) 静止励磁系统。

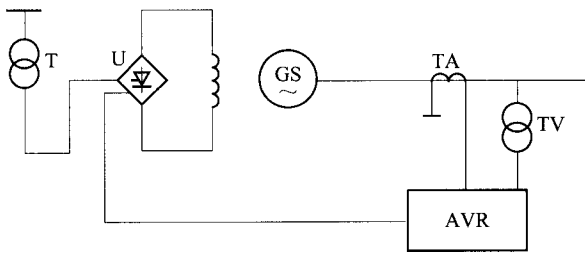
9.3 静止励磁系统功率部分数学模型

静止励磁系统包括自并励静止励磁系统、恒电压源供电的静止励磁系统和交流侧串联自复励静止励磁系统，分别如图 3、图 4 和图 5 所示。



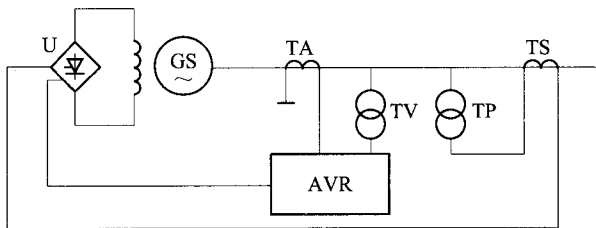
GS——同步发电机；
AVR——自动电压调节器；
T——励磁变压器；
U——可控整流器；
TV——电压互感器；
TA——电流互感器。

图 3 自并励静止励磁系统



GS——同步发电机；
AVR——自动电压调节器；
T——励磁变压器；
U——可控整流器；
TV——电压互感器；
TA——电流互感器。

图 4 恒电压源供电的静止励磁系统



GS——同步发电机；
AVR——自动电压调节器；
TP——并联变压器；
TS——串联变压器；
U——可控整流器；
TV——电压互感器；
TA——电流互感器。

图 5 交流侧串联自复励静止励磁系统

9.3.1 自并励静止励磁系统功率部分数学模型

采用三相全波可控整流和余弦移相方式的自并励静止励磁系统功率部分可建立图 6 所示的功率部分数学模型。

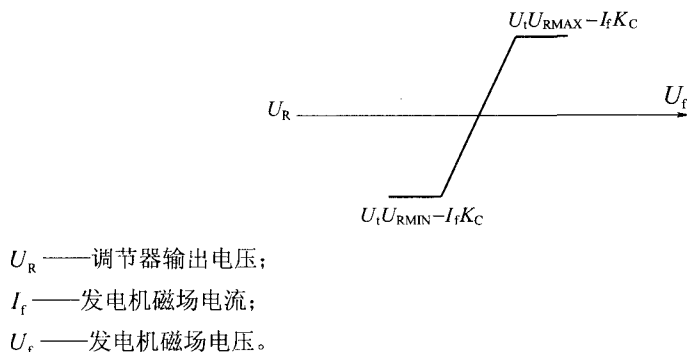


图 6 自并励静止励磁系统功率部分数学模型

U_{RMAX} 和 U_{RMIN} 分别为发电机电压为额定值时电压调节器的最大输出电压和最小输出电压, $U_t U_{RMAX}$ 和 $U_t U_{RMIN}$ 分别表示实际输出的限幅受到发电机机端电压变动的影。

9.3.1.1 换弧压降系数 K_C

$$K_C = \frac{3U_{ETK} U_{ET}^2 I_{fB}}{\pi U_{fB} S_{ETN}} \quad (3)$$

式中:

U_{ETK} ——励磁变压器短路电压, 标么值;

S_{ETN} ——励磁变压器额定容量, VA;

U_{ET} ——励磁变压器二次额定线电压, V;

I_{fB} ——磁场电流基准值, A;

U_{fB} ——磁场电压基准值, V。

9.3.1.2 调节器输出限制值 U_{RMAX} 和 U_{RMIN}

$$U_{RMIN} = 1.35 U_{ET} \cos \alpha_{MAX} / U_{fB} \quad (4)$$

$$U_{RMAX} = 1.35 U_{ET} \cos \alpha_{MIN} / U_{fB} \quad (5)$$

式中:

U_{ET} ——励磁变压器二次额定线电压, V;

α_{MAX} 、 α_{MIN} ——可控整流器的最大控制角和最小控制角, ($^\circ$);

U_{fB} ——发电机磁场电压基准值, V。

调节器输出限幅值可以通过发电机空载大扰动试验求得, 见 11.3 条。获得的磁场电压最大值需要按照同一时刻的发电机电压、磁场电流和 K_C 进行修正。

9.3.2 恒电压源静止励磁系统功率部分数学模型

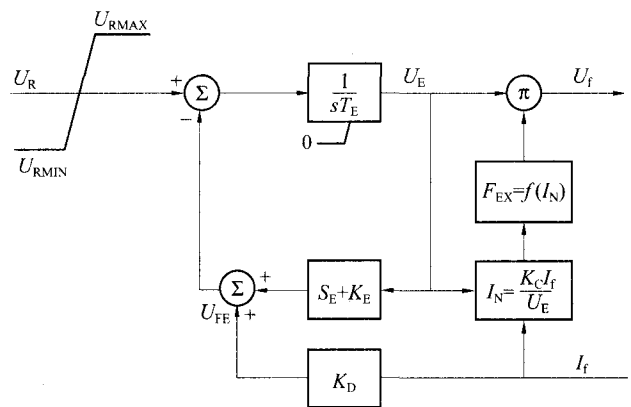
恒电压源静止励磁系统功率部分数学模型如图 7 所示。 K_C 按照式 (3) 计算, U_{RMAX} 和 U_{RMIN} 按照式 (4) 和式 (5) 计算。

9.3.3 交流侧串联自复励静止励磁系统功率部分数学模型

交流侧串联自复励静止励磁系统功率部分数学模型可采用恒电压源静止励磁系统功率部分数学模型近似模拟, 但在计算换弧压降系数时必须考虑串联变压器的漏抗。

9.4 交流励磁机励磁系统功率部分数学模型

交流励磁机励磁系统可以分为交流励磁机不可控整流器励磁系统 (见图 8 和图 9) 和交流励磁机可控整流器励磁系统 (见图 10)。



T_E ——交流励磁机的时间常数；
 S_E ——交流励磁机的饱和函数；
 K_E ——交流励磁机自励磁场的常数；
 K_D ——去磁系数，交流励磁机电抗的函数；
 K_C ——换弧压降系数；
 F_{EX} ——换向压降系数。

图 11 有副励磁机的交流励磁机不可控整流器励磁系统功率部分数学模型

为理想阶跃波形，否则将影响测试的准确性。也可以在励磁机负载条件下用频率响应法确定。对于无刷励磁系统，只能在励磁机负载条件下测试。根据不同的试验条件可采取下述测试方法：

