

ICS 27.100

F 24

备案号: 47964-2015



中华人民共和国电力行业标准

DL/T 1391 — 2014

数字式自动电压调节器涉网 性能检测导则

Test guidelines of digital automatic voltage regulator
performance related to power grid

2014-10-15 发布

2015-03-01 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 性能检测试验内容 3

5 检测准备工作 4

6 应用于自并励静止励磁系统的 AVR 性能检测 5

7 应用于交流励磁机励磁系统的 AVR 性能检测 16

8 对试验报告的要求 21

附录 A（资料性附录） 仿真环境说明 25

前 言

本标准按照 GB/T 1.1—2009 给出的规则起草。

本标准由中国电力企业联合会提出。

本标准由电力行业电机标准化技术委员会归口。

本标准负责起草单位：华北电力科学研究院有限责任公司、国网浙江省电力科学研究院、南瑞继保电气有限公司、南瑞集团公司北京监控技术中心、上海昱章电气成套设备有限公司、中国电力科学研究院、广东电网公司电力科学研究院、哈尔滨电机厂有限责任公司、上海 ABB 工程有限公司。

本标准主要起草人：苏为民、吴涛、陈新琪、史扬、吴龙、赵红光、崔建华、谢欢、李国良、濮钧、陈迅、王方晶、吴跨宇、姚谦、黄晓明、付宏伟、赵焱、徐正龙。

请注意本标准的某些内容可能涉及专利。本标准的发布机构不承担识别这些专利的责任。

本标准为首次制定。

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）。

数字式自动电压调节器涉网性能检测导则

1 范围

本标准规定了采用实时数字仿真系统对数字式自动电压调节器进行涉网性能检测的方法。

本标准适用于自并励静止励磁系统和交流励磁机励磁系统中数字式自动电压调节器涉网性能的检测。其他类型的励磁调节器可参照执行。

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，仅所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 7064 隐极同步发电机技术要求

GB/T 7409.1 同步电机励磁系统 定义

GB/T 7409.2 同步电机励磁系统 电力系统研究用模型

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

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

DL/T 1167 同步发电机励磁系统建模导则

DL/T 1231 电力系统稳定器整定试验导则

3 术语与定义

下列术语和定义适用于本文件。

3.1

自动电压调节器 (AVR) automatic voltage regulator

指实现按恒机端电压调节方式的调节及相关的限制保护功能的装置，也称自动（调节）通道。

[DL/T 583—2006，术语和定义 3.4]

3.2

励磁功率单元 exciter

提供同步电机磁场电流的功率电源。

电源的举例，如：

——一台旋转电机，它既可以是直流电机，也可以是交流电机以及与之连接的整流器。

——一台或几台变压器以及与之连接的整流器。

[GB/T 7409.1—2008，总则 2.3]

3.3

励磁系统的稳态增益 static gain of excitation system

发电机电压缓慢变化时励磁系统的增益。

[DL/T 843—2010，术语和定义 3.2]

3.4

励磁系统的动态增益 dynamic gain of excitation system

发电机电压变化频率在低频振荡区（0.2Hz～2.0Hz）内时励磁系统的增益。

[DL/T 843—2010, 术语和定义 3.3]

3.5

励磁系统的暂态增益 **transient gain of excitation system**

发电机电压快速变化时励磁系统的增益。

[DL/T 843—2010, 术语和定义 3.4]

3.6

PID 调节单元 **PID regulating unit**

a) 串联 PID 调节单元的传递函数见式 (1)。

$$\omega(s) = K_s \cdot \frac{1 + T_1 s}{1 + \beta T_1 s} \cdot \frac{1 + T_2 s}{1 + \gamma T_2 s} \tag{1}$$

式中：

β ——一般为 5~10, $(1 + T_1 s)/(1 + \beta T_1 s)$ 为迟后环节；

γ ——一般为 0.1~0.2, $(1 + T_2 s)/(1 + \gamma T_2 s)$ 为超前环节。

串联 PID 调节单元的稳态增益为 K_s ；串联 PID 调节单元的动态增益为 K_D , $K_D = K_s/\beta$ ；串联 PID 调节单元的暂态增益为 K_T , $K_T = K_s/(\beta \cdot \gamma)$ 。

b) 并联 PID 调节单元的传递函数见式 (2)。

$$\omega(s) = K_p \cdot \left[\left(1 + \frac{1}{T_i s} \right) + \frac{K_D s}{1 + T_r s} \right] \tag{2}$$

式中：

K_p ——比例增益；

T_i ——积分时间常数, s；

K_D ——微分增益；

T_r ——滤波时间常数, s。

[DL/T 843—2010, 附录 E.5.2]

3.7

阻尼比 ξ **damping ratio**

表示控制系统调节品质的一个量, 按式 (3) 计算。阻尼比可通过阶跃扰动试验测出, 见图 1。

$$\xi = \frac{1}{2N\pi} \ln \left(\frac{P_1 - P_2}{P_{2N+1} - P_{2N+2}} \right) \tag{3}$$

式中：

N ——计算周期数；

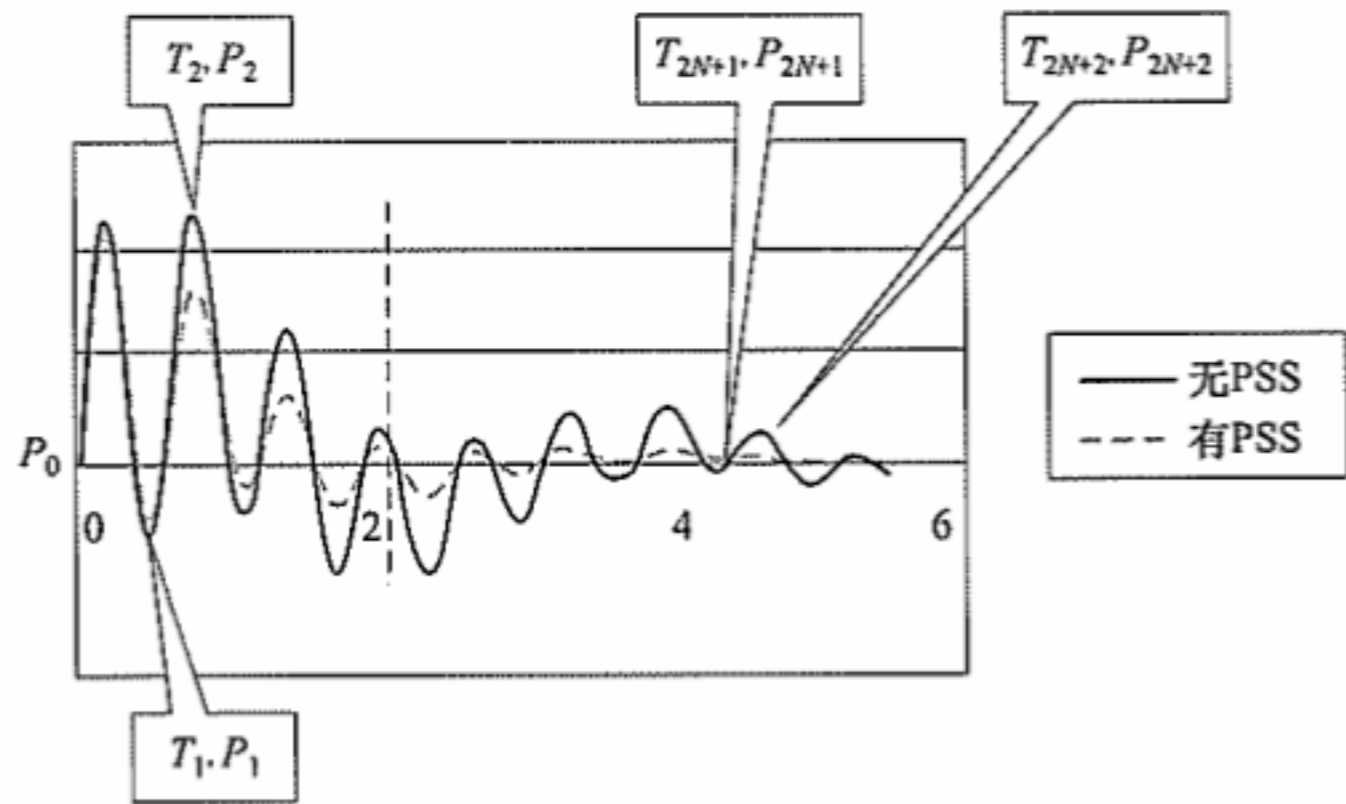


图 1 负载阶跃有功功率响应曲线

P_1 、 P_2 ——第一个和第二个功率峰值，见图 1，MW；

P_{2N+1} 、 P_{2N+2} ——第 $(2N+1)$ 个和第 $(2N+2)$ 个功率峰值，MW。

[DL/T 843—2010，术语和定义 3.6]

4 性能检测试验内容

4.1 检测原理

用仿真系统建立包括发电机及励磁功率单元、调速系统、主变压器、主开关以及等值无穷大电源的电力系统仿真环境，向待检测 AVR 提供所需要电气量，而待检测 AVR 仅需将输出的控制电压模拟信号 U_c 送入仿真系统，经过励磁功率单元模型后，得到发电机磁场电压 U_f ，构成闭环试验环境（见图 2）。

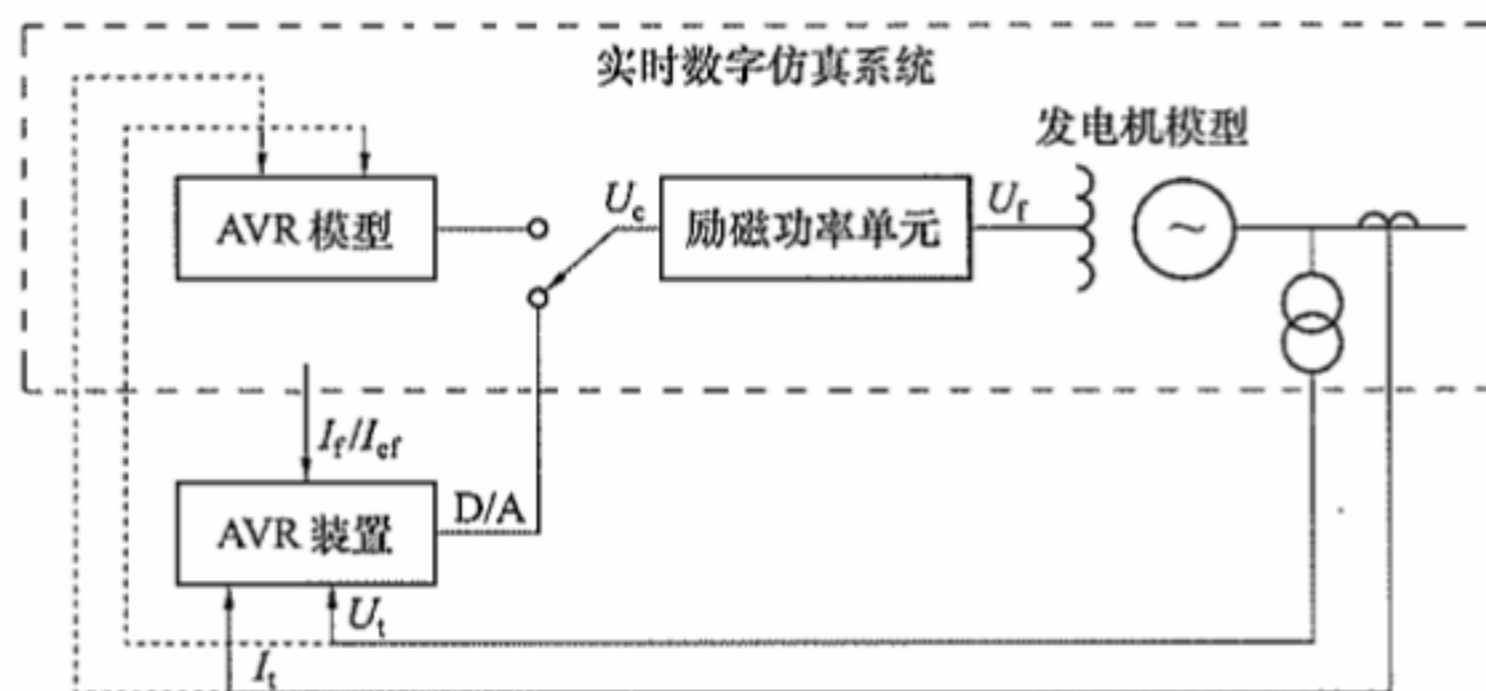


图 2 仿真检测系统示意图

图 2 中待检测 AVR 设备用“AVR 装置”表示，用仿真系统构成的内部 AVR 用“AVR 模型”表示。当励磁功率单元和发电机模型参数与现场一致时，通过“AVR 装置”和实时数字仿真系统闭环运行，可测试整个励磁系统的性能。

4.2 检测内容

4.2.1 时域特性检测试验项目

- 静态检查应包括电压量测环节的测量精度和时间常数检查、触发脉冲波形检查及移相触发环节反余弦特性检查；
- 发电机空载试验应包括 AVR 装置空载零起升压试验、空载阶跃响应试验、输出线性度检查、AVR 模型和 AVR 装置阶跃响应比较试验、调压性能检查、自动/手动切换试验、手动阶跃响应试验、自动逆变灭磁试验、V/Hz 限制及保护环节试验、TV 断线试验、空载最大励磁电流限制试验等；
- 发电机负载试验应包括测量精度检查、自动/手动切换试验、静差率的测定、调差特性试验、甩负荷试验、强励能力检查、PSS 性能试验、负载仿真比较试验、过励限制和过励保护试验、定子过流限制试验（可选）、低励限制和低励保护试验、AVR 装置各辅助环节特性配合及仿真试验等。

4.2.2 频域特性检测试验项目

- 测量发电机励磁系统无补偿频率特性；
- 计算和测量发电机励磁系统有补偿频率特性。

4.2.3 AVR 模型与 AVR 装置仿真比较试验应包括的项目

- 发电机空载时特性比较试验；
- 发电机负载时特性比较试验；
- PSS 特性比较试验；
- 各辅助限制环节特性比较试验。

5 检测准备工作

5.1 AVR 装置制造厂准备工作

5.1.1 制造厂应提供的技术资料

- 应提供励磁系统包括各附加功能环节在内的数学模型及其推荐参数、AVR 装置内部主要参数设置清单、数学模型推荐参数与 AVR 装置内部设置参数换算关系的计算说明等；
- 使用说明书（含原理、特性、控制逻辑、安装、试验、整定、运行、维护、故障查找等）；
- 出厂试验报告、产品合格证书及 AVR 装置软件版本号。

5.1.2 制造厂应提供的测试接口

- 用数模转换器提供 AVR 装置的控制电压信号 U_c 输出，以便与仿真系统构成闭环，且该信号总时间延时应满足试验要求。
- 用模数转换器提供一路模拟信号输入接口，用于将白噪声信号输入到电压控制主环的相加点，以便进行无补偿频率特性测量。要求该信号为双极性，且该信号总时间延时应满足测量要求；
- 用模数转换器提供一路模拟信号输入接口，用于将仿真系统提供的磁场电流反馈信号连接到 AVR 装置，该信号为 5V~10V 的单极性电压信号。当 AVR 装置采用交流励磁电源的电流互感器为磁场电流的信号来源时，应在试验前与试验单位沟通，做好将上述单极性电压信号变换为 AVR 可接收信号的相应接口，并确定有关的变比系数。
- 移相触发环节应有可测量的输出信号端子，能用示波器等设备观察分析脉冲信号的正确性。
- 根据试验需要，AVR 装置应能用数模转换器分别提供发电机电压、PSS、转子过励、定子过流、V/Hz 及低励等环节的模拟输出信号。