- a) 交流励磁机在空载条件下，采用励磁调节器手动定控制角方式使交流励磁机磁场电压正向或负向阶跃，测录交流励磁机电枢电压上升或下降曲线，当变化量达到 0.632 时所需的时间即为 T_E 。
- b) 交流励磁机在空载条件下，利用手动励磁装置（感应调压器接三相不可控整流器）在励磁机电压不超过额定电压、阶跃量不小于 50% 条件下合上和拉开手动柜交流侧开关，测录交流励磁机电枢电压上升或下降曲线，当变化量达到 0.632 时所需的时间即为 T_E 。
- c) 发电机空载，励磁调节器工作在自动方式，在励磁调节器电压相加点加入噪声信号，用频谱分析仪测量交流励磁机磁场电流和磁场电压之间的频率特性，或发电机磁场电压对励磁机磁场电压的频率特性，根据交流励磁机模型辨识得到 T_E 。

9.4.1.4 换弧压降系数 K_C

以发电机磁场电流基准值对整流方程进行标么化得到：

$$K_C = \frac{3\sqrt{3}(X''_{de} + X_{2e})U_{Ne}^2 I_{fB}}{2\pi U_{fB} S_{Ne}} \tag{6}$$

式中：

- X''_{de} 和 X_{2e} ——励磁机次暂态电抗和负序电抗，标么值；
- U_{Ne} ——励磁机电枢额定线电压，V；
- S_{Ne} ——励磁机额定容量，VA；
- I_{fB} ——发电机磁场电流的基准值，A；
- U_{fB} ——发电机磁场电压的基准值，V。

整流器的换弧角小于 60° 时励磁系统输出值表示为：

$$U_f = U_E - \frac{K_C I_f}{\sqrt{3}} \tag{7}$$

9.4.1.5 交流励磁机饱和系数 S_E

S_{EMAX} 、 $S_{E0.75MAX}$ 、 S_{E0} 分别为发电机强励电压、75% 发电机强励电压和发电机额定磁场电压下的励

磁机饱和系数。由图 12 所示励磁机空载饱和曲线和空载气隙线，按照式 (8) 确定 $S_E[U_E]$ 。图 12 中的纵坐标为励磁机输出直流电压，横坐标为励磁机磁场电流，一般用标么值表示。当式 (7) 条件满足时，以式 (9) 和式 (10) 确定 $U_{E\text{MAX}}$ 和 $U_{E0.75\text{MAX}}$ 。

$$S_E(U_E) = \frac{C - B}{B} \tag{8}$$

$$U_{E\text{MAX}} = U_{E\text{MAX}}(1 + K_C) \tag{9}$$

$$U_{E0.75\text{MAX}} = U_{E0.75\text{MAX}}(1 + K_C) \tag{10}$$

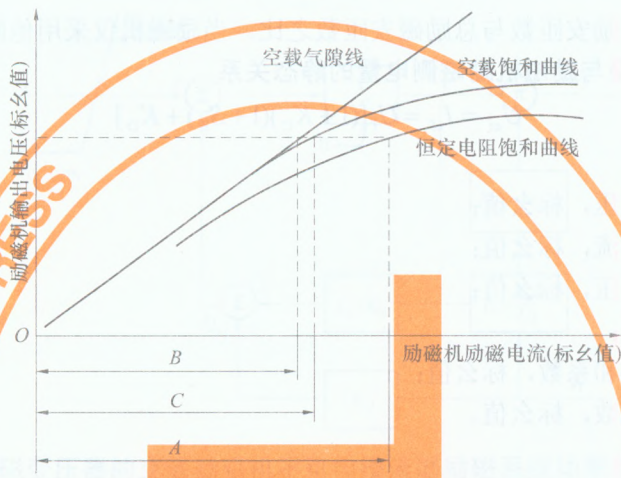


图 12 求取饱和系数 S_E 的励磁机空载和负载特性

9.4.1.6 三相全波不可控整流器调节特性 (F_{EX} 函数)

三相全波不可控整流器数学模型如图 13 所示。图中 U_E 为未计及换弧电抗压降的整流桥的输出电压； U_f 为计及换弧电抗压降后整流桥的输出电压，即发电机磁场电压； I_f 为励磁机负载电流即发电机磁场电流； F_{EX} 为表示整流器调节特性的函数； I_N 为规格化电流。

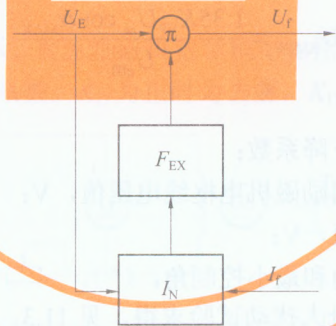


图 13 三相全波不可控整流器数学模型

采用式 (6) 计算 K_C 时， F_{EX} 采用式 (11) 形式。

$$\begin{cases} I_N = \frac{K_C I_f}{U_E} \\ F_{EX} = 1 - 0.577 I_N, 0 \leq I_N \leq 0.433 \\ F_{EX} = \sqrt{0.75 - I_N^2}, 0.433 < I_N < 0.75 \\ F_{EX} = \sqrt{3}(1 - I_N), 0.75 \leq I_N \leq 1 \end{cases} \tag{11}$$

式中：

K_C ——换弧压降系数。

9.4.1.7 去磁系数 K_D

在励磁机空载和负载特性曲线的未饱和区域进行计算。设某一发电机磁场电压下，励磁机空载气隙线的电流为 I_{ef1} ，励磁机负载曲线的电流为 I_{ef2} ，则：

$$K_D = (I_{ef2} - I_{ef1}) / I_{ef1} - K_C / \sqrt{3} \quad (12)$$

当缺少实测的励磁机空载、负载特性时可采用制造厂的出厂试验数据或设计特性，或通过计算得到。

9.4.1.8 自励系数 K_E

K_E 是励磁机励磁的他励安匝数与总励磁安匝数之比。当励磁机仅采用他励时 $K_E = 1$ 。

9.4.1.9 发电机励磁侧电量与励磁机励磁侧电量的静态关系

$$U_{ef} = I_{ef} = U_f [(1 + K_C)(1 + S_E) + K_D] \quad (13)$$

式中：

U_{ef} ——励磁机磁场电压，标么值；

I_{ef} ——励磁机磁场电流，标么值；

U_f ——发电机磁场电压，标么值；

K_C ——换弧压降系数；

S_E ——励磁机空载饱和系数，标么值；

K_D ——励磁机去磁系数，标么值。

9.4.1.10 励磁机的限幅值

U_E 的下限值为 0。

9.4.1.11 调节器输出限幅值 U_{RMAX} 和 U_{RMIN}

副励磁机电压随着负荷的增大而降低，强励时副励磁机电压下降系数 K_{EP} 对永磁机可取 85%~90%，对自励恒压副励磁机可取 90%~95%。

$$U_{RMAX} = \frac{1.35 K_{EP} U_{ac} \cos \alpha_{MIN}}{U_{efB}} \quad (14)$$

$$U_{RMIN} = \frac{1.35 K_{EP} U_{ac} \cos \alpha_{MAX}}{U_{efB}} \quad (15)$$

式中：

K_{EP} ——强励时副励磁机电压下降系数；

U_{ac} ——发电机额定负载下的副励磁机电枢线电压值，V；

U_{efB} ——励磁机磁场电压基准值，V；

α_{MAX} 、 α_{MIN} ——可控整流器最大控制角和最小控制角，(°)。

调节器输出限幅值可以通过发电机大扰动试验求得，见 11.3。

9.4.2 交流励磁机可控整流器励磁系统功率部分数学模型

交流励磁机可控整流器励磁系统中的交流励磁机均为自并励恒压交流励磁机，其功率部分数学模型如图 7 所示。模型认为交流励磁机的电压调节器可以维持电枢电压恒定。交流励磁机的换弧压降系数 K_C 由式 (16) 计算。 U_{RMAX} 和 U_{RMIN} 按照式 (17) 和式 (18) 计算。

$$K_C = \frac{3(X_{dc}'' + X_{2e})U_{Ne}^2 I_{fB}}{2\pi U_{fB} S_{Ne}} \quad (16)$$

$$U_{RMAX} = \frac{1.35 U_{eAC} \cos \alpha_{MIN}}{U_{fB}} \quad (17)$$

$$U_{RMIN} = \frac{1.35 U_{eAC} \cos \alpha_{MAX}}{U_{fB}} \quad (18)$$

9.5.1 直流励磁机空载和负载特性曲线测量

空载特性：断开发电机转子灭磁开关，保持励磁机额定转速不变，测量励磁机电压和励磁机总励磁安匝数、他励安匝数从 0 到强励的对应值。

负载特性：合上发电机转子灭磁开关，测量发电机磁场电压和励磁机总励磁安匝数、他励安匝数的对应关系。

9.5.2 直流励磁机饱和系数 S_E

S_{EMAX} 、 $S_{E0.75MAX}$ 、 S_{E0} 分别为发电机强励电压、75%发电机强励电压和发电机额定磁场电压下的励磁机饱和系数。

直流励磁机模型饱和系数 S_E 是 U_f 的函数，由图 12 所示励磁机空载和负载特性曲线按照式 (19) 确定饱和系数 S_E 。

$$S_E(U_f) = \frac{C - B}{B}$$

(19)

9.5.3 自励系数 K_E

按照实际的励磁机的他励安匝数与总安匝数之比计算 K_E 。

9.5.4 励磁机时间常数 T_E

稳定计算用的直流励磁机时间常数 T_E 等于直流励磁机空载时其励磁回路的时间常数 T_e 。

9.5.5 去磁系数 K_D

按照式 (12) 计算去磁系数 K_D ，但需令 $K_C=0.0$ 。

9.6 电压测量与电流补偿部分数学模型

大多数电压测量与电流补偿部分的模型可如图 17 所示。图中 \dot{U}_t 、 \dot{I}_t 分别为用标么值表示的发电机机端电压矢量和电流矢量； T_R 为电压测量环节的等效时间常数； K_R 为电压测量环节的增益 [在大多数计算程序中选定为 1.0 (标么值)]； R_C 和 X_C 分别为对应于全电流的有功和无功电流补偿率； U_{REF} 为电压给定值； U_{ERR} 为偏差信号。

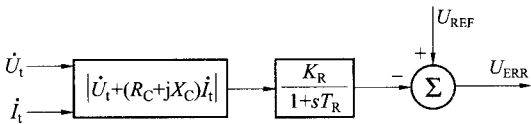


图 17 电压测量与电流补偿部分模型

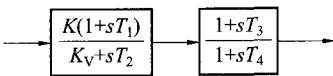
T_R 、 K_R 和 X_C 都应通过测量或参数辨识获得。数字式调节器的电压测量存在随机的纯滞后时间，可以进行多次阶跃试验获得平均纯滞后时间， T_R 等于该平均纯滞后时间。

9.7 励磁控制部分数学模型

9.7.1 PID 和软反馈校正

PID 校正环节有串联型和并联型两种，分别如图 18 和图 19 所示。软反馈校正环节如图 20 所示，以发电机磁场电压、调节器输出或者励磁机磁场电流为其输入信号。励磁系统数学模型以 U_{FE} 表示励磁机磁场电流，在非限幅区域，调节器输出电压的静态标么值与 U_{FE} 的静态标么值相同。

应区分两种环节的限幅作用，见附录 A。



K 、 K_v ——增益常数；
 T_1 、 T_2 、 T_3 、 T_4 ——时间常数。

图 18 串联型 PID 校正环节

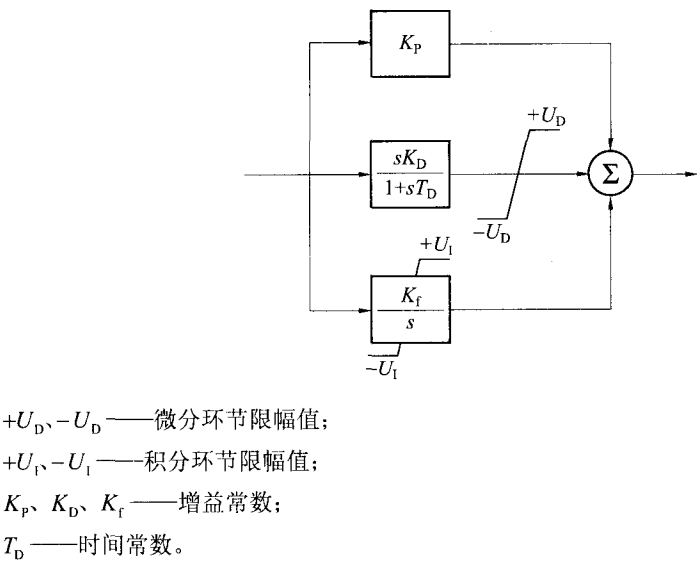


图 19 并联型 PID 校正环节



图 20 软反馈校正环节

9.7.2 补偿励磁机时间常数的反馈

用以补偿励磁机时间常数的反馈单元是一个比例单元，其输入可以是发电机磁场电压或者励磁机磁场电流。测量该环节输入、输出数据，将输入、输出数据按照计算基准值折算后，获得比例反馈系数。