5.2 检测单位准备工作

5.2.1 仿真系统的数据整理

涉网检测试验应检查自并励静止励磁系统和交流励磁机励磁系统两种励磁方式下自动电压调节器的调节性能，检测方应根据相关资料整理下列数据：

- 发电机额定电压、电流，额定视在功率、功率因数，额定磁场电压、电流，空载额定磁场电压、电流，在规定温度下的励磁绕组电阻值，发电机空载特性曲线、发电机各电抗值、 T'_{d0} 等时间常数、包含原动机的整体机组转动惯量等；
- 励磁变压器额定容量、一次和二次额定电压、短路电抗数据；
- 交流励磁机额定容量，额定电压、电流，额定频率和功率因数，额定磁场电压、电流，交流励磁机空载和负载特性曲线，交流励磁机电枢开路时励磁绕组时间常数 T_{d0c} 、励磁绕组等效直流电阻、交流励磁机的不饱和同步电抗 X_{dc} 、暂态电抗 X'_{dc} 、次暂态电抗 X''_{dc} 及负序电抗 X_{2c} 等；
- 永磁机或副励磁机额定容量，额定电压、电流，额定频率和功率因数，包括空载电压、输出额定电流时的电压、输出强励电流时的电压等外特性曲线；
- 当 AVR 装置检测委托方未提出特殊要求时，仿真检测的基本数据参照本标准附录 A。

5.2.2 仿真系统的模型建立

建立仿真试验系统的闭环测试环境时，模型的建立应符合下列要求：

- 发电机应采用六阶数学模型，可配置完善的旋转负荷模型，可在高压侧用任何形式设置故障点，可在线监视 AVR 模型中任意点物理变量，可按要求格式输出试验过程的波形和数据。
- 当需要检测 AVR 装置在自并励静止励磁系统中的性能时，应参照本标准附录 A 的要求，计算发电机的饱和系数、励磁变压器的换相电抗系数和 AVR 的输出限制。一般情况下 AVR 装置的检测过程宜采用不考虑饱和影响的线性化发电机模型。
- 当需要检测 AVR 装置在交流励磁机励磁系统（含无刷高起始励磁系统）中的性能时，应参照本标准附录 A 的要求，除需增加计算励磁机的饱和系数、换相电抗系数及去磁系数外，发电机

要考虑饱和影响，还应重新计算 AVR 的输出限制及发电机磁场电压限制值。

- d) 输入发电机、励磁机（或励磁变压器）的各电抗值及各时间常数等参数后，构成了仿真试验系统的一次侧模型。
- e) 考虑电压互感器（TV）、电流互感器（TA）、磁场分流器等变比及实时仿真系统与 AVR 装置接口变比后，构成了 AVR 装置的闭环仿真测试环境。
- f) AVR 装置的闭环仿真测试环境应能进行发电机空载和负载、近端和远方的短路及电力系统的振荡等扰动试验。

5.2.3 仿真系统的试验接线

AVR 装置接入实时数字仿真系统的试验原理接线可参见本标准附录 A，且应符合下列要求：

- a) 接受 AVR 装置控制电压信号 U_c 的接口应考虑一定的电压量程裕度，避免对仿真系统中模数转换部件造成损坏；
- b) 除特别要求外，原动机和调速系统可采用典型模型和参数；
- c) 发电机电压、电流及功率等检测和显示信号应根据实际需求进行滤波处理。

5.2.4 试验检测录波器性能应符合下列要求

- a) 检测系统除包括仿真系统和 AVR 装置外，还应有独立的录波器监视并记录试验过程。
- b) 试验检测录波器性能要求。采样频率：不低于 10kHz/s；模拟测量和计算精度：不低于 0.5 级；模拟测量显示速率：不低于 1 点每 20ms。

6 应用于自并励静止励磁系统的 AVR 性能检测

6.1 检查人机界面

检查 AVR 装置能在线显示测量值和状态量，模拟量应以十进制表示，时间以秒表示，增益以实际值或标幺值表示，采用标幺值时应提供标幺值的基准值确定方法。参数能在线显示、修改和保存。内部事故记录可断电保存。

6.2 静态检查项目

6.2.1 检测电压测量环节的时间常数应符合下列要求

- a) 性能要求：电压测量环节时间常数应小于 30ms。
- b) 检查方法：用仿真系统产生 50% 额定电压以上的标准方波阶跃量，监视和记录 AVR 装置电压测量环节输入和输出电压，应按指数规律计算上升和下降时间的平均值。

6.2.2 检测晶闸管整流桥同步电压和触发脉冲波形的相关要求

- a) 性能要求：触发脉冲角度和间隔与设计应相符；
- b) 检测方法：应采用示波器检查。

6.2.3 检测晶闸管整流桥移相触发环节特性应符合下列要求

- a) 性能要求：数字式 AVR 装置移相触发环节应进行反余弦处理，即要求控制角的余弦与 PID 输出的控制电压 U_c 成线性比例关系；
- b) 检测方法：用示波器同时监视 A 相同步电压和 AVR 装置移相触发环节+A 相脉冲输出；每间隔 15° 控制角计算一次余弦值验证线性比例关系；
- c) 检测评判：最小和最大控制角测量值与设置相符，且 $U_c = K \cos(\alpha)$ ， K 为常数。

6.2.4 确定标幺值应符合下列要求

- a) 性能要求：AVR 装置输出上限值 U_{Rmax} 和下限值 U_{Rmin} 应与设置相符。
- b) 标幺值应采用下列方法检测：
 - 1) 将仿真系统与 AVR 装置连接，在空载及负载运行方式下检查发电机稳态输出值正确，在小扰动时稳定，AVR 装置各限制和附加控制环节无异常报警信号。
 - 2) 保持发电机空载状态，将 AVR 装置中空载最大励磁电流限制、调压范围限制、V/Hz 限制

等全部退出，进行±20%阶跃响应试验。

- 3) 检查控制电压 U_c 模拟量输出是否达到极限值，晶闸管控制角 α 是否已达最大、最小整定值，定义符合要求的 U_c 最大输出值为 U_{Rmax} (p.u.)，最小输出值为 U_{Rmin} (p.u.)。
- 4) 仿真系统不考虑发电机饱和，调整 AVR 装置的给定电压 U_{ref} ，使发电机空载电压达到额定值 U_{IN} ，AVR 装置触发控制角与理论计算值一致，定义 U_c 基准值为 U_{CB} ；同时计算 U_c 与仿真系统内部磁场电压 U_f 的标幺换算关系以确定比例系数。再次进行大扰动试验，确定阶跃量时应保证 $U_c \leq U_{Rmax}$ ，且未出现其他受限制的情况。

U_{Rmax} 实测值应等于按照晶闸管最小控制角计算的 U_c 值。理论上当不计换相压降时有： $U_{Rmax} = 1.35U_{2N}\cos(\alpha)/U_{fB}$ ， U_{2N} 为励磁变压器二次电压额定值， U_{fB} 为发电机磁场电压的基准值。

6.2.5 负载法确定检测录波记录的有名值应符合下列要求

- a) 发电机并网在额定工况下运行，调整录波器变比等参数，使其显示的发电机额定有功功率 P_N 、额定无功功率 Q_N 、额定机端电压 U_{IN} 、电流 I_{IN} 、额定磁场电压 U_{fN} 、电流 I_{fN} 等与电机厂铭牌数据应一致；
- b) 发电机解列后空载运行，当机端电压保持为 U_{IN} 时，应记录其空载运行数据 U_{f0} 、 I_{f0} ，并定义为 $U_{fB}=U_{f0}$ ， $I_{fB}=I_{f0}$ （发电机为不考虑饱和影响的线性化模型）。

6.3 发电机空载试验

6.3.1 AVR 装置自动零起升压试验应符合下列要求

- a) 性能要求：发电机自动零起升压时，AVR 装置应保证发电机定子电压最大值不大于额定值的 110%；
- b) 检测方法：在仿真系统中临时加入较低的但高于起励所需的磁场电压的正限幅值，向 AVR 装置发出起励指令后，录波观察发电机电压是否出现超调，应记录达到稳态值的时间；
- c) 若 AVR 装置在试验室环境下不满足控制逻辑要求时，可不做此项试验。

6.3.2 发电机空载阶跃响应试验应符合下列要求

- a) 性能要求：阶跃量宜为 5%，电压上升时间不应大于 0.5s，振荡次数不应超过 3 次，调节时间不应超过 5s。超调量不应大于阶跃量的 30%。
- b) 检测应采用下列方法：
 - 1) 应按照 AVR 装置电压控制主环的模型框图设置励磁系统稳态增益和暂态增益。设置稳态增益应大于发电机同步电抗与电压静差率的比，设置暂态增益应足够大，使得励磁系统在发电机电压瞬间下降 15%~20%额定值时能输出强励顶值电压；
 - 2) AVR 装置升压平稳后，按照阶跃扰动不使励磁系统进入非线性区域来确定阶跃量，宜进行 ±5%阶跃响应试验，记录发电机电压 U_t 、磁场电流 I_f 、磁场电压 U_f 或控制电压 U_c 波形，计算性能指标。选择较小上升时间和适当超调量的 PID 参数作为以后试验的典型参数；
- c) 检测评判：空载阶跃响应特性应符合标准要求，AVR 装置输出波形对称性良好。

6.3.3 AVR 装置输出线性度检查应符合下列要求

- a) 性能要求：发电机空载线性范围内进行阶跃响应试验，励磁系统增益应保持不变；
- b) 检测应采用下列方法：
 - 1) 对 AVR 装置加入 2%~15%阶跃扰动，最大阶跃量以不出现顶值限幅电压为准，录波观察 AVR 装置的输出最大值在线性区域内是否与加入的阶跃扰动量成正比关系；
 - 2) 应按公式 (4) 计算励磁系统增益：

$$K_{AVR} = [(U_{cmax}^* - U_{c0}^*) / U_{cB}^*] / \Delta U_{ref}^* \quad (4)$$

式中：

U_{cB}^* 、 U_{c0}^* 、 U_{cmax}^* ——AVR 装置输出电压基准值、初始值和最大值，p.u.；

ΔU_{ref}^* ——机端电压给定阶跃量，p.u.。

上述方法测量计算的 AVR 增益一般为暂态增益 K_T 。

- c) 检测评判：测量得到的增益应与 AVR 装置设置相符，测量与 AVR 装置设置的增益误差 $\leq 5\%$ ，且不随扰动量大小而变化。

6.3.4 AVR 模型与 AVR 装置之间空载阶跃响应比较应进行下列试验

- a) 性能要求：AVR 模型与 AVR 装置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 的偏差允许值应略高于 DL/T 1167 标准规定的要求，具体数据见表 1。

表 1 AVR 模型与 AVR 装置的偏差允许值

品质参数	参数范围	偏差允许值（模型测量值-装置测量值）
t_{UP}	全部	$\pm 0.05\text{s}$
t_p	0s~0.5s	$\pm 0.05\text{s}$
	>0.5s	$\pm 0.1\text{s}$
M_p	0~10%	$\pm 2\%$
	>10%	± 0.2 实测值
t_s (可选项)	全部	$\pm 1\text{s}$
N (可选项)	全部	≤ 0.5

- b) 检测方法：根据本标准 6.3.2 试验确定的 AVR 装置参数，建立仿真系统的 AVR 模型，进行相同工况下的发电机空载阶跃响应试验；
- c) 检测评判：首先应使用表 1 所列指标检测 AVR 模型的准确度，然后将 AVR 模型与 AVR 装置在相同工况下得到的发电机磁场电压进行比较，应具有一致的稳态值和动态特性。

6.3.5 AVR 装置调压性能检查应符合下列要求

- a) 性能要求：要求调节过程平滑，不发生操作部件接点粘连现象。手动励磁调节时，上限不应低于发电机额定磁场电流的 110%，下限不应高于发电机空负荷磁场电流的 20%。自动励磁调节时，发电机空负荷电压能在额定电压的 70%~110%范围内稳定平滑的调节，负载时宜在 90%~110%范围内稳定的调节；
- b) 检测方法：发电机由空载到负载运行，通过增减磁操作使发电机升降压，空载、负载时记录自动调压范围和手动调节的上下限；
- c) 检测评判：调节过程平稳，调压范围符合标准要求。

6.3.6 自动/手动正常切换试验应符合下列要求

- a) 性能要求：机端电压在 AVR 装置切换过程中波动幅值不应超过额定电压的 1%；
- b) 检测方法：按制造厂缺省值设置 AVR 装置手动环节参数，调整发电机电压为额定值，稳定运行时进行 AVR 装置自动/手动和手动/自动方式的切换；
- c) 检测评判：切换过程中机端电压波动幅值不应超过规定值、且切换前后机端电压稳态值变化不应超过额定值的 1%。

6.3.7 AVR 装置手动阶跃响应试验应符合下列要求

- a) 性能要求：发电机空载阶跃扰动后应保持稳定运行；
- b) 检测方法：调整 AVR 装置手动环节参数，应进行 5%~10%发电机空载额定磁场电流阶跃响应试验；
- c) 检测评判：应满足稳定运行要求。

6.3.8 自动逆变灭磁试验应符合下列要求

- a) 性能要求: AVR 装置自动方式下逆变灭磁时, 不应发生逆变颠覆, 晶闸管整流器的控制角 α 应达到最大值, 且控制电压 U_c 波形在随后的逆变过程中应保持平稳, 形态与设计相符;
- b) 检测方法:
 - 1) 在仿真系统中增加判据, 防止出现磁场电流负值;
 - 2) AVR 装置升压到额定值后启动停机程序, 录波记录 U_{cmin} 及灭磁时间常数。
- c) 检测评判: 灭磁性能满足要求, 且不发生异常扰动。

6.3.9 V/Hz 限制 (以下简称 VFL) 及保护环节试验

6.3.9.1 AVR 装置试验应符合下列要求

- a) 性能要求: VFL 限制特性应与发电机及主变压器的过激磁特性能力低者匹配, 应与过励磁保护的定时限和反时限特性配合, 动作定值和延时与设置相符;
- b) 检测方法:
 - 1) 确定 VFL 介入位置应在无功调差环节后; 设置 VFL 限制定值, 和发变组保护比较, 原则上留有 10% 的裕度: 包括启动值、动作值、返回值及相应的延时或反时限特性;
 - 2) 保持发电机频率为 50Hz, 缓慢增大 AVR 装置的给定值 U_{ref} , 直到 VFL 限制动作, 静态检查 VFL 的启动值、动作值、返回值及延时或反时限特性的准确性;
 - 3) 在 VFL 限定值附近进行 +2% ~ +10% 的给定电压阶跃试验, 动态检查 U_i 和 U_c 波形是否正常, 其中 U_c 波形应有明显的下调过程;
 - 4) 保持 AVR 装置给定电压不变, 在 VFL 限定值附近进行频率突降 2% ~ 10% 的阶跃试验, 动态检查 U_i 和 U_c 波形是否正常;
 - 5) 若 AVR 装置中有 VFL 低频保护, 缓慢降低原动机的转速至 VFL 保护整定值以下, 检查 VFL 低频保护的动作值及 AVR 装置行为;
 - 6) 若 AVR 装置中有过压保护, 调整发电机电压至保护整定值以上时检查保护动作及 AVR 装置行为。
- c) 检测评判: VFL 限制定值应与设置相符, 且在发电机空载及负载工况下均能正确发挥作用。

6.3.9.2 AVR 模型的 VFL 试验应符合下列要求

- a) 性能要求: AVR 模型与 AVR 装置比较应具有一致的静态和动态性能;
- b) 检测方法:
 - 1) 在仿真系统中构建与 AVR 装置一样的 VFL 环节模型, 并设置相同的参数;
 - 2) 进行与本标准 6.3.9.1 节检测方法中 2) ~ 4) 相同的试验。
- c) 检测评判: 动作值误差应小于 1%, 时间误差应小于 10%, U_i 和 U_c 波形形态与 AVR 装置一致。

6.3.10 TV 断线试验应符合下列要求

- a) 性能要求: 扰动过程中机端电压波动超过额定值 20% 的时间不应大于 0.5s;
- b) 应采用下列检测方法:
 - 1) 应检查 AVR 装置的 TV 断线控制逻辑, 确认试验接线和操作方法;
 - 2) 根据 AVR 装置控制逻辑应分别检查单 TV 断单相、单 TV 断多相、双 TV 同时断单相、双 TV 同时断不同相、双 TV 同时断多相等情况下励磁系统行为, 直到 AVR 装置切手动运行 (双套运行的 AVR 装置首先进行通道切换, 然后切至手动运行), 检查 TV 断线功能和调节器响应特性。
- c) 检测评判: 检查机端电压最大值不应超过规定值, 切换时间不宜大于 0.3s。

6.3.11 空载最大励磁电流限制可进行下列试验

- a) 性能要求: 扰动过程中机端电压不应超过空载最大励磁电流限制的对应值。
- b) 可采用下列检查方法:

- 1) 整定 AVR 装置的空载最大励磁电流限制值, 检查其他限制器在退出状态;
- 2) 进行机端电压正阶跃扰动试验, 检查机端电压是否受到相应限制。
- c) 检测评判: 检查机端电压最大值不超过规定值, 且未出现异常扰动。

6.4 发电机负载试验

6.4.1 测量精度检查应符合下列要求

- a) 性能要求: 以仿真系统显示数据为准, AVR 装置显示的发电机电压、电流精度不低于 0.5% 额定值, 有功、无功显示精度不低于 1% 额定值;
- b) 检测方法: AVR 装置在自动方式、发电机带负荷运行, 检查各电气量的测量值是否正确, 观察自动和手动调整过程是否平稳;
- c) 检测评判: AVR 装置的测量精度应满足要求。

6.4.2 负载工况下自动/手动正常切换试验应符合下列要求

- a) 性能要求: 发电机端电压在 AVR 装置切换过程中波动幅值不应超过 0.5% 额定值;
- b) 检测方法: AVR 装置手动环节按前述确定的参数设置, 调整发电机出力为额定值, 进行 AVR 装置自动/手动和手动/自动方式的切换; 录波记录各电气量的变化数据;
- c) 检测评判: 发电机端电压波动幅值不应超过规定值。

6.4.3 静差率的测定应符合下列要求

- a) 性能要求: 汽轮机励磁系统应保证同步发电机端电压的静差率为 $\pm 1\%$, 水轮机励磁系统应保证发电机机端调压精度优于 $\pm 0.5\%$, 应符合 GB/T 7409.3—2007 中 5.10 条和 DL/T 583—2006 中 4.2.5 条的规定;
- b) 应采用下列检测方法:
 - 1) 发电机在额定工况下运行, 保持 AVR 装置给定值不变且退出无功调差功能, 记录发电机额定工况下的数据后与系统解列, 进行机组甩负荷试验。
 - 2) 在发电机的转速不变情况下应按式 (5) 计算电压静差率:

$$\varepsilon(\%) = [(U_0 - U_1)/U_N] \times 100\% \quad (5)$$

式中:

U_1 、 U_0 ——甩负荷前后的机端电压, kV;

U_N ——额定机端电压, kV。

在电压静差率为 ε 时, 励磁系统的稳态增益应按式 (6) 计算:

$$K_S = (X_d/\varepsilon) + 1 \quad (6)$$

式中:

X_d ——发电机同步电抗, p.u.。

- c) 检测评判: 静差率应满足标准要求。

6.4.4 调差特性试验应符合下列要求

- a) 性能要求: 励磁系统应保证同步发电机无功电流调差率的整定范围不小于 $\pm 15\%$ 。
- b) 应采用下列检测方法:
 - 1) 确定 AVR 装置中无功电流调差功能模式、极性和具体数值的标定方法;
 - 2) 保持 AVR 装置给定值不变, 但设置不同的调差系数, 在发电机功率因数为零的情况下带额定无功功率解列, 应按式 (7) 计算发电机端的总调差率:

$$D = (U_0 - U_1)/U_N(S_N/Q) \quad (7)$$

式中:

U_1 、 U_0 ——甩负荷前后的机端电压, kV;

U_N ——额定机端电压, kV;

S_N ——发电机额定视在功率, MVA;

Q ——甩负荷前发电机无功, Mvar。

3) 如用户有特殊需求, 检查无功调差环节投入后对电网特别是弱联系系统稳定的影响;

4) 根据 3) 的试验情况, 必要时检查无功调差环节的测量时间常数。

c) 检测评判: 测量计算数据与设置相符。

6.4.5 甩负荷试验应符合下列要求

a) 性能要求: 在额定功率因数下, 当发电机突然甩额定负荷后, 发电机电压超调量不应大于 15% 额定值, 振荡次数不应超过 3 次, 调节时间不应大于 10s。

b) 应采用下列检测方法:

1) 保持 AVR 装置给定值不变, 在无功调差环节投、退两种工况下进行发电机甩额定负荷试验;

2) 根据试验结果, 发电机电压超调量应按式 (8) 计算

$$M_p(\%) = [(U_{\max} - U_0)/U_N] \times 100\% \quad (8)$$

式中:

U_{\max} ——甩负荷时发电机端电压最大值, kV;

U_0 ——甩负荷后的机端电压, kV;

U_N ——额定机端电压, kV。

c) 检测评判: 甩负荷动态特性应符合性能要求, 未出现异常过电压。带无功调差环节甩负荷过程中未发生机端电压超过 VFL 限制器动作值的情况。

6.4.6 强励能力检查

6.4.6.1 对称短路试验应符合下列要求

a) 性能要求: 自并励静止励磁系统顶值电压倍数在发电机额定电压时不应低于 2.25 倍; 当发电机端电压下降 15%~20% 时, 励磁系统应能在 0.1s 内输出磁场电压达到强励顶值。

b) 应采用下列检测方法:

1) 发电机带额定负载, 进行 AVR 装置持续时间 0.5s、发电机给定阶跃量为 15%~20% 的扰动试验, 录波记录定子电压 U_t , 磁场电压 U_f , 磁场电流 I_f 和控制电压 U_c 的初始值及最大值, 观察 U_c 最大输出应到顶值。

2) 发电机主变压器高压侧近端三相短路 0.1s 响应试验:

发电机带额定有功、一半额定无功负荷运行, 主变压器高压侧发生三相短路, 选择过渡电阻使得机端电压最低值为 0.8p.u., 切除故障线路时间为 0.1s, 录波记录 U_t 、 U_f 、 I_f 和 U_c 的初始值、最大和最小值及稳态值等变化情况, 观察 U_c 最大输出应到顶值。

c) 检测评判: 两种方法都应使励磁系统输出电压达到强励顶值。

6.4.6.2 不对称短路试验应符合下列要求

a) 性能要求: 主变压器高压侧发生单相和两相短路故障时同步移相电路正确工作, AVR 装置不应出现异常退出。

b) 应采用下列检测方法:

1) 设置短路点, 使短路时机端电压最小宜为 50% 额定值, 短路时间不应小于 0.1s; 对 AVR 装置控制的发电机进行不对称短路试验;

2) 在仿真系统中对 AVR 模型进行相同工况的不对称短路试验。

c) 检测评判: AVR 装置应能正常工作, 与 AVR 模型试验结果比较, 应具有一致的动态特性。

6.4.7 电力系统稳定器 (PSS) 性能试验应符合下列要求

a) 对于 AVR 装置 PSS 性能及试验手段除应满足 DL/T 1231 标准规定外还有下列要求:

1) PSS 环节应具有手动投退功能并可按整定的发电机有功功率量值自动投退;

2) 应能接受外部试验信号, 能进行励磁系统无补偿频率特性测量;

- 3) 应能在线显示、修改和保存 PSS 设置参数;
- 4) 应能将转速信号转换成模拟量信号供外部测量;
- 5) PSS 应能在 0.1Hz~2.0Hz 范围内提供有效正阻尼;
- 6) 反调要求: 发电机有功功率快速变化时, 无功功率变化量小于 30%额定值;
- 7) 对于有电动机运行工况要求的 AVR 装置, PSS 应能正常工作, 并提供正阻尼。
- b) 应采用下列检测方法:
 - 1) AVR 装置在自动方式运行, 分别在发电机大方式 ($P=P_N$, $Q=0$) 和小方式 ($P=0.5P_N$, $Q=0.5Q_N$) 下用频谱仪通过施加白噪声的方法, 测量发电机励磁系统在 0.1Hz~2.0Hz 范围内无补偿频率特性;
 - 2) 分析确认 PSS 模型结构, 选择适当参数, 进行 PSS 环节有补偿频率特性的计算;
 - 3) 分别在发电机最大和最小运行方式下, 进行励磁系统 2%~5%无 PSS 的机端电压阶跃扰动试验, 主要录制 U_i 、 P 、 Q 、 U_f 和 U_c 等电气量, 记录和计算在本机振荡模式下的有功功率振荡频率及阻尼比;
 - 4) 将 PSS 增益临时设置为 2~5 标么值, PSS 投入后逐渐增加机组有功出力, 记录 PSS 自动投入时的有功功率值, 观察 PSS 投入后输出噪声满足要求;
 - 5) 分别在发电机最大和最小运行方式下, 进行 2%~5%的电压阶跃扰动, 检查 PSS 投入后系统的阻尼变化。也可参考表 2 进行阻尼比的估算;

表 2 按有功振荡次数估计阻尼比

振荡次数	0.5	1	1.5	2	3	5
阻尼比	0.69	0.48	0.3	0.23	0.16	0.10

- 6) PSS 临界增益检查。PSS 投入后, 逐步增加 PSS 的输出增益, 直到发电机磁场电压 U_f 振荡发散为止, 整定 PSS 增益为临界增益的 1/3~1/5。对于 PSS 内部设置了非标限幅的 AVR 装置, 原则上增益不宜大于 10p.u.;
- 7) PSS 抗反调能力检查。调整仿真系统中原动机模型及参数, 使有功功率快速变化, 录波检查 AVR 装置输出及无功功率不应有较大变化;
注: 下列数据供试验参考:
 - 国内汽轮机组允许的有功负荷调整率一般为:
 - 3% P_N /min: 300MW 机组;
 - 5% P_N /min: 500MW 以上机组;
 - 100MW/min: RB (相当于故障甩负荷)。
- 8) 检查 PSS 投入后抑制 0.6Hz 以下低频振荡的效果。在仿真系统中增加并联运行机组台数, 检验 0.4Hz~0.6Hz 范围内 PSS 抑制低频振荡效果; 增加各台机组的转动惯量, 进一步检验 0.13Hz~0.4Hz 范围内 PSS 抑制低频振荡的效果。
- 9) 有条件时, 还应检查 AVR 装置 PSS 中发电机转速信号计算处理的正确性。
- c) 检测评判: 在本机振荡模附近, 有 PSS 的阻尼比提高大于 0.1~0.2; 反调满足要求。在 0.6Hz 以下 PSS 仍应正常发挥作用, 且不对 AVR 装置其他限制环节产生不利影响。

6.4.8 自并励系统负载仿真比较试验应符合下列要求

- a) 性能应符合下列要求:
 - 1) 发电机负载仿真对定子电压 U_i 波形要求参照表 1 的数据;
 - 2) 对有功功率 P 波形的具体要求是: 发电机带额定有功负荷, 进行有、无 PSS 的 2%~5% 发电机机端电压阶跃仿真; 比较发电机有功功率的振荡频率和衰减阻尼比。AVR 模型和

AVR 装置的频率相对偏差不应大于 20%；AVR 装置的阻尼比小于 0.1 的，AVR 模型阻尼比相差不应大于 0.02；AVR 装置阻尼比大于 0.1 的，AVR 模型阻尼比相差不应大于 0.05。

- b) 应采用下列检测方法：
- 1) 设置仿真系统中“AVR 模型”参数和实际“AVR 装置”参数一致；
 - 2) 对 AVR 模型分别进行发电机最大和最小运行工况下，2%~5%的无 PSS 电压阶跃扰动试验，与 AVR 装置比较阻尼比；
 - 3) 对 AVR 模型分别进行发电机最大和最小运行工况下，2%~5%的有 PSS 电压阶跃扰动试验，与 AVR 装置比较阻尼比；
 - 4) 检查 AVR 模型的 PSS 抑制 0.6Hz 以下低频振荡的效果。在仿真系统中增加并联运行机组台数，检验 0.4Hz~0.6Hz 范围内 PSS 抑制低频振荡效果；增加各台机组的转动惯量，进一步检验 0.13Hz~0.4Hz 范围内 PSS 抑制低频振荡的效果。
- c) 检测评判：比较 AVR 模型和 AVR 装置的试验录波图，各主要关注电气量变化应一致、满足性能指标要求。

6.4.9 过励限制（OEL）和过励保护（OEP）性能试验

6.4.9.1 AVR 装置中过励限制（OEL）的整定原则

应在发电机转子绕组过热允许时间前动作，应在励磁绕组过负荷保护和励磁变压器过流保护动作前动作。强励持续时间、反时限特性和强励倍数与设备整定相符并与 DL/T 843 标准规定的要求一致。

6.4.9.2 AVR 装置试验应符合下列要求

- a) 性能应符合下列要求：
- 1) 过励瞬时电流限制规定为 2 倍发电机磁场电流额定值：即 $I_{fmax}=2I_{fN}$ ；
 - 2) OEL 反时限特性除应满足 GB/T 7064 标准对转子过流能力的规定外，还应与发电机保护配合，在动作延迟时间上不大于表 3 的数值，原则上留有 10%的裕度；

表 3 发电机磁场电流反时限特性（C=33.75）

磁场电流/额定磁场电流	2.09	1.46	1.25	1.13
时间/s	10	30	60	120

- 3) OEL 反时限动作后，发电机磁场电流回调至 $1.1I_{fN}$ 以下的时间不宜超过 2s。
- b) 应采用下列检测方法：
- 1) 静态应检查下列项目：
 - ◆ 检查 OEL 和 OEP 环节模型结构、控制信号介入方式和接入位置；
 - ◆ 检查 OEL 反时限函数满足式（9）或通过参数修正接近式（9）的结果。

(9)

$$[(I_f/I_{fN})^2-1]t=C$$

式中：

I_f 、 I_{fN} ——发电机磁场电流及额定值，A；

t ——反时限持续时间，s；

C ——过热系数。

 - ◆ 检查各参数值可在线整定和调整；
 - ◆ 检查发电机额定负荷及额定电压下 AVR 装置测量的磁场电流值。
 - 2) OEL 动态特性应检查下列项目：
 - ◆ 退出 AVR 装置中与过励限制 OEL 有关的其他限制，如定子过流限制、过无功限制等；调整 AVR 装置给定值使 I_f 大于启动值，检查连续运行的磁场电流限制功能应正确；
 - ◆ 调整仿真系统中过渡电阻值并保持发电机转速不变，使发电机短路的情况下，磁场电

流水平及持续时间满足试验要求（也可以在发电机不固定转速情况下，用适当降低系统侧电压的方法完成本项试验）；

- ◆ 检查在不同的磁场过电流水平下，过励反时限动作特性满足表 3 要求，且与启动值无关。2 倍瞬时电流限制值准确，反时限限制动作后系统稳定且磁场电流回调至启动值以下的时间不宜超过 2s，否则调整环节增益或其他参数以满足要求；
- ◆ 检查 OEL 环节各控制参数改变后对动态特性及稳定状态的影响。

3) 过励保护 OEP 功能检查：根据制造厂提供的 AVR 装置的设计逻辑进行检查。

c) 检测评判：OEL 动作后瞬时电流限制、反时限特性满足要求；OEP 功能及动作行为与设计相符且不发生异常扰动。

6.4.9.3 AVR 模型的 OEL 比较试验应符合下列要求

- a) 应采用下列检测方法：
 - 1) 在仿真系统中建立与 AVR 装置结构一致的 OEL 模型并设置相同的参数；
 - 2) 对 AVR 模型进行与 AVR 装置相同的 OEL 动态特性仿真试验；
 - 3) 当发现仿真结果与 AVR 装置不一致时，应检查分析 AVR 模型及参数的可信程度，重新进行仿真试验直到满足要求。
- b) 检测评判应符合下列要求：
 - 1) AVR 模型的瞬时电流限制值与 AVR 装置一致，误差小于 2%；
 - 2) AVR 模型的反时限特性动作值、限制值和返回值与 AVR 装置一致，动作值、限制值误差小于 2%，时间误差小于 10%；
 - 3) AVR 模型磁场电流 I_f 动态特性与 AVR 装置基本一致，稳定状态一致。

6.4.10 定子过流限制（SCL）性能试验（可选项）

6.4.10.1 AVR 装置中定子过流限制（SCL）的整定原则

应先于发电机定子过负荷保护动作。SCL 环节应能区分感性和容性过流情况，感性过流时应减小励磁，容性过流时应增加励磁。

6.4.10.2 AVR 装置试验应符合下列要求

- a) 性能应符合下列要求：
 - 1) 定子电流应在 0%~200%额定值范围内有良好的测量线性度；
 - 2) SCL 感性过流反时限特性除应满足 GB/T 7064 标准对定子过流能力的规定外，还应与发电机保护配合，在动作延迟时间上不大于表 4 的数值，原则上留有 10%的裕度；