9.7.3 功率控制

三相全控整流桥功率控制环节包括移相和可控整流桥两部分。移相环节的输入是调节器的控制电压 U_c ，设采用余弦移相， U_c 为 ± 1 时对应可控整流器控制角为 0° 和 180° ，则功率控制环节的放大倍数计算如下：

$$K_b = \frac{U_{d0}}{U_c} = \frac{1.35U_{ac}}{U_B} \tag{20}$$

式中：

- U_{d0} ——换弧压降前的直流电压，V；
- U_c ——控制电压，V；
- U_{ac} ——整流桥交流侧线电压，V；
- U_B ——调节器输出电压基准值，V。

功率控制环节的延时特性作一阶惯性环节处理，其时间常数取调节器对控制角调整的平均延时和相邻触发脉冲的时间间隔中较大的一个。当延时不大于 10ms 时可以不考虑。

9.7.4 顶值限制

顶值限制包括顶值电压限制和顶值电流瞬时限制。顶值限制对暂态稳定计算结果有影响，应构建符合实际的顶值限制模型，设置符合实际的限制值。

顶值限制值一般通过大扰动试验或静态试验获取。

9.7.5 低励限制（UEL）

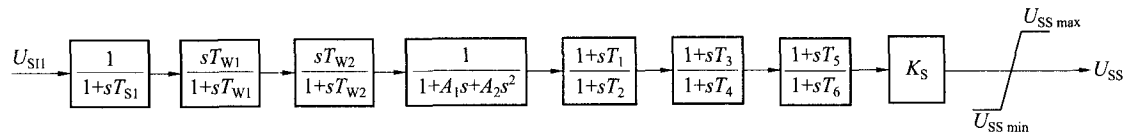
构建符合实际的低励限制模型，设置符合实际的限制值。低励限制通用模型参见附录 B。

9.7.6 过励限制 (OEL)

构建符合实际的过励限制模型，设置符合实际的限制值。过励限制通用模型参见附录 C。

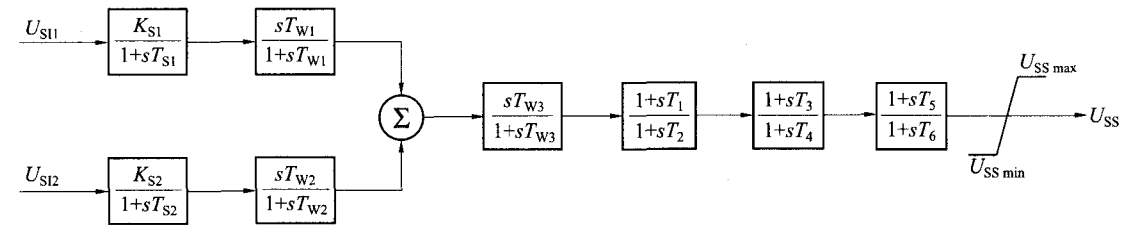
9.8 电力系统稳定器 (PSS) 数学模型

选择与实际一致的 PSS 模型。PSS 模型主要有单输入信号 PSS 模型、双输入信号 PSS 模型和加速功率型 PSS 模型 3 种，分别如图 21~图 23 所示。



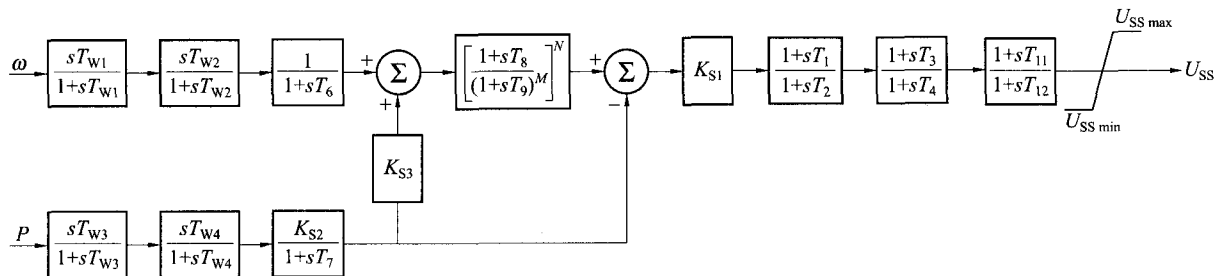
K_S ——PSS 增益；
 T_{S1} ——PSS 信号测量环节时间常数；
 T_{W1} 、 T_{W2} ——PSS 隔直环节时间常数；
 T_1 、 T_2 、 T_3 、 T_4 、 T_5 、 T_6 ——PSS 时间常数；
 A_1 、 A_2 ——PSS 滤波器参数；
 U_{S11} ——PSS 输入信号；
 U_{SS} ——PSS 输出信号；
 $U_{SS \max}$ 、 $U_{SS \min}$ ——PSS 输出限幅值。

图 21 单输入信号 PSS 模型



K_{S1} 、 K_{S2} ——PSS 增益；
 T_{S1} 、 T_{S2} ——PSS 信号测量环节时间常数；
 T_{W1} 、 T_{W2} 、 T_{W3} ——PSS 隔直环节时间常数；
 T_1 、 T_2 、 T_3 、 T_4 、 T_5 、 T_6 ——PSS 时间常数；
 U_{S11} 、 U_{S12} ——PSS 输入信号；
 $U_{SS \max}$ 、 $U_{SS \min}$ ——PSS 输出限幅值。

图 22 双输入信号 PSS 模型



K_{S1} 、 K_{S2} 、 K_{S3} ——PSS 增益；
 T_{W1} 、 T_{W2} 、 T_{W3} 、 T_{W4} ——PSS 隔直环节时间常数；
 T_1 、 T_2 、 T_3 、 T_4 、 T_6 、 T_7 、 T_{10} 、 T_{11} ——PSS 时间常数；
 M 、 N 、 T_8 、 T_9 ——PSS 陷波器参数；
 $U_{SS \max}$ 、 $U_{SS \min}$ ——PSS 输出限幅值。

图 23 加速功率型 PSS 模型

按照规定的基准值将实际的增益折算为标幺化的增益。对 PSS 输出信号，当 PSS 输出加入到 AVR 电压相加点上时，PSS 输出信号的基准值应与发电机电压的基准值相同；当 PSS 输出加入到 AVR 电压相加点后的某环节的输出点时，PSS 输出信号的基准值与该输出点信号的基准值相同，以保证计算模型的正确性。

需要获得 PSS 信号的测量时间常数。数字式调节器的 PSS 信号测量存在随机的纯滞后时间，可以进行多次阶跃试验获得平均纯滞后时间，测量环节的时间常数等于该平均纯滞后时间。