表 4 发电机定子电流反时限特性 ($C=37.5$)

定子电流/额定定子电流	2.09	1.46	1.25	1.13
时间/s	11.13	33.14	66.67	135.4

3) 发电机容性过流 SCL 动作时应保持机组稳定运行。

b) 检测方法：

- 1) 静态检查应符合下列要求：
 - ◆ 检查 SCL 环节模型结构、控制信号介入方式和接入位置；
 - ◆ 检查 SCL（感性）反时限函数计算公式，对于汽轮发电机应满足式（10）或通过参数修正接近式（10）：

$$[(I_t/I_{IN})^2-1]t=C \tag{10}$$

式中：

I_t 、 I_{IN} ——发电机定子电流及额定值，kA；

t ——反时限持续时间, s;

C ——过热系数。

- ◆ 检查各参数值可在线整定和调整。

2) SCL 动态特性检查应符合下列要求:

- ◆ 退出 AVR 装置中与定子过流限制有关的其他限制, 如转子过励限制等, 检查发电机能以设置的最大定子电流连续正常运行;
- ◆ 保持发电机转速不变、适当限制初始无功, 调整仿真系统中过渡电阻值使发电机短路的情况下、定子电流无功分量及持续时间满足试验要求 (也可以在发电机不固定转速情况下, 用有功越限、系统电压下阶跃、AVR 上阶跃等方法完成本项试验);
- ◆ 在发电机高压侧进行三相短路试验, 记录 AVR 的响应特性曲线, 关注动作切换时间、检查在不同过流水平下, SCL 感性过流反时限动作特性满足要求;
- ◆ 检查 SCL 感性过流环节各控制参数改变后对动态特性及稳定状态的影响;
- ◆ SCL 容性过流环节检查: 机组满负荷进相运行, 用 AVR 装置给定电压负阶跃或系统电压正阶跃等方法进行扰动试验, 适当选择控制增益、检查 SCL 容性过流环节动作后, 机组稳定运行的能力。

c) 检测评判: SCL 动作后系统稳定、反时限特性满足要求, 过流限制后调节稳定, 不发生振荡。

6.4.10.3 AVR 模型的 SCL 比较试验应符合下列要求

a) 应采用下列检测方法:

- 1) 在仿真系统中建立与 AVR 装置结构一致的 SCL 模型并设置相同的参数;
- 2) 对 AVR 模型进行与 AVR 装置相同的仿真试验。

b) 应符合下列检测评判要求:

- 1) AVR 模型的反时限特性动作值、限制值和返回值与 AVR 装置一致, 动作值、限制值误差小于 2%, 时间误差小于 10%;
- 2) AVR 模型定子电流 I_t 动态特性与 AVR 装置基本一致, 稳定状态一致。

6.4.11 低励限制 (UEL) 性能试验

6.4.11.1 AVR 中低励限制 (UEL) 的整定原则

应保证发电机静稳极限并留有一定裕度, 且避免在机组失磁保护前动作。

6.4.11.2 AVR 装置试验应符合下列要求

a) 性能应符合下列要求:

- 1) 在计及电压修正后低励限制实测动作值与 AVR 装置设置定值的误差 $\leq 5\%$ 。
- 2) 在低励限制动作且扰动量不超过 10% 的阶跃响应试验中不应出现振荡发散现象。
- 3) 整定值在静稳极限功率边界回缩 10% 以上时, AVR 装置输出平稳。

b) 应采用下列检测方法:

- 1) 检查 UEL 环节模型结构、控制信号介入方式和接入位置, 确认 UEL 环节特性符合相关标准要求。
- 2) UEL 环节整定范围下限按 $P=0$, $Q=-1/3Q_N$; $P=P_N$, $Q=-(0\sim 0.05)Q_N$ 设置, 上限按距静稳极限功率裕度 10% 考虑。
- 3) 定值准确性检查。退出最小磁场电流等限制, 保持有功功率在某值下不变, 降低 AVR 装置电压给定值或提高系统侧电压从而改变无功的输出值, 直至低励限制动作, 记录 Q 动作值和相关电气量。
- 4) 大小扰动检查。在低励限制点附近、不同有功负荷下进行 $-2\%\sim -10\%$ 阶跃扰动试验, 关注动作切换时间, 检查 Q 应被迅速抬高, 且不发生等幅或发散的振荡。
- 5) 逐渐增加 UEL 环节增益, 通过小扰动阶跃试验检查使 AVR 装置稳定工作的极限增益。在

发电机有功额定值附近，应检查 UEL 限制特性有较大斜率时的稳定运行情况。

- 6) 在低励限制点附近通过扰动试验，优化 UEL 环节配置参数并进行参数改变后敏感度分析。
- 7) 在静稳极限功率附近检查小扰动的稳定性，分析发电机功角 δ 变化情况。
- 8) 最小磁场电流限制功能（AVR 装置有此设计时）应检查下列内容：
 - ◆ 退出或屏蔽 UEL 限制功能，检查发电机进相时此限制功能有效性及准确性；
 - ◆ 投入 UEL 限制功能后，检查 UEL 和最小励磁电流限制匹配特性；
 - ◆ 检查最小磁场电流限制动作后是否引起低励保护（UEP）动作。
- 9) 低励保护（UEP）的动作情况检查。应根据制造厂提供的 AVR 装置的设计逻辑进行检查。
- 10) 若 AVR 装置设计有手动无功限制功能，检查 AVR 装置手动无功限制功能，包括准确性和有效性检查。

- c) 检测评判：UEL 环节动作值与设置相符，静态和动态性能满足要求。UEP 环节功能及动作行为与设计相符。

6.4.11.3 AVR 模型的 UEL 比较试验应符合下列要求

- a) 应采用下列检测方法：
 - 1) 在仿真系统中建立与 AVR 装置一致的 UEL 模型并设置相同的参数；
 - 2) 对 AVR 模型进行 6.4.11.2 项中 3) 项～7) 项的试验。
- b) 检测应采用下列方法评判：
 - 1) AVR 模型的限制值与 AVR 装置一致，动作值误差小于 5%；
 - 2) AVR 模型中无功功率 Q 动态特性与 AVR 装置一致，稳定状态一致。

6.4.12 AVR 装置各辅助环节特性配合试验

6.4.12.1 AVR 装置 VFL 与 UEL 环节特性配合试验应符合下列要求

- a) 应采用下列检测方法：
 - 1) 对于叠加式结构的 AVR 装置，可以同时投入 VFL 与 UEL 环节，其他限制器退出或屏蔽。VFL 环节可采用定时限 1.05 倍 0.5s 延时，进行系统电压 $\pm 15\%$ 阶跃扰动试验，录制动态响应波形图；
 - 2) 对于比较门结构的 AVR 装置，可以在扰动试验中通过动态记录的波形图，分析 VFL 与 UEL 环节的切换过程是否正常。
- b) 检测评判：叠加式结构的 AVR 装置，其 UEL 环节应限制发电机进相深度，同时 VFL 环节也能限制机端电压继续升高；比较门结构的 AVR 装置，应在扰动切换过程中运行平稳。

6.4.12.2 AVR 装置 OEL 与 UEL 环节特性配合试验应符合下列要求

- a) 应采用下列检测方法：
 - 1) 对于叠加式结构的 AVR 装置，可以同时投入 OEL 与 UEL 环节且采用前述试验的典型设置参数，其他限制器退出或屏蔽。调整发电机无功出力接近零，在发电机端部进行经过渡电阻的三相短路（或用直接降低系统侧电压的方法）试验，录制动态响应波形图；
 - 2) 对于比较门结构的 AVR 装置，可以在扰动试验中通过动态记录的波形图，分析 OEL 与 UEL 环节的切换过程是否异常。
- b) 检测评判：叠加式结构的 AVR 装置，UEL 环节应正确动作限制发电机进相深度、同时 OEL 环节也应保证发电机转子不发生危险的过电流；比较门结构的 AVR 装置，应在扰动切换过程中运行平稳。

6.4.12.3 AVR 装置 OEL 与 SCL 环节特性配合试验应符合下列要求

- a) 检测方法：AVR 装置同时投入 OEL 与 SCL 环节且采用前述试验的典型设置参数，其他限制器退出或屏蔽。调整发电机负荷为额定值，在其端部进行经过渡电阻的三相短路（或用直接降低系统侧电压的方法）试验，录制动态响应波形图；

- b) 检测评判: SCL 环节不应限制励磁系统正常强励能力, OEL 环节在强励时应限制磁场电流不超过规定值。

6.4.12.4 AVR 装置 UEL 与 PSS 环节特性配合试验

本检测仅适用于 UEL 动作后 PSS 功能仍保留的 AVR 装置, 试验应符合下列要求:

- a) 应采用下列检测方法:
 - 1) AVR 装置同时投入 UEL 与 PSS 环节且采用前述试验的典型设置参数, 其他限制器退出或屏蔽。减小 AVR 装置给定使发电机进相到 UEL 环节定值附近;
 - 2) 用突然降低 AVR 装置给定值或用直接升高系统侧电压的方法进行发电机无功的负阶跃扰动, 录制有、无 PSS 情况下的动态响应波形图;
 - 3) 当 UEL 具有改善阻尼特性的相关控制功能时, 检查阻尼改善情况。
- b) 检测评判。UEL 环节动作后, 不对 PSS 阻尼特性产生明显影响。

6.4.12.5 AVR 装置各辅助附加环节全投的短路试验应符合下列要求

- a) 检测方法: AVR 装置投入全部辅助附加环节且采用前述试验的典型设置参数, 在发变组高压侧经过渡电阻进行短路试验, 录制动态响应波形图;
- b) 检测评判: AVR 装置各辅助附加环节应有正确的动作配合, 不发生危及设备安全和系统稳定的扰动。

6.4.12.6 AVR 装置的无功调差环节对 PSS 影响有条件时可进行的试验

- a) 检测方法应符合下列要求:
 - 1) 根据检测委托方要求设置仿真系统中电网部分结构;
 - 2) 在 PSS 投入情况下, 分别设置发电机变压器组的调差系数为-5%和-10%, 进行机端电压给定值的±5%阶跃试验;
 - 3) 比较无功调差环节投退对 PSS 阻尼强弱的影响。
- b) 检测评判: 无功调差环节投退不对 PSS 阻尼效果产生明显的影响。

6.4.13 AVR 模型各辅助附加环节特性配合比较试验应符合下列要求

- a) 检测方法: 在仿真系统的 AVR 模型中输入与 AVR 装置一致的典型设置参数, 进行本标准 6.4.12.1 项~6.4.12.5 项的仿真试验, 录制相应的动态响应波形图;
- b) 检测评判: AVR 模型的动态特性应与 AVR 装置基本一致。

7 应用于交流励磁机励磁系统的 AVR 性能检测

7.1 确定试验用数学模型和参数

7.1.1 AVR 建模应符合下列要求

- a) 确定性能检测中 AVR 装置的 PID 校正环节的数学模型;
- b) 确定励磁系统采用的反馈校正形式(励磁机磁场电压、电流, 发电机磁场电压、硬反馈、软反馈等);
- c) 确定反馈校正的具体位置。

7.1.2 发电机和励磁机参数应符合下列要求

- a) 发电机。若检测委托方无特殊要求, 交流励磁机励磁系统性能检测中采用的计算数据参见附录 A, 与自并励静止励磁系统不同之处是数学模型中的发电机参数应考虑饱和影响;
- b) 励磁机。若检测委托方无特殊要求, 采用附录 A 中提供的 2442kVA 交流励磁机, 励磁形式为无刷励磁。

7.2 标幺化处理

7.2.1 AVR 装置与仿真系统的衔接应符合下列要求

- a) 应符合下列总体处理原则:

- 1) AVR 装置输出最大值不超过仿真系统所能接受的最大直流电压值;
- 2) 发电机空载额定, AVR 装置输出与实际系统励磁机磁场电压 U_{ef} 一致; 仿真系统的反馈值与实际系统一致。

b) 确定标幺值应符合下列要求:

- 1) 在 AVR 装置中输入附录 A 提供的实际系统原始参数;
- 2) 启动 AVR 装置, 调整输入至仿真系统的信号电压值, 使大扰动阶跃中 AVR 装置的最大输出不超过仿真系统能够接受的最大直流电压值;
- 3) 仿真系统暂不考虑发电机饱和, 调整 AVR 装置的给定电压 U_{ref} , 使发电机电压达到额定值 U_{IN} , 取所需发电机磁场电压对应于励磁机空载气隙线上输出直流电压所需励磁机磁场电流所对应的励磁机磁场电压为控制电压基值, 定义控制电压 U_c 标幺化的基准值;
- 4) 综合考虑仿真系统中励磁功率单元模型相关参数 (如补偿增益 K_B 等), 使得当 AVR 装置触发控制角与理论计算值一致时, 计及饱和影响后的发电机电压为额定值;
- 5) 调整仿真系统信号输出电气量, 使 AVR 装置接受的反馈值与实际系统一致;
- 6) 对连接后的交流励磁机励磁系统进行大扰动阶跃响应试验, 检查 AVR 装置最大输出与计算数据一致。

7.2.2 在试验录波器中确定有名值应符合下列要求

- a) 当发电机空载额定, 定义试验录波器记录的发电机磁场电压 U_f 、电流 I_f 、励磁机磁场电压 U_{ef} 、电流 I_{ef} 为考虑饱和等影响的空载有名值基值;
- b) 在发电机额定工况下 (额定机端电压、电流, 频率、额定有功和额定功率因数), 定义录波器测量得到的发电机磁场电压 U_{fN} 、电流 I_{fN} 、励磁机磁场电压 U_{efN} 、电流 I_{efN} 为负载额定有名值。

7.3 交流励磁机励磁系统在发电机空载时的试验

7.3.1 发电机空载特性检查应符合下列要求

- a) 性能要求: 交流励磁机和发电机特性与实际系统一致;
- b) 检测方法: 调整 AVR 装置给定值, 试验录波器记录发电机端电压 U_t 和励磁机磁场电流 I_{ef} , 仿真发电机空载、励磁机负载特性;
- c) 检测评判: AVR 装置调整过程平稳, 试验录波器记录的 U_t 和 I_{ef} 等数据与现场实际机组特性一致, 在额定工况附近最大相对误差不超过 3%。

7.3.2 参数优化调整试验应符合下列要求

- a) 性能要求: 空载 5% 阶跃试验时, 交流励磁机励磁系统的电压上升时间不大于 0.6s, 振荡次数不超过 3 次, 调节时间不超过 10s, 超调量不大于 40%。
- b) 应采用下列检测方法:
 - 1) 不加入任何反馈环节时, 初步选择 PID 参数, 按照阶跃扰动不使励磁系统进入非线性区域来确定阶跃量, 进行发电机空载 $\pm 2\% \sim \pm 5\%$ 阶跃扰动试验, 检查发电机定子电压响应情况;
 - 2) 调整 PID 参数, 使励磁系统动态响应特性达到最优;
 - 3) 投入励磁机反馈环节、调整参数, 再次进行阶跃扰动试验, 检查励磁系统动态特性应得到明显改善;
 - 4) 将本节确定的优化参数作为以后试验的典型参数。
- c) 检测评判:
 - 1) 优化后的励磁系统动态特性应满足要求;
 - 2) 对于无刷高起始励磁系统, 发电机磁场电压应在 0.1s 内达到最大值。

7.3.3 线性度和调节性能检查试验应符合下列要求

- a) 性能要求: 当 AVR 装置最大输出未进入非线性区域时, 控制电压 U_c 或励磁机磁场电压 U_{ef} 的

变化符合线性度要求。

b) 应采用下列检测方法:

- 1) AVR 装置选择优化后的参数, 进行电压给定的阶跃响应试验;
- 2) AVR 装置选择不同的增益, 进行电压给定的阶跃响应试验;
- 3) 应按式 (11) 计算交流励磁机励磁系统暂态增益:

$$K_T = [(U_{\text{cmax}}^* - U_{\text{c0}}^*) / U_{\text{cB}}^*] / \Delta U_{\text{ref}}^* \quad (11)$$

式中:

U_{cB}^* 、 U_{c0}^* 、 U_{cmax}^* ——交流励磁机励磁系统的 AVR 装置输出电压基准值、初始值和最大值, p.u.;

ΔU_{ref}^* ——发电机给定电压改变量, p.u.。

c) 检测评判: 在线性区域内调节稳定且暂态增益与 AVR 装置整定值一致。

7.3.4 AVR 装置参数改变时对调节品质影响试验应符合下列要求

a) 性能要求: AVR 装置参数可调整范围应与试验中用户要求的机组类型相适应。

b) 应采用下列检测方法:

- 1) 在优化参数基础上将 AVR 装置增益改变 $\pm 50\%$, 进行发电机空载 $2\% \sim 5\%$ 阶跃扰动试验, 检查对励磁系统调节品质的影响;
- 2) 在优化参数基础上, 仅改变 AVR 装置的积分或微分参数, 重复上述试验;
- 3) 在优化参数基础上, 改变 AVR 装置的反馈环节参数, 检查对励磁系统调节品质的影响。

c) 检测评判: AVR 装置参数改变后励磁系统动态性能与理论上的计算分析一致。

7.3.5 AVR 装置空载正常切换试验应符合下列要求

a) 性能要求: 发电机定子电压在切换过程中波动幅值不应超过额定电压的 1% 。

b) 检测方法: 按制造厂缺省值设置 AVR 装置手动环节参数, 调整发电机电压为空载额定值, 进行 AVR 装置自动/手动和手动/自动方式的切换。若出现较大的扰动, 应补充进行 AVR 装置的手动阶跃试验, 并重新调整相关参数, 直到满足要求为止。

c) 检测评判: AVR 装置切换过程中, 机端电压波动幅值不应超过规定值、且切换前后机端电压稳态值应保持不变。

7.3.6 发电机空载灭磁试验应符合下列要求

a) 性能要求: AVR 装置自动方式下灭磁时, 控制方式与设计相符。

b) 检测方法: 调整发电机定子电压为额定值, 进行发电机灭磁试验。采用逆变灭磁方式的 AVR 装置, 机端电压衰减时间常数与发电机转子绕组时间常数近似相等。

c) 检测评判: 灭磁性能应符合要求。

7.3.7 交流励磁机励磁系统空载仿真试验应符合下列要求

a) 性能要求: 仿真系统中的 AVR 模型的动态特性满足表 1 要求。

b) 检测方法: 在仿真系统的 AVR 模型中设置与 AVR 装置相同的典型参数, 对 AVR 模型进行发电机空载 $2\% \sim 5\%$ 阶跃扰动试验, 比较 AVR 模型与 AVR 装置阶跃响应的异同。

c) 检测评判: 除表 1 要求外, AVR 模型仿真的发电机磁场电压和励磁机磁场电压与 AVR 装置比较, 应具有一致的动态特性。

7.4 交流励磁机励磁系统在发电机负载时的试验

7.4.1 带负荷调整试验应符合下列要求

a) 性能要求: 发电机电压和无功调整平稳、测量精度符合设计要求。

b) 应采用下列检测方法:

- 1) 分别在 AVR 装置自动和手动方式下, 通过增减磁按钮, 改变无功输出值, 观察调节是否稳定, 测量精度是否满足要求, 记录发电机额定工况下各电气量稳态值。

2) 将本试验实测的发电机额定工况下各电气量稳态值与制造厂提供的数据进行比较、记录备案,以实测数据为依据整定 AVR 装置各限制器定值。

c) 检测评判:电压调节平稳、测量精度符合要求。

7.4.2 负载工况下切换试验应符合下列要求

a) 性能要求:发电机定子电压在切换过程中波动幅值不应超过额定电压的 1%。

b) 应采用下列检测方法:

- 1) 按空载试验调整后的数据设置手动环节参数;
- 2) 调整发电机满负荷运行;
- 3) 进行 AVR 装置自动/手动和手动/自动的切换试验,若制造厂提供了两套 AVR 装置,还应进行通道之间的切换试验;
- 4) 根据 AVR 装置试验样机结构,模拟 TV 断线情况,检查 AVR 装置故障切换功能。

c) 检测评判:切换过程中波动幅值不应超过规定、且切换前后机端电压稳态值应保持不变。

7.4.3 负载阶跃扰动试验应符合下列要求

a) 性能要求:励磁系统调节平稳,不发生异常扰动现象。

b) 应采用下列检测方法:

- 1) 退出励磁机反馈环节,进行 1%~5%额定电压给定值阶跃扰动试验,录波记录发电机电压 U_t 、电流 I_t 、发电机磁场电压 U_{f^*} 、电流 I_{f^*} 、励磁机磁场电压 U_{ef} 、电流 I_{ef} 、有功功率 P 和无功功率 Q 的变化波形,观察是否稳定;
- 2) 投入励磁机反馈环节,再次进行 1%~5%额定电压给定值阶跃扰动试验,记录 U_t 、 I_t 、 U_{f^*} 、 I_{f^*} 、 U_{ef} 、 I_{ef} 、 P 、 Q ,观察是否稳定,对比试验结果,计算有功功率振荡的阻尼比;
- 3) 投入 VFL 环节,加大阶跃扰动量值,检查 VFL 环节限制功能正常。

c) 检测评判:励磁系统电压调节平稳,不出现异常过电压,不出现有功振荡发散情况。

7.4.4 检查交流励磁机励磁系统的静差率及甩负荷动态特性应符合下列要求

a) 性能要求:与本标准 6.4.3 和 6.4.5 的要求一致。

b) 应采用下列检测方法:

- 1) 发电机在额定功率因数下运行,AVR 装置的 $U_{ref}=1.0p.u.$;通过甩负荷试验检查静差率及稳态增益;
- 2) 比较反馈环节投、退状态对机组甩负荷特性的影响。

c) 检测评判:静差率及甩负荷动态特性应满足要求,未出现异常过电压。

7.4.5 PSS 性能试验应符合下列要求

a) 性能要求:与本标准 6.4.7 a) 的要求一致。

b) 应采用下列检测方法:

- 1) 根据 AVR 装置结构,选择励磁机反馈环节投/退状态,分别在发电机大方式和小方式下测量交流励磁机励磁系统在 0.1Hz~2.0Hz 范围内无补偿频率特性;
- 2) 选择适当参数,进行 PSS 环节有补偿频率特性的计算;
- 3) 分别在发电机大方式和小方式下,进行励磁系统 1%~5%额定电压给定值的无 PSS 电压阶跃扰动试验,记录和计算在本机振荡模式下的有功振荡频率及阻尼比;
- 4) 设置 PSS 增益,观察 PSS 投运后输出噪声应满足要求;
- 5) 分别在发电机大方式和小方式下,进行励磁系统 1%~5%额定电压给定值的有 PSS 电压阶跃扰动,检查 PSS 投入后系统有功振荡频率和阻尼变化,优化 PSS 相位补偿参数;
- 6) 逐步增加 PSS 输出的增益确定临界增益;
- 7) 检查 PSS 抗反调能力;
- 8) 分别用增加发电机机组数量和增加转动惯量等方法检查 PSS 投入后抑制 0.6Hz 以下低频振

荡的效果。

- c) 检测评判：有 PSS 的阻尼比满足要求，抗反调能力满足要求。在 0.6Hz 以下 PSS 应正常发挥作用。

7.4.6 交流励磁机励磁系统负载仿真试验应符合下列要求

- a) 性能要求：仿真系统的 AVR 模型应在励磁机反馈环节投、退，PSS 环节投、退等情况下具有和 AVR 装置一致的动态特性。
- b) 应采用下列检测方法：
- 1) 在 AVR 模型中输入与 AVR 装置一致的优化参数；
 - 2) 在励磁机反馈环节投/退两种状态下，测量 AVR 模型无补偿频率特性，与 AVR 装置进行比较；
 - 3) 分别在发电机大方式和小方式下，进行 AVR 模型无 PSS 的电压阶跃扰动试验，与 AVR 装置比较有功功率振荡频率及阻尼比；
 - 4) 分别在发电机大方式和小方式下，进行 AVR 模型有 PSS 的电压阶跃扰动试验，与 AVR 装置比较有功功率振荡频率及阻尼比；
 - 5) 检查 AVR 模型的 PSS 投入后抑制 0.6Hz 以下低频振荡的效果。
- c) 检测评判：AVR 模型与 AVR 装置无补偿频率特性一致，PSS 投入后阻尼效果一致， U_t 、 U_f 、 U_{ef} 、 P 四种电气量的波形动态特性一致。

7.4.7 交流励磁机励磁系统强励能力检查应符合下列要求

- a) 性能要求：交流励磁机励磁系统顶值电压倍数不低于 2.0 倍，高起始励磁系统顶值电流倍数不低于 2.0 倍。
- b) 应采用下列检测方法：
- 1) 对 AVR 装置进行发电机带额定负载、持续时间 0.5s~1s、阶跃量为 15% 的阶跃扰动试验，录波记录 U_t 、 I_t 、 U_f 、 I_f 、 U_{ef} 、 I_{ef} 、 P 、 Q ，观察 AVR 装置的控制电压 U_c 最大输出应到顶值。
 - 2) 发电机主变压器高压侧近端三相短路 0.1s 响应试验。发电机带额定有功、一半额定无功负荷运行，主变压器高压侧发生三相短路，选择过渡电阻使主变压器高压侧三相短路时定子电压最低值为 0.8p.u.，在 0.1s 后切除故障，录波记录变化电气量，观察 AVR 装置的控制电压 U_c 最大值，发电机功角 δ 等变化情况。
 - 3) 再次计算交流励磁机励磁系统的暂态增益 K_T 。
 - 4) 在 AVR 模型中重复本节 1)~3) 项的内容。
- c) 检测评判：交流励磁机励磁系统强励能力应满足要求，对于无刷高起始励磁系统，发电机磁场电压应在 0.1s 内达到最大值；仿真的 AVR 模型应与 AVR 装置具有一致的动态特性。

7.4.8 过励限制 OEL 性能试验应符合下列要求

- a) 性能应符合下列要求：
- 1) 过励瞬时电流限制动作值规定为 2 倍励磁机磁场电流额定值，即 $I_{efmax}=2I_{efN}$ ；
 - 2) OEL 反时限特性应与本标准 6.4.9.2 a) 的要求一致。
- b) 应采用下列检测方法：
- 1) 实测发电机额定工况下励磁机磁场电流额定值 I_{efN} 并记录发电机磁场电流值 I_f ；励磁机磁场电流稳态值直接按式 (12) 计算：

$$I_{ef}^* = I_f^* [(1 + K_c)(1 + S_c) + K_d] \quad (12)$$

式中：

I_{ef}^* ——励磁机磁场电流，p.u.；

I_f^* ——发电机磁场电流，p.u.；

K_c ——励磁机换向电抗系数, p.u.;

K_d ——励磁机去磁系数, p.u.;

S_c ——励磁机饱和系数, p.u.。

- 2) 设置 AVR 装置 OEL 环节反时限参数及励磁机反馈环节中的控制参数。
- 3) 在仿真系统中接入 $0.1\Omega \sim 1\Omega$ 的过渡电阻进行非金属性短路或用突然降低系统侧电压的方法, 使励磁机磁场电流或发电机磁场电流达到限制值。
- 4) 启动试验录波器, 进行大扰动试验, 检查瞬时电流限制功能是否正确。
- 5) 调整仿真系统中的过渡电阻值或系统侧电压下降的突变量, 启动试验录波器, 进行 2 倍以下磁场电流限制特性检查, 关注 OEL 环节暂态动作特性能是否满足稳定要求。
- 6) 根据 AVR 装置设计结构, 在低倍率过电流情况时, 观察 AVR 装置切换到其他环节运行后是否平稳。
- 7) 比较励磁机反馈环节相关限制和控制参数对 OEL 限制特性的影响。
- 8) 检查 OEL 环节调节参数改变后对限制性能的影响。
- 9) 有条件时应进行仿真系统的 AVR 模型和 AVR 装置 OEL 环节模型的比较试验。
- c) 检测评判: OEL 限制特性应满足要求, 动作后应运行平稳; 仿真的 AVR 模型中 U_f 及 I_{ef} 动态特征应与 AVR 装置一致。

7.4.9 低励限制 (UEL) 性能试验应符合下列要求

- a) 性能要求, 与自并励静止励磁系统的 UEL 性能要求 6.4.11.2 a) 一致。
- b) 应采用下列检测方法:
 - 1) 在仿真系统中, 逐步提高单机无穷大系统中系统侧电压, 使发电机进相, 检查发电机不同有功负荷下的静稳工作点, 记录发电机功角等数据;
 - 2) 对应于不同有功负荷的静稳工作点, 考虑 10% 以上稳定裕度, 整定 UEL 环节参数;
 - 3) 在不同有功负荷下, 缓慢增加发电机无功进相深度, 静态检查 UEL 定值是否准确, 记录 UEL 实际动作值、返回值和对应的发电机电压;
 - 4) 退出 UEL, 继续增加无功进相深度, 检查有无相关保护动作的情况;
 - 5) 对于不同的有功负荷, 在 UEL 限制点附近进行 $-2\% \sim -10\%$ 阶跃扰动, 关注动作切换时间、检查 AVR 装置应工作平稳, 不发生异常振荡;
 - 6) 逐渐增加 UEL 环节增益, 通过小扰动阶跃试验检查使 AVR 装置 UEL 环节稳定工作的极限增益;
 - 7) 比较 UEL 投、退情况下的响应结果; 分析试验数据, 确定是否需要进行参数优化或敏感度试验;
 - 8) 根据 AVR 装置的结构, 比较励磁机反馈环节投、退状态下, UEL 环节特性的差异、有无异常情况发生;
 - 9) 检查 UEL 环节动作后是否对 PSS 阻尼特性产生明显影响;
 - 10) 有条件时应进行 AVR 模型和 AVR 装置的 UEL 环节的比较试验。
- c) 检测评判: UEL 环节动作值与设置相符, 静态和动态性能满足要求, 仿真的 AVR 模型中 U_f 、 P 、 Q 动态特征应与 AVR 装置一致。

8 对试验报告的要求

8.1 概述

介绍 AVR 装置的型号、软件版本号、制造厂和试验参照的标准。

8.2 测试基本原理和试验内容

简要介绍测试基本原理, 仿真系统情况。试验内容应包括时域、频域, 静态和动态的全部性能。

8.3 试验准备情况

- a) 试验检测部门为具体设备提供的仿真环境说明；
- b) 制造厂提供的 AVR 装置数学模型及相关的参数换算说明等。

8.4 自并励励磁系统检测试验内容

- a) 测试接口及检测记录设备情况说明；
- b) 静态检查应包括相关环节时间常数及调节特性等说明；
- c) 对试验定标情况进行解释；
- d) 发电机空载工况试验应全面反映待检测 AVR 装置电压控制主环、VFL 限制、TV 断线等主要性能、存在问题等；
- e) 发电机负载工况试验应包括转子过励（OEL）、定子过流（SCL）、调差、低励（UEL）及 PSS 投运效果等，主要对影响发电机安全和系统稳定的各种因素进行总结；
- f) 仿真比较试验主要对 AVR 装置的数学模型合理性、可信度及参数可变范围等用比较的方法进行评价。

8.5 交流励磁机励磁系统检测试验内容

- a) 确定 AVR 模型结构。包括常规、高起始，励磁机反馈介入形式等说明；
- b) 对试验定标情况进行解释；
- c) 发电机空载工况试验除全面检测 AVR 装置电压控制主环主要性能外，还应特别关注励磁机反馈环节造成的影响；
- d) 发电机负载工况试验包括 AVR 装置所有辅助限制及控制环节的检测，应特别关注励磁机磁场电流和发电机磁场电流在定值设置时的数据衔接问题；
- e) 仿真比较试验主要对 AVR 装置的数学模型包括励磁机反馈环节的合理性、可信度、参数可变范围等用比较的方法进行评价。

8.6 主要性能检测评价

主要性能评价参见表 5。

表 5 数字式自动电压调节器主要性能检测评价表

	序号	试验检查内容	检查结果
通用检查	1	AVR 装置的模型框图是否反映实际	
	2	AVR 装置参数设置是否明确规范	
	3	AVR 装置能否在线修改参数	
	4	试验过程中软件结构是否常改动	
	5	电压测量环节的时间常数，提供具体数据	
	6	晶闸管整流器的移相环节是否按反余弦处理	
自并励励磁系统	7	AVR 装置的增益是否与设置值相符	
	8	AVR 装置使用典型数据，空载 5%阶跃响应试验技术指标，提供具体数据	
	9	AVR 装置的输出线性度是否良好	
	10	AVR 装置自动、手动调压范围是否与设计一致	
	11	AVR 装置自动与手动切换试验时扰动是否符合要求	
	12	AVR 装置逆变灭磁时是否出现异常	
	13	AVR 装置的 TV 断线检测处理是否合理	