9.9 需要注意的问题

- 三相全波整流电路如采用非余弦移相，或者功率控制采用定频调宽方式时，应采用额定工况处线性化处理的方法获得环节增益，调节器输出的限幅值应按照实际的可控特性计算，并且经过发电机空载大扰动试验校核。
- 励磁机励磁系统模型不表示副励磁机电抗引起换弧压降的影响。有的励磁系统的换弧压降影响显著，需要进行功率部分增益实测和调节器输出限制值的实测，采取等效副励磁机电压等方法表示该影响。
- 当发电机空载和负载下调节器参数或限制值不同对试验结果产生显著影响时，应在建模报告中给出空载和负载下的参数。
- 调节器不应设置死区。

10 模型的选择及参数处理方法

10.1 等同计算模型的选择及参数处理方法

- 等同计算模型可以是电力系统稳定计算程序中模型结构与实测一致的固有的励磁系统模型，或者采用电力系统稳定分析程序内自定义功能定义的模型。
- 选择与实测模型相同的励磁系统类型。
- 控制部分、电压测量、顶值限制和电力系统稳定器环节结构与实测模型一致，或者实测环节模型可以通过等值变换获得稳定计算用环节模型。
- PSS 输出信号相加点、用作励磁稳定器的软反馈和用作减少励磁机时间常数的反馈相加点与实测模型一致。
- 当并联型 PID 可以转换为串联型 PID 而不出现非负实数根时，也认为并联型 PID 与串联型 PID 有一致的结构。
- 实测模型中有多个限幅可以采用稳定计算用模型的限幅替代。
- 将实测模型中多个串联的小时间常数惯性环节合并为一个惯性环节。励磁系统各环节中最小时间常数不得小于 10ms。
- 稳定计算用模型中多余的环节应设置相应参数使其不起作用。如反馈环节应设置其增益为 0，超前滞后环节应设置超前与滞后的时间常数相同。
- 消除死区。

10.2 近似计算模型的选择及参数处理方法

按照 10.1 的规定处理模型和参数后仍存在部分控制部分、电压测量、顶值限制和电力系统稳定器等结构与实测模型不一致，如电力系统稳定器输出信号相加点不同、校正环节不同、顶值限制方式不同、稳定反馈信号不同等。选择与实测模型有相同励磁系统类型、最为接近的模型作为近似计算模型。通过计算校核，确定近似计算模型参数。

11 励磁系统模型参数的现场试验校核

11.1 试验校核的目的

- 将等同计算模型仿真计算的结果、近似计算模型仿真计算的结果与现场试验的结果进行校核，

以确认励磁系统模型参数。

- b) 励磁系统模型参数的现场试验校核可以分为发电机空载下小扰动试验校核和大扰动试验校核。发电机空载下小扰动试验校核励磁控制系统小扰动动态特性和相关参数，大扰动试验校核励磁调节器输出限幅值。

11.2 发电机空载下小扰动试验校核方法

11.2.1 进行现场发电机空载电压给定阶跃试验，阶跃量不应使调节器进入限幅区域。

11.2.2 通过资料或者试验获得发电机空载特性曲线、发电机参数（ T_{d0}' 等）。

11.2.3 一般在所使用的电力系统分析程序上设置发电机参数（电抗参数采用不饱和值，发电机饱和系数的计算参见附录 D）、建立励磁系统模型，进行发电机空载电压给定阶跃仿真计算，阶跃量同现场发电机空载电压给定阶跃量，可采用以下两种方法之一进行仿真。

11.2.3.1 建立一单机无限大母线系统——外电抗为发电机同步电抗的 100 倍或更大、调整潮流使发电机运行于与试验工况相同的空载状态，对所建立的励磁系统模型和参数进行一次阶跃响应仿真计算，阶跃量与现场试验时相同，其方法可以是 0.0s 跳开线路、0.1s 施加阶跃。

11.2.3.2 建立单机带一交流线系统——交流线电抗为最小非零值、发电机设置为平衡机、有功功率和无功功率为 0，对所建立的励磁系统模型和参数进行一次阶跃响应仿真计算，阶跃量与现场试验时相同。

11.2.4 计算实测的和仿真的发电机空载电压给定阶跃响应的上升时间 t_{UP} (s)、峰值时间 t_P (s)、超调量 M_P (%)、调整时间 t_s (s) 和振荡次数 N ；仿真与实测的偏差允许值见表 1。

表 1 仿真与实测的偏差允许值

| 品质参数 | 参数范围 | 偏差允许值 (=实测值-仿真值) |
|-------------|---------|------------------|
| t_{UP} | 全部 | $\pm 0.1s$ |
| t_P | 0s~0.5s | $\pm 0.1s$ |
| | >0.5s | $\pm 0.2s$ |
| M_P | 0~10% | $\pm 5\%$ |
| | >10% | ± 0.5 实测值 |
| t_s (可选项) | 全部 | $\pm 2s$ |
| N (可选项) | 全部 | ≤ 1 |

11.2.5 实测和仿真结果的差异较大时可以调整实际可能产生偏差的数据，如励磁机时间常数、励磁系统总的静态增益、励磁机励磁绕组电阻值、由纯延时特性推出的等效惯性环节时间常数等。

11.2.6 仿真采用发电机额定负载下的励磁系统模型参数，而实测结果为发电机空载下的响应，有时需要考虑因此引起的仿真与实测的偏差。

11.3 发电机空载下大扰动试验校核方法

在发电机空载运行时，进行大阶跃试验，阶跃量的大小应使扰动达到可控整流器最小和最大控制角，并应保证发电机安全。记录发电机电压、发电机磁场电压和电流、电压调节器输出电压、调节器重要控制环节的响应波形。