表 5（续）

	序号	试验检查内容	检查结果
自并励磁系统	14	AVR 装置 VFL 设计是否合理，发电机负载时是否有效，定时限或反时限定值是否准确	
	15	仿真的 AVR 模型能否代替 AVR 装置	
	16	AVR 装置在发电机额定工况下量测电气量是否准确	
	17	AVR 装置的电压静差率是否满足要求，提供具体数据	
	18	AVR 装置的无功电压调差范围，提供具体数据	
	19	AVR 装置甩负荷后超调量 M_p ，提供具体数据	
	20	AVR 装置在负载工况下强励能力检查，分别提供阶跃响应及对称短路数据	
	21	机组近端发生不对称短路时，AVR 装置能否正常工作	
	22	AVR 装置使用 PSS 类型和对本机振荡模的抑制效果	
	23	AVR 装置的 PSS 对 0.6Hz 以下低频振荡是否有阻尼效果	
	24	AVR 装置的 PSS 抗反调能力有无异常	
	25	AVR 模型的 PSS 阻尼特性是否与 AVR 装置的 PSS 特性一致	
	26	AVR 装置过励反时限 OEL 设计是否合理，动作定值与特性是否符合要求	
	27	AVR 模型的 OEL 特性是否与 AVR 装置的 OEL 特性一致	
	28	AVR 装置定子过流限制 SCL 设计是否合理，感性过流特性是否符合要求	
	29	AVR 装置定子过流限制（SCL）的容性过流限制是否有效	
	30	AVR 模型的 SCL 感性过流特性是否与 AVR 装置特性一致	
	31	AVR 装置的低励限制 UEL 接入 AVR 方式及位置是否合理，定值是否准确	
	32	AVR 装置的低励限制（UEL）环节动作后是否对 PSS 产生影响	
	33	AVR 模型的 UEL 特性是否与 AVR 装置的 UEL 特性一致	
交流励磁机励磁系统	34	AVR 装置各辅助限制和控制环节配合关系是否合理，特性配合是否良好	
	35	检测委托方提供的 AVR 装置数学模型是否与实际相符	
	36	AVR 装置在优化参数下空载阶跃响应试验具体数据	
	37	AVR 装置输出控制的线性度是否良好	
	38	AVR 装置的励磁机反馈环节投入后 AVR 装置是否能有效提高性能	
	39	AVR 装置是否在负载扰动试验中出现过异常情况	
	40	AVR 装置的静差率及甩负荷特性，提供具体数据	
	41	仿真的 AVR 模型能否正确反映 AVR 装置的特性	
	42	AVR 装置的 PSS 对本机振荡模的抑制效果是否正常	
	43	AVR 装置的 PSS 对 0.6Hz 以下低频振荡阻尼是否有效	
	44	AVR 模型的 PSS 阻尼特性是否与 AVR 装置的 PSS 特性一致	
	45	AVR 装置的强励能力，提供具体数据	

表 5（续）

	序号	试验检查内容	检查结果
交流励磁机励磁系统	46	AVR 装置 OEL 限制特性是否满足要求、是否和发电机磁场绕组过电流承受能力衔接良好	
	47	AVR 模型的 OEL 环节特性是否与 AVR 装置的 OEL 特性一致	
	48	AVR 装置的 UEL 限制特性是否满足要求、限制动作后能否保证稳定	
	49	AVR 模型的 UEL 环节特性是否与 AVR 装置的 UEL 特性一致	
	50	AVR 装置各辅助限制环节特性配合是否良好	

8.7 试验结论

- a) 总结 AVR 装置检测试验中是否存在软件总体性的设计缺陷，是否发生过不正常死循环、死机现象，是否发生过异常动作、停机和灭磁等情况；
- b) 指出试验中发现的 AVR 装置主要问题及对发电机安全运行可能带来的隐患，提出改进的技术建议。

附录 A
(资料性附录)
仿真环境说明

A.1 仿真系统与数字式自动电压调节器的接口

由图 A.1 可见，励磁系统设备涉网性能检测的主体是数字式自动电压调节器—AVR 装置。试验中 AVR 装置的输入模拟量来自仿真系统，主要有来自电压互感器 TV1 的发电机 (G) 定子三相电压模拟信号 U_t 、来自电流互感器 TA 的发电机定子三相电流模拟信号 I_t 、而来自分流器的发电机磁场电流信号 I_f 和整流器后的发电机磁场电压信号 U_f (一般用于监视) 需经过数模 (D/A) 转换后送出。根据需要，仿真系统还可提供降压后的同步电压模拟信号及发电机主开关 (CB) 的位置信号；AVR 装置仅需把内部 PID 输出的控制电压信号 U_c 经标准数模 (D/A) 转换后输出、再经模数 (A/D) 转换后与仿真系统相连，这样就形成了闭环控制系统。另外主变压器 (MT) 的二次电压 U_1 经电压互感器 TV2 送出后，还可检测 AVR 装置的其他特殊功能。

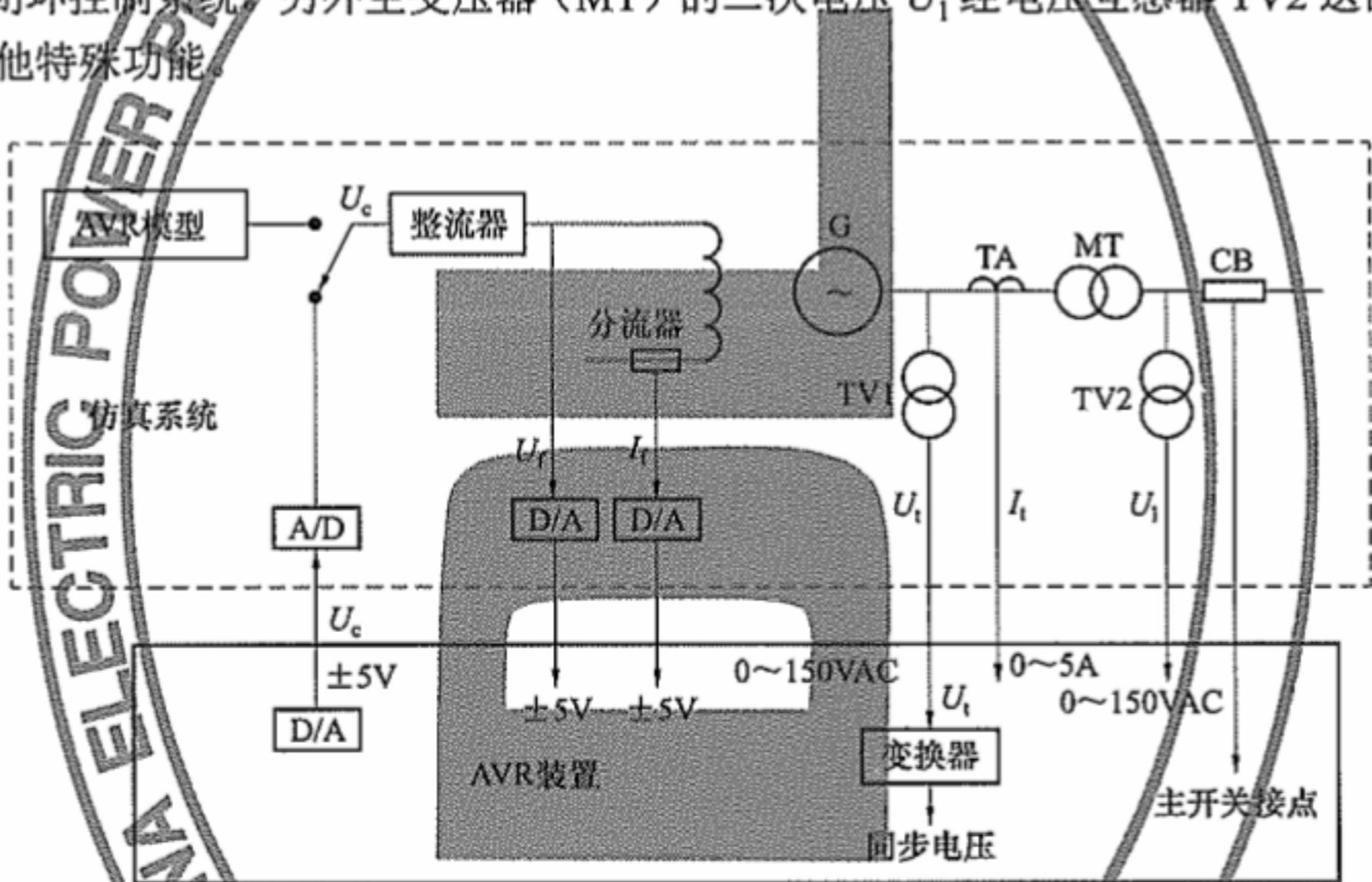


图 A.1 试验接线原理示意图

A.2 仿真系统中控制变量的处理

图 A.2 表示由仿真系统构成的发电机组和无穷大电源模型，其中包含了原动机和调速系统模型以及对所有电气模拟信号的基本处理。可见，仿真系统中除有功 P 和无功 Q 可用有名值显示外，其余所有用于计算的变量均经过相关的变换和滤波处理，最终形成以标么值表示的变量，以便和 AVR 模型衔接。

图 A.2 中， U_f 是 AVR 的控制电压 U_c 信号经励磁功率单元转换后形成的磁场电压输入信号，而磁场电流输出信号 I_f 可用于外部监视。发电机 G 接受来自原动机的力矩信号 T_M 、输出转速信号 ω 用来模拟原动机及调速系统的特性， ω 信号还可直接作为仿真系统中 PSS2 型电力系统稳定器模型的转速输入信号。当检测委托方无特殊要求时，原动机调速系统的模型参数可选用常规的经典数据。仿真系统中设置了 k1~k3 三个短路点，可根据试验需要模拟发电机端、主变压器高压侧和远方短路的工况；大感应电动机负荷 Z 可用来模拟机组重负载下的性能；无穷大电源 S 的容量及内阻可根据不同需要选择，一般情况下其容量应大于发电机容量的 10 倍以上。

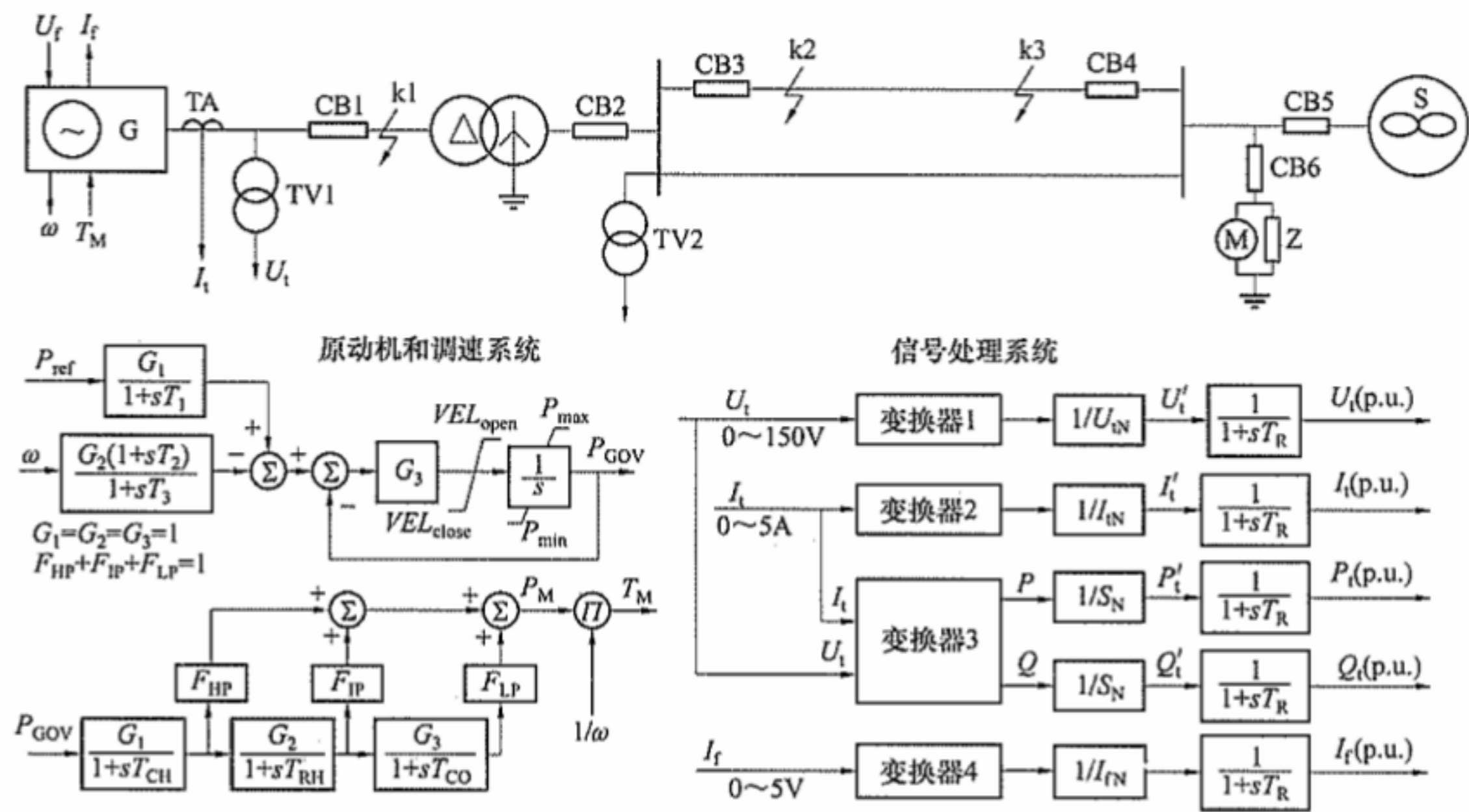


图 A.2 由仿真系统构成的发电机组和无穷大电源模型框图

A.3 根据制造厂提供原始资料计算整理的试验数据

A.3.1 自并励系统试验数据

a) 发电机组和励磁变压器电气参数参见表 A.1。

表 A.1 300MW 发电机和励磁变压器电气参数

序号	参 数 名 称	代号	单位	机组数据
1	发电机组转动惯量	T_j	s	8.3
2	发电机有功功率	P	MW	300
3	发电机无功功率	Q	Mvar	186
4	额定电压	U_{IN}	kV	20
5	额定电流	I_{IN}	A	10 190
6	额定磁场电压	U_{IN}	V	463
7	额定磁场电流	I_{IN}	A	2203
8	空载额定磁场电流	I_{I0}	A	815
9	直轴同步电抗（饱和值）	X_d	p.u.	2.047
10	交轴同步电抗（饱和值）	X_q	p.u.	1.930
11	直轴暂态电抗（饱和值）	X_d'	p.u.	0.268 8
12	直轴暂态电抗（非饱和值）	X_{du}'	p.u.	0.298 7
13	交轴暂态电抗（饱和值）	X_q'	p.u.	0.370 0
14	交轴暂态电抗（非饱和值）	X_{qu}'	p.u.	0.417 7
15	直轴次暂态电抗（饱和值）	X_d''	p.u.	0.161 8
16	直轴次暂态电抗（非饱和值）	X_{du}''	p.u.	0.178 9

表 A.1 (续)

序号	参 数 名 称	代号	单位	机组数据
17	交轴次暂态电抗 (饱和值)	X_q''	p.u.	0.175 0
18	交轴次暂态电抗 (非饱和值)	X_{qu}''	p.u.	0.267 2
19	负序电抗 (饱和值)	X_2	p.u.	0.197 4
20	负序电抗 (非饱和值)	X_{2u}	p.u.	0.202 8
21	零序电抗 (饱和值)	X_0	p.u.	0.737
22	零序电抗 (非饱和值)	X_{0u}	p.u.	0.828
23	发电机磁场绕组直流电阻	R_f	Ω	$U_{IN}/I_{IN}=463/2203=0.210$
24	直轴开路暂态时间常数	T_{d0}'	s	6.2
25	交轴开路暂态时间数	T_{q0}'	s	0.76
26	直轴开路次暂态时间常数	T_{d0}''	s	0.04
27	交轴开路次暂态时间常数	T_{q0}''	s	0.075
28	直轴短路暂态时间常数	T_d'	s	0.878
29	交轴短路暂态时间常数	T_q'	s	0.145
30	直轴短路次暂态时间常数	T_d''	s	0.035
31	交轴短路次暂态时间常数	T_q''	s	0.035
励磁方式: 自并励静止励磁系统				
32	励磁变压器额定容量	S_{eN}	kVA	3250
33	励磁变压器二次电压	U_2	V	941
34	励磁变压器额定电流	I_1/I_2	A/A	93.82/1994.04
35	励磁变压器短路电抗	X_T	%	6.5
36	发电机 TA 变比	K_1	kA/A	15/5
37	发电机 TV 变比	K_2	kV/V	20/100
38	转子分流器变比	K_3	A/mV	4000/75

b) 发电机空载饱和特性曲线参见图 A.3。

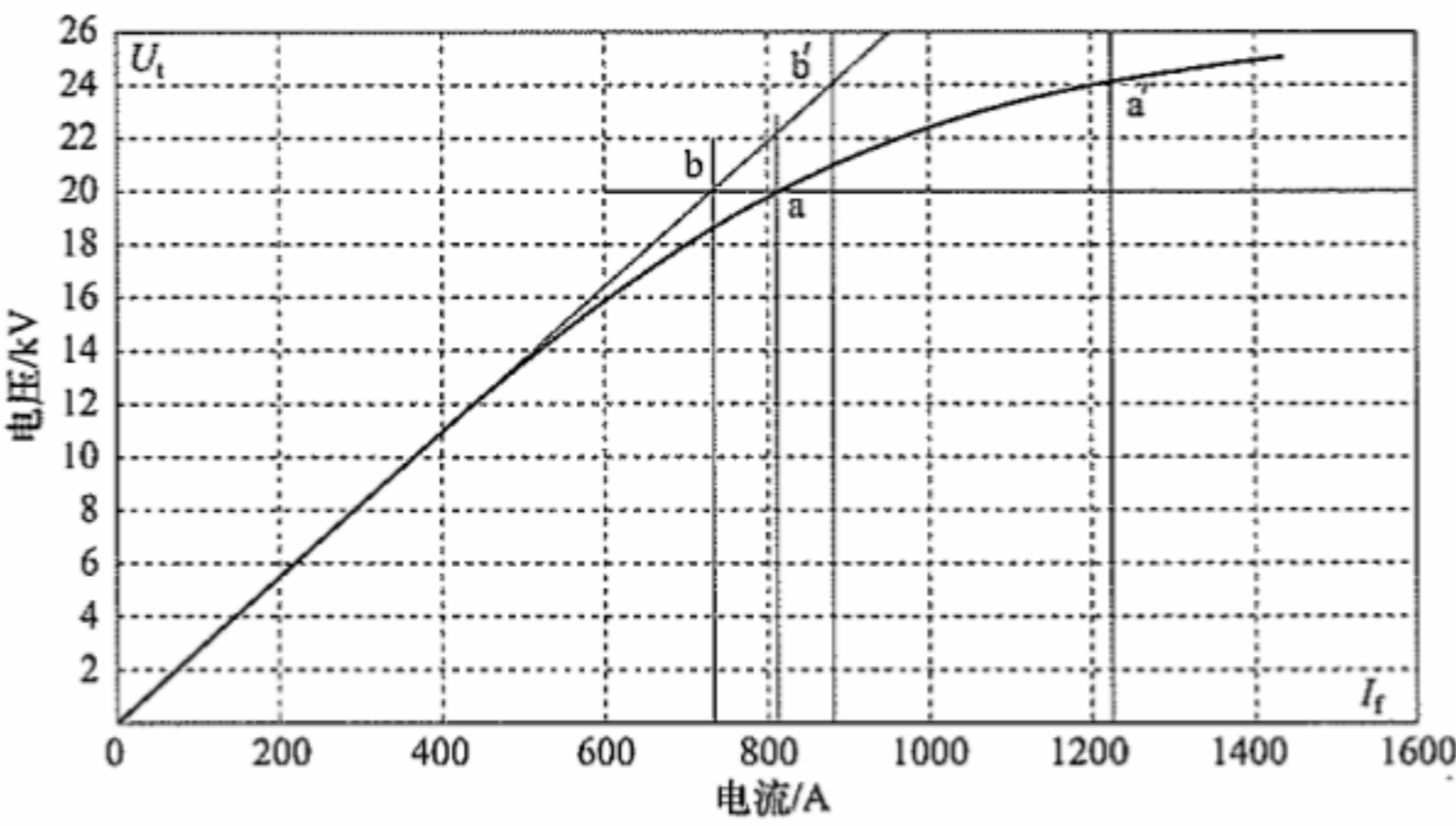


图 A.3 300MW 发电机空载饱和特性曲线

c) 饱和系数计算:

$$\begin{aligned} I_{fa}&=815\text{A}, I_{fb}=714\text{A}, I'_{fa}=1225\text{A}, I'_{fb}=837\text{A}; \\ S_{G1}&=S_{g1.0}=(I_{fa}-I_{fb})/I_{fb}=(815-714)/714=0.141\text{p.u.} \\ S_{G2}&=S_{g1.2}=(I'_{fa}-I'_{fb})/I'_{fb}=(1225-837)/837=0.463\text{p.u.} \end{aligned}$$

因发电机磁场绕组直流电阻 $R_f=0.210\Omega$

故
$$U_{fb}=R_f \times I_{fb}=0.210 \times 714=150\text{V}$$

在仿真系统仿真自并励励磁系统时，因不考虑饱和影响又要计及额定运行时转子绕组温度，故取饱和线的磁场电流为基值，即 $I_{fb}=815\text{A}$ ，而磁场电压基值为 $U_{fb}=R_f \times I_{fb}=0.210 \times 815=171.15\text{ (V)}$ 。这样可形成与负载磁场电流衔接的线性化模型；负载与空载磁场电流比值关系为 $K=2203/815=2.7$ 。

d) 自并励系统换相电抗系数 K_c 计算如下：

$$\begin{aligned} K_c &= (3X_T \times U_2^2 \times I_{fb}) / (\pi U_{fb} \times S_{eN}) = (3X_T \times U_2^2) / (\pi S_{eN} \times R_f) \\ &= (3 \times 0.065 \times 941^2) / (3.14 \times 3\,250\,000 \times 0.210) \\ &= 0.081 \text{ (p.u.)} \end{aligned}$$

A.3.2 交流励磁机励磁系统试验数据

A.3.2.1 基本电气数据

a) 发电机电气参数见表 A.2；

表 A.2 600MW 汽轮发电机电气参数

序号	参 数 名 称	代号	单位	机组数据
1	发电机组转动惯量	T_j	s	10.07
2	发电机有功功率	P	MW	600
3	发电机无功功率	Q	Mvar	290
4	额定功率因数	$\cos\varphi$		0.9
5	额定电压	U_{IN}	kV	20
6	额定电流	I_{IN}	A	19 245
7	额定磁场电压	U_{fN}	V	429
8	额定磁场电流	I_{fN}	A	4202
9	空载额定磁场电压	U_{f0}	V	151
10	空载额定磁场电流	I_{f0}	A	1480
11	直轴同步电抗（饱和值）*	X_d	p.u.	2.27
12	交轴同步电抗（饱和值）	X_q	p.u.	2.21
13	直轴暂态电抗（非饱和值/饱和值）	X'_d	p.u.	0.312/0.274
14	交轴暂态电抗（非饱和值/饱和值）	X'_q	p.u.	0.445/0.391
15	直轴次暂态电抗（非饱和值/饱和值）	X''_d	p.u.	0.223/0.204
16	交轴次暂态电抗（非饱和值/饱和值）	X''_q	p.u.	0.215/0.198
17	发电机负序电抗（非饱和值/饱和值）	X_2	p.u.	0.219/0.201
18	发电机零序电抗（非饱和值/饱和值）	X_0	p.u.	0.101/0.096

表 A.2 (续)

序号	参 数 名 称	代号	单位	机组数据
19	发电机转子绕组直阻	R_f	Ω	0.102 1
20	直轴开路暂态时间常数	T'_{d0}	s	8.77
21	交轴开路暂态时间常数	T'_{q0}	s	0.919
22	直轴开路次暂态时间常数	T''_{d0}	s	0.045
23	交轴开路次暂态时间常数	T''_{q0}	s	0.069
24	直轴短路暂态时间常数	T'_d	s	1.060
25	交轴短路暂态时间常数	T'_q	s	0.173
26	直轴短路次暂态时间常数	T''_d	s	0.035
27	交轴短路次暂态时间常数	T''_q	s	0.035

* 当发电机考虑了饱和影响又需要准确仿真额定磁场电流值时，应采用 X_d 非饱和值。

b) 励磁机参数见表 A.3；

表 A.3 2442kVA 励磁机参数

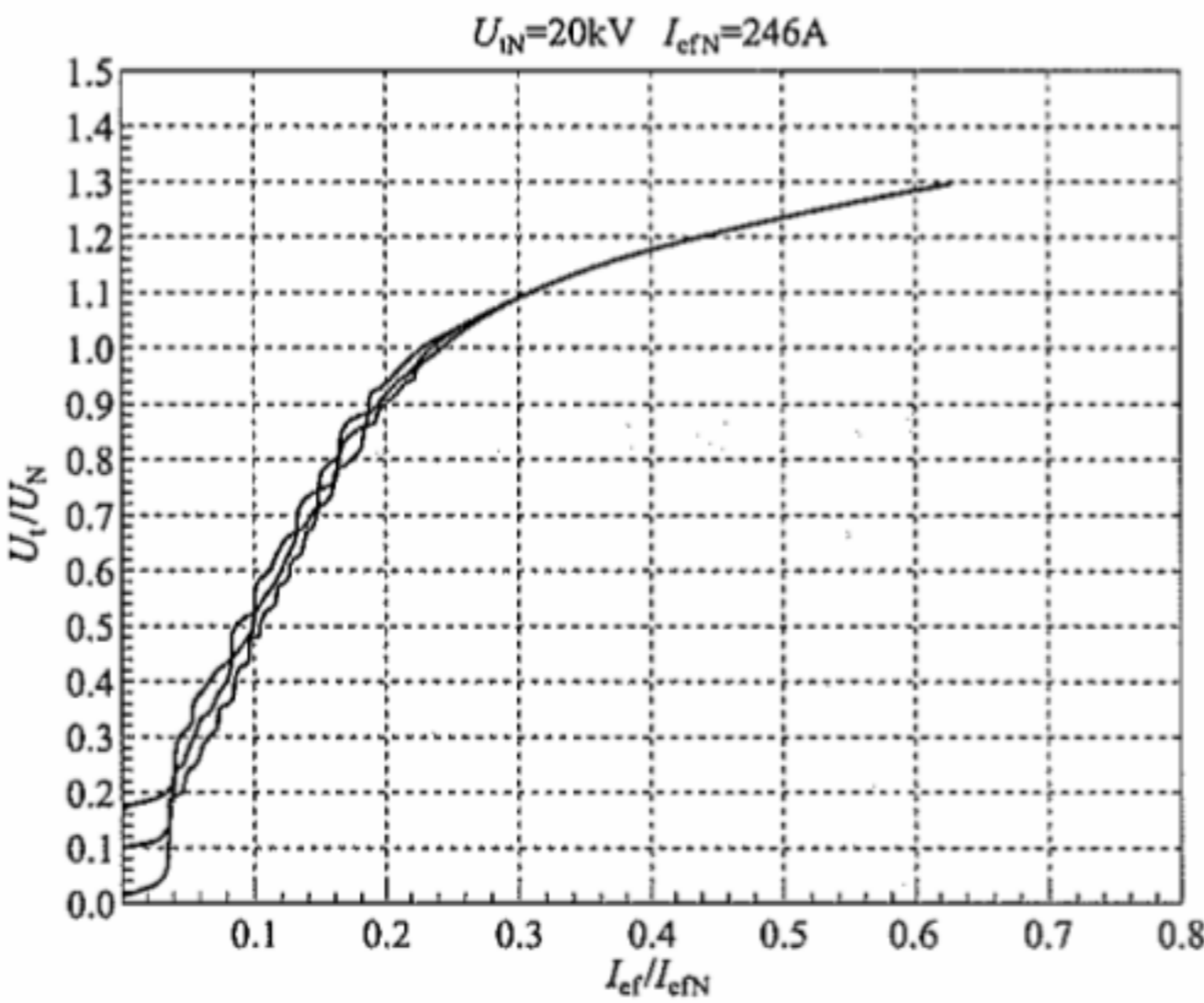
序号	参 数 名 称	代号	单位	机组数据
1	励磁机额定容量	S_{eN}	kVA	2442
2	励磁机频率	f_e	Hz	200
3	功率因数	$\cos\varphi$		0.9
4	额定输出电压	U_{eN}	V	393
5	额定输出电流	I_{eN}	A	3587
6	额定磁场电压	U_{efN}	V	17.5
7	额定磁场电流	I_{efN}	A	225
8	直轴同步电抗	X_{dc}	p.u.	0.753
9	直轴暂态电抗	X'_{dc}	p.u.	0.161
10	直轴次暂态电抗	X''_{dc}	p.u.	0.161
11	负序电抗	X_{2e}	p.u.	0.172
12	励磁绕组直阻	R_{ef}	Ω	0.08
13	转子时间常数	T_{dec}	s	1.87
14	发电机空载额定时励磁机磁场电压	U_{ef0}	V	4.6
15	发电机空载额定时励磁机磁场电流	I_{ef0}	A	59.4

c) 永磁机参数见表 A.4；

表 A.4 152kVA 永磁机参数

序号	参 数 名 称	代号	单位	机组数据
1	永磁机容量	S_p	kVA	152
2	永磁机额定频率	f_p	Hz	400
3	永磁机额定电压	U_{pmg}	V	274 (实测 310)
4	永磁机额定电流	I_{pmg}	A	320
5	永磁机功率因数	$\cos\varphi$		0.95
6	发电机空载额定励磁机励磁电压	U_{ef0}	V	4.6
7	发电机空载额定励磁机励磁电流	I_{ef0}	A	59.4

d) 发电机空载饱和特性曲线参见图 A.4;



U_t/U_N —发电机端电压标么值; I_{ef}/I_{eFN} —以设计的负载额定励磁机磁场电流为基准的标么值

图 A.4 600MW 发电机空载饱和特性曲线

e) 实测发电机电压与励磁机磁场电流的饱和特性参见表 A.5。

表 A.5 现场实测发电机电压与励磁机磁场电流的饱和特性

上升特性								
U_t/kV	14.80	16.97	19.00	20.05	21.05	22.07	23.95	25.99
U_{ef}/V	3.0	3.5	4.2	4.6	5.2	6.0	8.2	12.1
I_{ef}/A	39.4	45.4	54.4	59.4	67.3	76.8	106	154.6
下降特性								
U_t/kV	24.99	23.06	21.00	20.00	17.93	15.00	13.07	9.98
U_{ef}/V	10.0	6.8	4.9	4.2	3.6	2.8	2.1	1.5
I_{ef}/A	129.6	89.4	64.9	55.8	46.3	36.7	30.0	21.3