- a) 自并励励磁系统按照式 (21) 和式 (22) 计算 U_{RMAX} 和 U_{RMIN} 。

$$U_{RMAX} = (U_{f1} + K_C I_{f1}) / U_{i1} \tag{21}$$

$$U_{RMIN} = (U_{f2} + K_C I_{f2}) / U_{i2} \tag{22}$$

式中：

U_{f1} 、 U_{f2} ——试验中最大和最小发电机磁场电压，标么值；

U_{i1} 、 U_{i2} ——对应于 U_{f1} 和 U_{f2} 的试验中发电机电压，标么值；

I_{f1} 、 I_{f2} ——对应于 U_{f1} 和 U_{f2} 的试验中发电机磁场电流，标么值；

K_C ——换弧压降系数；

U_{RMAX} 、 U_{RMIN} ——调节器最大和最小输出限幅值，标么值。

b) 交流励磁机可控整流器励磁系统按照式 (23) 和式 (24) 计算 U_{RMAX} 和 U_{RMIN} 。

$$U_{RMAX} = U_{f1} + K_C I_{f1} \quad (23)$$

$$U_{RMIN} = U_{f2} + K_C I_{f2} \quad (24)$$

式中：

U_{f1} 、 U_{f2} ——试验中最大和最小发电机磁场电压，标么值；

I_{f1} 、 I_{f2} ——对应于 U_{f1} 和 U_{f2} 的试验中发电机磁场电流，标么值；

K_C ——换弧压降系数；

U_{RMAX} 、 U_{RMIN} ——调节器最大和最小输出限幅值，标么值。

c) 有副励磁机的交流励磁机不可控整流器励磁系统中的 U_{RMAX} 和 U_{RMIN} 按照式 (25) 和式 (26) 计算，有励磁变压器的交流励磁机不可控整流器励磁系统中的 U_{RMAX} 和 U_{RMIN} 按照式 (27) 和式 (28) 计算。

$$U_{RMAX} = U_{R1} K_{EP} / U_{efB} \quad (25)$$

$$U_{RMIN} = U_{R2} K_{EP} / U_{efB} \quad (26)$$

$$U_{RMAX} = U_{R1} / (U_{efB} U_{t1}) \quad (27)$$

$$U_{RMIN} = U_{R2} / (U_{efB} U_{t2}) \quad (28)$$

式中：

U_{RMAX} 、 U_{RMIN} ——模型中调节器最大和最小输出值，标么值；

U_{R1} 、 U_{R2} ——试验中调节器最大和最小输出值，V；

U_{efB} ——励磁机励磁电压基准值，V；

K_{EP} ——强励时副励磁机电压下降系数，见 9.4.1.11；

U_{t1} 、 U_{t2} ——试验中与 U_{R1} 和 U_{R2} 相对应的发电机机端电压，标么值。

d) 计算模型中采用试验获得值与根据实际设定值计算的获得值中绝对值较小的 U_{RMAX} 和 U_{RMIN} 。

12 近似计算模型的校核

12.1 校核的目的

通过计算比较励磁系统实测模型和近似计算模型的大、小扰动响应，调整和确认近似计算模型和参数。

12.2 校核的条件

a) 一般在实际系统或单机对无穷大系统（两回出线）下进行校核。

b) 实测模型和近似计算模型在同一或者不同的电力系统计算程序上进行大、小扰动计算。对不同的电力系统计算程序应先对相同的励磁系统模型的响应进行核对。

12.3 校核的内容

12.3.1 临界切除时间

进行发电机带额定有功负荷、发电机主变压器高压侧近端三相短路后切除故障线路的暂态稳定计算。两种模型的临界切除时间相差小于 5ms。

12.3.2 发电机负载阶跃响应

发电机带额定有功负荷，进行有、无 PSS 的 2% 发电机额定电压阶跃仿真计算。比较发电机有功功率的振荡频率和衰减阻尼比。两种模型的频率相对偏差不大于 20%；实测模型阻尼比小于 0.1 的，阻尼比相差不大于 0.02；实测模型阻尼比大于 0.1 的，阻尼比相差不大于 0.05。

12.3.3 发电机主变压器高压侧近端三相短路 0.1s 响应

发电机带额定有功负荷，进行发电机主变压器高压侧近端三相短路 0.1s 切除故障线路仿真计算。两种模型的发电机功角最大值相差不大于 2° 。

12.3.4 励磁系统无补偿相频特性（可选项）

发电机带额定有功负荷，计算在 0.1Hz~2Hz 范围内的励磁系统无补偿相频特性。两种模型的励磁系统无补偿相频特性相差不大于 $10^\circ \sim 20^\circ$ 。励磁系统无补偿相频特性为发电机励磁调节产生的力矩分量 T_{e2}/U_S 相频特性（ U_S 为 PSS 输出叠加点信号）。

12.3.5 小干扰振荡模式计算（可选项）

两种模型与建模机组相关的本机振荡模式的振荡频率相对偏差值小于 20%；实测模型阻尼比小于 0.1 的，阻尼比相差不大于 0.02；实测模型阻尼比大于 0.1 的，阻尼比相差不大于 0.05。

13 励磁系统建模报告主要内容

13.1 概况

发电厂名、发电机号、发电机制造厂、励磁变压器制造厂、功率整流柜制造厂、励磁系统类型、调节器制造厂和型号、整流电路类型、试验时间和试验单位。

13.2 建模参照标准

13.3 调节器制造厂提供的模型和参数

13.4 调节器的设定

包括与数学模型有关的设定值、反馈量、限制功能和限制值的设定。

13.5 电力系统稳定计算用的励磁系统模型和参数

提供电力系统稳定计算用的励磁系统模型、参数，并指明各基准值。

如果提供的电力系统稳定计算用励磁系统模型结构与实测不一致，应同时提供实测模型参数。

13.6 电力系统稳定计算用的励磁系统模型和参数的校核

说明仿真计算用程序和计算条件，提供校核试验波形和仿真计算波形，描述品质的特征值和校核偏差值。

对于等同计算模型，应提供其仿真和现场试验校核结果。

对于近似计算模型，应提供实测模型仿真和现场试验校核结果，并提供实测模型和近似计算模型之间的计算校核结果。

13.7 结论及建议

至少包含如下结论及建议：

- 对电力系统稳定计算用模型进行了何种校核，结果是否符合要求；
- 作出所提供的励磁系统模型和参数可用于电力系统稳定计算的结论；
- 存在的问题和处理意见。

13.8 原始资料

励磁系统建模报告应收集如下原始资料：

- 发电机数据：制造厂、型号、额定容量、额定电压、额定电流、额定功率因数、额定励磁电压、额定励磁电流、空载额定励磁电压、空载额定励磁电流、在某温度下的励磁绕组电阻值、强励倍数、发电机各个饱和和不饱和电抗值、各个时间常数、饱和系数以及发电机空载特性曲线。
- 交流励磁机数据：制造厂、型号、额定容量、额定电压、额定电流、额定功率因数、额定频率、额定电压和电流、交流励磁机空载和负载特性曲线（坐标应注明是交流励磁机线电压还是整流后的直流电压）、交流励磁机电枢开路时励磁绕组时间常数 T'_{d0e} （注明所用励磁绕组电阻值或励磁绕组温度）、励磁方式（他励或复励）、励磁绕组电阻（注明温度和测量或计算方法）、交流励磁机的不饱和和同步电抗 X_{de} 、不饱和次暂态电抗 X'_{de} 和不饱和负序电抗 X_{2e} 。