A.3.2.2 检测试验用计算数据

根据现场实测情况，结合制造厂提供的相关特性曲线、计算数据，计及温度等相关影响，应将上述特性曲线分解为发电机空载特性及励磁机空载特性用于仿真系统重新拟合为发电机空载、励磁机负载的饱和特性曲线，最终该曲线拟合的准确度由发电机和励磁机的衔接程度是否良好来确定。

a) 发电机空载特性参见表 A.6，发电机空载特性曲线形态同图 A.3。

表 A.6 用有名值表示的发电机空载特性

U_f/kV	10	15	18	19	20	21	22	23	24	26
I_f/A	645	1030	1280	1370	1480	1660	1890	2250	2801	4129

b) 发电机饱和系数计算：

- 1) 当发电机为空载额定电压时，磁场电流为 $I_{f0}=I_{fa}=1480\text{A}$ ，气隙线上电流为 $I_{fb}=I_{fb}=1284.9\text{A}$ 。因发电机磁场绕组直流电阻为 $R_f=0.102\ \Omega$ ，故 $U_{fb}=131.2\text{V}$ 。
- 2) 当发电机为 1.2 倍额定电压时，磁场电流为 $I'_{fa}=2801\text{A}$ ，气隙线上电流为 $I'_{fb}=1541.9\text{A}$ 。
- 饱和系数计算如下：

$$S_{g1.0}=(I_{fa}-I_{fb})/I_{fb}=(1480-1284.9)/1284.9=0.152\ (\text{p.u.})$$
$$S_{g1.2}=(I'_{fa}-I'_{fb})/I'_{fb}=(2801-1541.9)/1541.9=0.817\ (\text{p.u.})$$

c) 励磁机空载饱和特性曲线参见图 A.5，励磁机空载特性参见表 A.7。

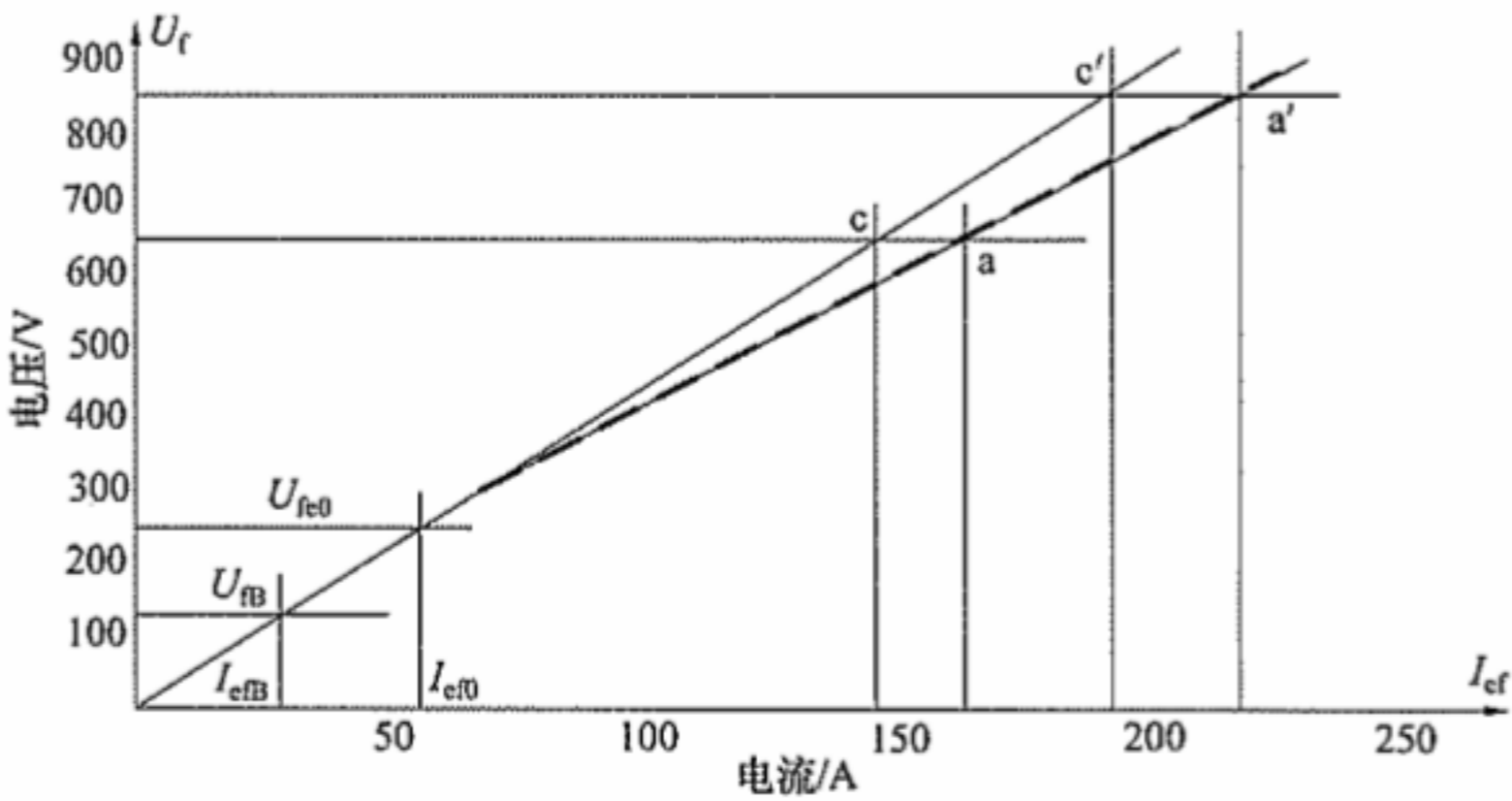


图 A.5 励磁机空载饱和特性曲线

表 A.7 用有名值表示的励磁机空载特性

U_f/V	100	130	250	400	500	600	700	800	860	900
I_{ef}/A	24.3	31.7	61	102	131	160	188	217	237	253

d) 励磁机饱和系数计算。发电机空载额定时，对应发电机气隙线上的磁场电压为 $U_{fb}=131.2\text{V}$ ，查励磁机空载特性对应基值电流为 $I_{efB}=33.2\text{A}$ ，因励磁机磁场绕组直流电阻为 $R_{ef}=0.08\ \Omega$ ，故 $U_{efB}=2.66\text{V}$ 。

当励磁机输出电压对应 2 倍发电机磁场电压 858V 时，励磁机磁场电流为 $I'_{efa}=236\text{A}$ ，气隙线上电流为 $I'_{efc}=207\text{A}$ ；当励磁机输出电压对应 1.5 倍发电机磁场电压 643.5V 时，励磁机磁场电流为 $I_{efa}=172\text{A}$ ，气隙线上电流为 $I_{efc}=158.67\text{A}$ 。

励磁机饱和系数计算如下：

$$S_{E1}=S_{E\max}=(I'_{efa}-I'_{efc})/I'_{efc}=(236-207)/207=0.14\ (\text{p.u.})$$

$S_{E2}=S_{E0.75max}=(I_{efa}-I_{efc})/I_{efc}=(172-158.67)/158.67=0.084\text{ (p.u.)}$

e) 励磁机换相电抗系数计算。用基本参数表中数据可计算得：

$$K_c=[3(X_{de}''+X_{2c})U_{cN}^2I_{fB}]/(2\pi U_{fB}S_{cN})=[3(X_{de}''+X_{2c})U_{cN}^2]/(2\pi R_fS_{cN})$$
$$=[3\times(0.16+0.172)\times393^2]/(2\times3.141\ 6\times0.102\ 1\times2\ 442\ 000)$$
$$=0.098\ 2\text{ (p.u.)}$$

f) 励磁机去磁系数计算。发电机空载额定时，转子电压 $U_{f0}=151\text{V}$ ，励磁机磁场电流 $I_{ef0}=59.4\text{A}$ ，在此电流下断开发电机灭磁开关，由励磁机空载特性曲线上可查得 $U_{fe0}=248.77\text{V}$ ，可算出：

$$K_D'=(U_{fe0}-U_{f0})/U_{f0}=(248.77-151)/151=0.647\ 5\text{p.u.}$$

故励磁机去磁系数为： $K_D=K_D'-K_c=0.647\ 5-0.098\ 2=0.549\ 3\text{p.u.}$ 。

g) 交流励磁机励磁系统常规仿真数据见表 A.8。

表 A.8 交流励磁机励磁系统常规仿真数据

发电机数据				励磁机数据					
S_{G1}	$S_{G1.2}$	R_f	T_{d0}'	S_{E1}	S_{E2}	K_C	K_D	R_{cf}	T_{doc}
0.151	0.824	0.102 1	8.8	0.14	0.084	0.098 2	0.549	0.08	1.87

A.3.2.3 仿真系统励磁功率单元模型

在仿真系统中发电机特性由派克方程求解，励磁功率单元模型则采用永磁机（或副励磁机）向 AVR 供电的不可控整流器交流励磁机励磁系统模型，与 GB/T 7409.2 标准中 EX1 型、BPA 中 FQ 型或 IEEE 中 AC2A 型模型一致。

a) 仿真系统中励磁功率单元模型如图 A.6 所示。在励磁功率单元模型中，AVR 输出控制信号 U_C 经限幅环节后进入励磁功率环节，该环节时间常数 T_{SCR} 包含了 AVR 中所有可能的时间迟后效果。 K_B 是励磁机补偿增益，一般设置为 $K_B=[(1+K_c)(1+S_c)+K_D]$ ； K_B 前的电压信号 U_{ef} 与现场实测的励磁机磁场电压一致。励磁机时间常数 T_E 取表 A.8 中数据 T_{doc} ，自励系数 $K_E=1$ ，励磁机磁场电流 I_{cf} 可作为反馈信号。

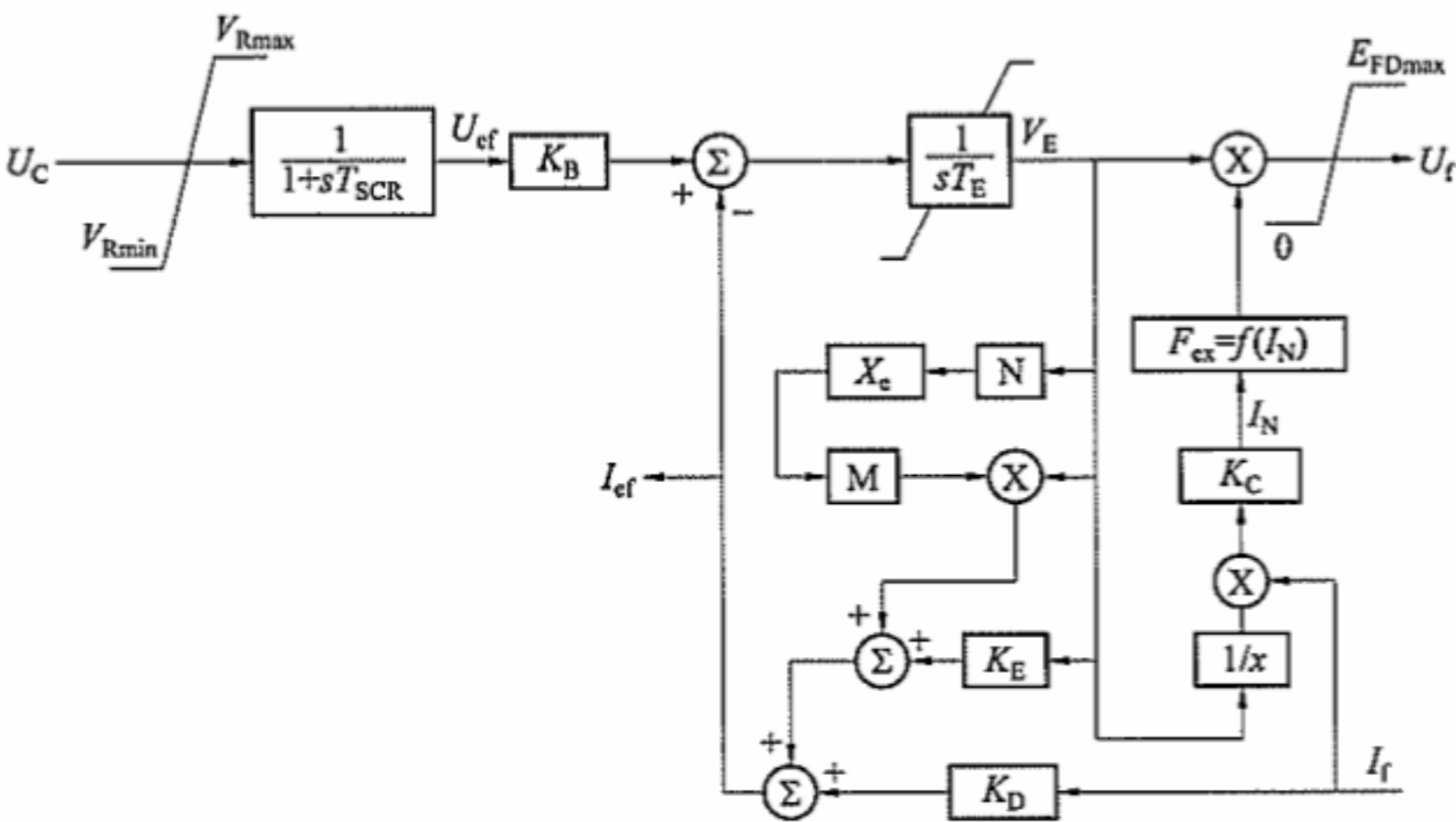


图 A.6 仿真系统中励磁功率单元模型

b) AVR 装置输出限制计算。取永磁机电压实测值 $U_{pmg}=310\text{V}$ ，励磁机用晶闸管整流器最小角是 $\alpha_{min}=40^\circ$ 、最大角是 $\alpha_{max}=140^\circ$ ，则 AVR 输出限制为：

$$U_{Rmax}=1.35U_{pmg}\cos(\alpha_{min})/U_{efB}=1.35\times310\times\cos40^\circ/2.66=120\text{ (p.u.)}$$

$$U_{Rmin}=1.35U_{pmg}\cos(\alpha_{max})/U_{cfB}=1.35\times310\times\cos140^{\circ}/2.66=-120\text{ (p.u.)}$$

当用户要求模拟永磁机电压下降特性时，上述计算值还应乘以强励时副励磁机电压下降系数 K_{EP} 。

- c) 发电机磁场电压限制计算。取发电机 2 倍磁场电压额定值： $E_{FDmax}=2U_{fN}/U_{fB}=2\times429/131=6.55\text{ (p.u.)}$ 。
- d) 励磁机饱和系数的处理。由表 A.8 查得励磁机计算饱和系数为： $S_{E1}=0.14$ ， $S_{E2}=0.084$ ；与发电机模型中直接采用饱和系数不同，仿真系统处理交流励磁机的饱和系数时采用下列计算公式：

$$S_E = Me^{NV_E} \tag{A}$$

其中， V_E 为模型中励磁机定子电压，当整流器的换弧角小于 60° 时：

$$V_{Emax}=V_{E1}=E_{FDmax}(1+\sqrt{3}K_C)=6.55(1+1.732\times0.0982)=7.664\text{p.u.}$$

而 M 和 N 是需要方程求解两个常数，计算如下：

公式 (A) 中，按经典计算应取 $V_{E2}=0.75V_{E1}=0.75\times7.664=5.748\text{ (p.u.)}$ ；这样按已知条件可列出方程：

$$S_{E1} = Me^{NV_{E1}} = Me^{7.664N} = 0.14 \tag{B}$$

$$S_{E2} = Me^{NV_{E2}} = Me^{5.748N} = 0.084 \tag{C}$$

用式 (B) / 式 (C)： $S_{E1}/S_{E2}=Me^{7.664N}/Me^{5.748N}=0.14/0.084=1.667$

两边取对数后解得 $N=0.2667$ ，代入上述公式解得 $M=0.0181$ 。由此求出的 M 和 N 数据应用在图 A.6 中，由仿真系统仿真拟合为励磁机空载饱和特性。

- e) 励磁功率单元仿真系统用计算数据见表 A.9。

表 A.9 仿真系统用计算数据

参数名称	U_{Rmax}	U_{Rmin}	E_{FDmax}	M	N
计算数据/p.u.	120	-120	6.55	0.0181	0.2667

- f) 三相全波整流器 F_{EX} 函数。

$$\begin{cases} I_N = \frac{2.04\sqrt{3}K_C I_f}{U_E} \\ 0 < I_N \leq 0.51, F_{EX} = 1 - 0.49I_N \\ 0.51 < I_N \leq 0.715, F_{EX} = \sqrt{0.951 - (1.222I_N)^2} \\ 0.715 < I_N < 1, F_{EX} = 1.519(1 - I_N) \end{cases}$$

中 华 人 民 共 和 国
电 力 行 业 标 准
数字式自动电压调节器涉网
性 能 检 测 导 则
DL/T 1391 — 2014

*

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

*

2015 年 5 月第一版 2015 年 5 月北京第一次印刷
880 毫米×1230 毫米 16 开本 2.25 印张 66 千字
印数 0001—3000 册

*

统一书号 155123 · 2472 定价 19.00 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



中国电力出版社官方微信



掌上电力书屋



见程规范/
电力工程/供用电