- c) 副励磁机（或永磁机）数据：额定容量、额定电压、额定电流、额定功率因数、额定频率、外特性曲线、空载电压、输出额定电流时的端电压、输出强励电流时的端电压。
- d) 励磁变压器数据：制造厂、额定容量、一次和二次额定电压、短路电抗数据。
- e) 直流励磁机数据：制造厂、型号、额定容量、额定电压、额定电流、励磁绕组时间常数 T_c 、励磁方式（他励、自并励或复励）、各励磁绕组电阻（注明温度）、各励磁绕组匝数。

附录 A
(规范性附录)
限幅的表达

要区分两种环节的限幅作用。内限幅是指到达限幅值后，限幅环节内部值不再变化，输出值等于限幅环节内部值，如图 A.1 和图 A.2 所示；外限幅是指到达限幅值后环节内部值继续变化只是输出被限幅，如图 A.3 和图 A.4 所示。

积分环节内限幅的逻辑关系：如 $A \geq y \geq B$ ，则 $dy/dt = u$ ；如 $y > A$ ，则 dy/dt 为 0；如 $y < B$ ，则 dy/dt 为 0。

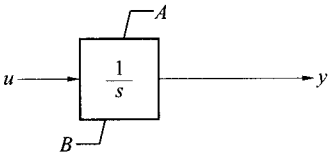


图 A.1 积分环节内限幅

一阶惯性环节内限幅的逻辑关系：设 $f = (u - y)/T$ ，如 $y = A$ ，且 $f > 0$ ，则 dy/dt 为 0；如 $y = B$ ，且 $f < 0$ ，则 dy/dt 为 0；其他 $B < y < A$ 。

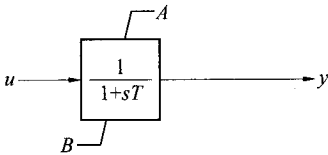


图 A.2 一阶惯性环节内限幅

积分环节外限幅的逻辑关系：如 $A \geq y \geq B$ ，则 $x = y$ ；如 $y > A$ ，则 $x = A$ ；如 $y < B$ ，则 $x = B$ 。

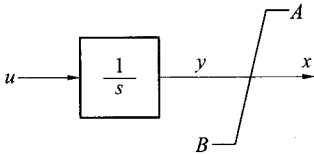


图 A.3 积分环节外限幅

一阶惯性环节外限幅的逻辑关系：如 $B \leq y \leq A$ ，则 $x = y$ ；如 $y > A$ ，则 $x = A$ ；如 $y < B$ ，则 $x = B$ 。

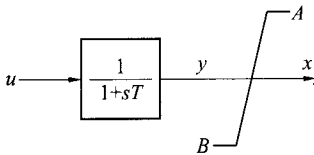


图 A.4 一阶惯性环节外限幅

附录 B
(资料性附录)
低励限制模型

B.1 低励限制的两种主要形式

B.1.1 折线型低励限制

折线型由多段直线组成，也可只含一段直线。每一段直线用式 (B.1) 表示，如图 B.1 所示。

$$\begin{cases} Q = KP + C \\ K = \tan \alpha \end{cases} \tag{B.1}$$

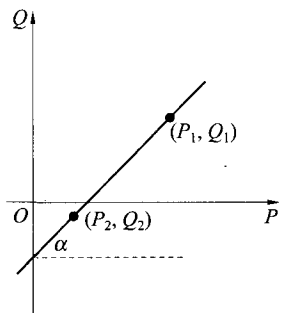


图 B.1 折线型低励限制中的一段直线

一般给定斜率 K 和截距 C ，或由二点法确定 K 和 C ，见式 (B.1)。

$$\begin{cases} K = \frac{Q_1 - Q_2}{P_1 - P_2} \\ C = Q_2 - KP_2 \end{cases} \tag{B.2}$$

B.1.2 圆周型低励限制

圆周型动作线的圆心在 Q 轴上，如图 B.2 所示。

给定 r 、 Q_0 时圆弧用式 (B.3) 表示。

$$\begin{cases} P^2 + (Q_0 - Q)^2 = r^2 \\ Q = Q_0 - \sqrt{r^2 - P^2} \end{cases} \tag{B.3}$$

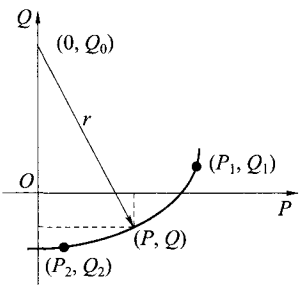


图 B.2 圆周型低励限制

给定两点 $[P_1, Q_1]$ 、 $[P_2, Q_2]$ 时圆弧用式 (B.4) 表示。

$$\begin{cases} Q_0 = \frac{1}{2} \left(\frac{P_1^2 - P_2^2}{Q_1 - Q_2} + Q_1 + Q_2 \right) \\ r^2 = P_1^2 + (Q_0 - Q_1)^2 \\ \text{或} \\ r^2 = P_2^2 + (Q_0 - Q_2)^2 \end{cases} \tag{B.4}$$

由于相同有功功率在不同电压水平下容许进相能力不同，应根据电压水平进行修正。
折线型低励限制每段直线电压修正见式 (B.5)，圆周型低励限制电压修正见式 (B.6)。

$$Q = KP + CU_i^2 \tag{B.5}$$

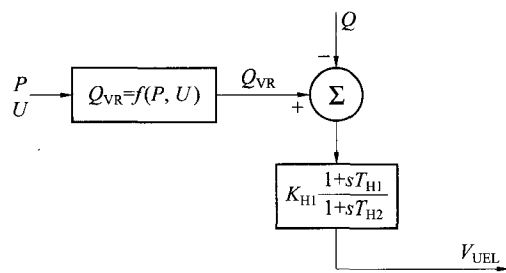
$$P^2 + (Q_0 U_i^2 - Q_2)^2 = (r U_i^2)^2 \tag{B.6}$$

式中：
 $K、C$ ——系数；
 U_i ——发电机机端电压。

B.2 低励限制的参考模型

图 B.3 所示为低励限制参考模型。 P 和 Q 分别为发电机的有功功率和无功功率， Q_{VR} 为根据给定的 $P-Q-U$ 曲线确定的最小容许无功功率。当发电机的无功功率小于由给定的 $P-Q-U$ 曲线确定的最小容许无功功率时，低励限制器输出一个增励信号，增加发电机的励磁，以增加发电机的无功功率。

当采用定子有功电流作为控制信号或者附加氢压作为调整量时，或近似采用图 B.3 所示模型，或建立自定义模型。



Q_{VR} ——机组最小容许无功功率，是有功功率的函数，标么值；
 V_{UEL} ——低励限制输出，标么值；
 K_{H1} ——低励限制回路增益，标么值；
 $T_{H1}、T_{H2}$ ——低励限制回路时间常数，s。

图 B.3 低励限制的参考模型

附录 C

(资料性附录)

过励限制模型

C.1 过励限制原理

发电机过励限制环节通过计算励磁绕组在励磁电流超出长期运行最大值的发热量 B' 达到某常数 B 来限制调节器输出,以限制发电机转子电流,达到保护发电机转子的目的。即计算 $B' = \int (I_f^2 - I_{f\infty}^2) dt$, $I_{f\infty}$ 为长期连续运行的最大励磁电流。在 $B'=B$ 时限制器动作,控制发电机的转子电流 I_f 小于 $I_{f\infty}$,以便把过励过程产生的过多热量释放出去。另外,当限制器不能有效地限制 I_f 时,则应由过励保护动作,把发电机切除,以保证机组安全。

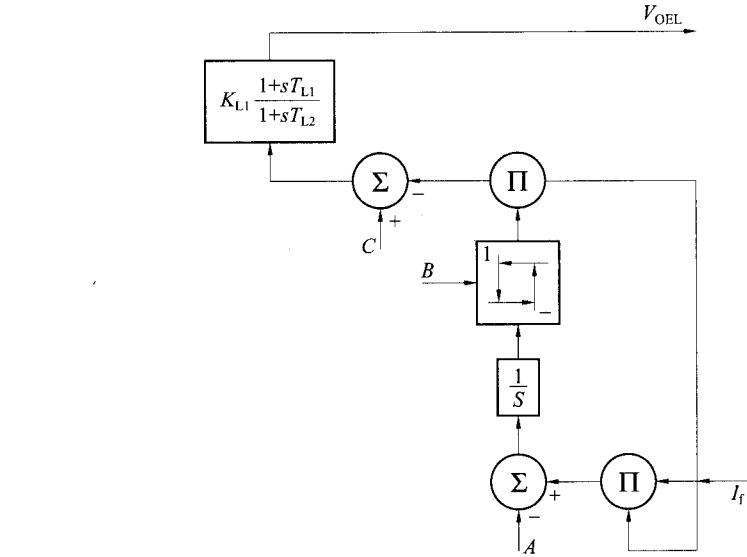
发电机存在以下 4 种状态: ① $B'=0$, $I_f \leq I_{f\infty}$; ② $B'=0$, $I_f > I_{f\infty}$; ③ $B' > 0$, $I_f > I_{f\infty}$; ④ $B' > 0$, $I_f \leq I_{f\infty}$ 。第一种状态表明过去未发生过励,无过热积累,当前也不过励;第二种状态表明过去未发生过励,无过热积累,当前发生过励,因此应进行过热积累计算,即计算 $B' = \int (I_f^2 - I_{f\infty}^2) dt$;第三种状态表明过去发生过励,有过热积累,当前也在过励,因此应进行过热积累计算;第四种状态表明过去发生过励,有过热积累,当前不再过励(过励限制器动作后或系统电压水平恢复后),这种情况下也应进行积累计算,此时是向反方向积累,是热量释放过程,反向积累计算到 $B' \leq 0$ 时为止。

过励的判别与过励限制动作过程如下:

- a) 第一次发生过励时,就进行过热积累计算。
- b) 当过热积累超过给定值,即 $B' \geq B$ 时,发出限制信号,同时进行计时。
- c) 若限制器工作正常,经过一定时间(1s~2s), I_f 将小于 $I_{f\infty}$,此时仍有 $B' > 0$,还需进行反向(释放)过热积累计算,直到 $B' \leq 0$ 为止。
- d) 若限制器工作不正常, $t > T_0$ (T_0 为一定时限,可以整定)后,仍不能使 $B' < B$ 且 $I_f < I_{f\infty}$,则切除发电机。

C.2 过励限制参考模型

过励限制参考模型如图 C.1 所示。



V_{OEL} ——过励限制输出，标么值；
 K_{L1} ——过励限制回路增益，标么值；
 T_{L1} 、 T_{L2} ——过励限制回路时间常数，s；
 A 、 B 和 C ——按照下式计算。

$$\begin{cases} A = I_{f\infty}^2 \\ B = [(kI_{fN})^2 - I_{f\infty}^2]t_{2.0} \\ C = (0.9 \sim 0.95)I_{f\infty} \end{cases}$$

式中 k 为强励倍数。

图 C.1 过励限制参考模型

附录 D
(资料性附录)
发电机饱和系数的计算

按照电力系统分析程序规定的发电机饱和系数定义进行求取。发电机空载特性曲线如图 D.1 所示。
PSD 电力系统分析程序的发电机饱和系数按照式 (D.1) 计算, PSASP 电力系统分析程序的发电机饱和系数按照式 (D.2) 计算。

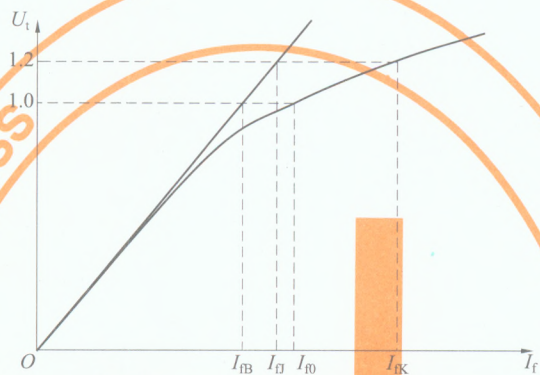


图 D.1 发电机空载特性曲线

$$\begin{cases} S_{G1.0} = (I_{F0} - I_{FB}) / I_{FB} \\ S_{G1.2} = (I_{FK} - I_{F0}) / I_{F0} \end{cases} \quad (D.1)$$

$$\begin{cases} a = 1 \\ b = I_{F0} / I_{FB} - 1 \\ n = 1 + \ln \left(\frac{I_{FK} / I_{F0} - 1}{I_{F0} / I_{FB} - 1} \right) / \ln 1.2 \end{cases} \quad (D.2)$$

中 华 人 民 共 和 国
电 力 行 业 标 准
同步发电机励磁系统建模导则
DL/T 1167—2012

*

中国电力出版社出版、发行
(北京市东城区北京站西街19号 100005 <http://www.cepp.sgcc.com.cn>)
北京九天众诚印刷有限公司印刷

*

2012年12月第一版 2012年12月北京第一次印刷
880毫米×1230毫米 16开本 2印张 54千字
印数 0001—3000册

*

统一书号 155123·1243 定价 17.00元

敬告读者

本书封底贴有防伪标签，刮开涂层可查询真伪
本书如有印装质量问题，我社发行部负责退换

版 权 专 有 翻 印 必 究



155123.1243

上架建议：规程规范/动力工程

