

# 电力系统运行技术

万千云 赵智勇 万 英 编



中国电力出版社

[www.cepp.com.cn](http://www.cepp.com.cn)

# 电力系统运行技术

---

万千云 赵智勇 万 英 编



中国电力出版社  
[www.cepp.com.cn](http://www.cepp.com.cn)

## 内 容 提 要

---

本书系统而全面地阐述了电力系统运行操作方面的有关内容。全书共 12 章, 内容包括发电机、变压器、电力线路、配电装置、互感器、电容器、电抗器、消弧线圈、微机保护、潮流计算、系统稳定及内部过电压、电力系统运行与操作、电网异常与事故处理等。

本书可作为发电厂、变电所及输配电系统运行维护人员、工程技术人员和电网调度人员的培训教材, 也可作为电力系统检修试验人员、管理人员及大、中专院校有关专业师生的参考书。

---

## 图书在版编目 (CIP) 数据

电力系统运行技术/万千云, 赵智勇, 万英编. —北京:  
中国电力出版社, 2007

ISBN 978-7-5083-5820-8

I. 电… II. ①万…②赵…③万… III. 电力系统运行  
IV. TM732

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2007) 第 088739 号

中国电力出版社出版、发行

(北京三里河路 6 号 100044 <http://www.cepp.com.cn>)

北京市同江印刷有限公司印刷

各地新华书店经售

\*

2007 年 11 月第一版 2007 年 11 月北京第一次印刷

787 毫米×1092 毫米 16 开本 30.25 印张 743 千字

印数 0001—4000 册 定价 47.00 元

## 敬告读者

本书封面贴有防伪标签, 加热后中心图案消失

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

# 前言

preface

本书系统而全面地阐述了电力系统发电、变电、供电设备及输电线路构造原理、运行方式、运行操作、运行监视和维护, 异常运行及事故处理等方面的运行知识和技术问题。

本书涵盖面较宽, 包括发电机、变压器、电力线路、配电装置、互感器、电容器、电抗器、消弧线圈、微机保护、潮流计算、系统稳定及内部过电压、电力系统运行与操作、电网异常与事故处理等, 基本上涵盖了电网运行、调度、操作及事故处理等方面的主要内容。全书以运行和操作技术为中心内容进行选材和撰稿, 主题鲜明突出, 且有针对性地介绍了超高压电网运行的部分新设备、新技术, 并结合国家新标准、新规范介绍了有关运行、监控、操作方面的技术知识和相应规定。如应用于 330~500kV 超高压电网(含应用于 220kV 及以下高压电网)的电容式电压互感器、电抗器、静止补偿设备(SVC)、气体绝缘金属封闭开关设备(GIS)、微机保护、集合式电容器、直流输电、大型变压器的冷却装置及在线监测系统。本书有一定的理论深度, 但更多地侧重实践, 实用性较强。全书贯穿着以实际应用为主线的特点, 有针对性地阐述了电网生产实践中运行操作、计算方面的技术问题。

本书力求将概念、理论、知识、技能融为一体, 以便使读者在提高理论、知识水平的同时, 提高电力系统运行的操作技能。

本书可作为发电厂、变电所及输配电系统运行维护人员、工程技术人员和电网调度人员的培训教材, 也可作为电力系统检修试验人员、管理人员及大、中专院校有关专业师生的参考书。

本书在编写过程中, 承蒙中国电力出版社张玲、陈丽编辑提出了不少修改意见, 谨表示衷心的感谢。

由于编者水平有限, 错缪之处恳请读者批评指正。

编者

2007 年 10 月

# 目录

contents

## 前言

|                          |     |
|--------------------------|-----|
| <b>第一章 同步发电机的运行</b>      | 1   |
| 第一节 发电机的辅机系统             | 1   |
| 第二节 发电机运行方式              | 5   |
| 第三节 发电机运行特性              | 13  |
| 第四节 发电机的并列操作及负荷调整        | 17  |
| 第五节 发电机的运行监视             | 20  |
| 第六节 发电机的异常运行及事故处理        | 22  |
| 第七节 现代电网运行对大机组的影响        | 36  |
| <b>第二章 变压器的运行</b>        | 39  |
| 第一节 变压器种类                | 39  |
| 第二节 特殊变压器                | 40  |
| 第三节 变压器的额定技术数据           | 47  |
| 第四节 变压器的允许运行方式           | 49  |
| 第五节 变压器的运行操作             | 54  |
| 第六节 变压器的调压装置             | 64  |
| 第七节 大型变压器的冷却装置及油中含氢量监测装置 | 67  |
| 第八节 变压器的经济运行             | 73  |
| 第九节 变压器的监视检查与维护          | 77  |
| 第十节 变压器的异常运行及事故处理        | 80  |
| 第十一节 变压器的交接试验            | 84  |
| <b>第三章 架空电力线路运行</b>      | 90  |
| 第一节 架空线路的主要元件            | 90  |
| 第二节 高压输电线路的换位            | 107 |
| 第三节 架空电力线路的运行巡视          | 109 |
| 第四节 电力线路的污秽分级            | 111 |
| 第五节 电力线路的异常运行及事故处理       | 112 |
| 第六节 线路与其他设施交叉跨越规定        | 118 |
| 第七节 电抗器                  | 123 |
| 第八节 500kV 超高压输电线路并联电抗器   | 127 |

|                                 |     |
|---------------------------------|-----|
| <b>第四章 配电装置的运行</b>              | 131 |
| 第一节 高压配电装置概述                    | 131 |
| 第二节 屋内及屋外配电装置                   | 132 |
| 第三节 成套配电装置                      | 146 |
| 第四节 电气开关概述                      | 150 |
| 第五节 高压断路器的技术参数                  | 153 |
| 第六节 油断路器                        | 156 |
| 第七节 真空断路器及空气断路器                 | 157 |
| 第八节 SF <sub>6</sub> 断路器及 GIS 装置 | 159 |
| 第九节 断路器的运行和故障处理                 | 167 |
| 第十节 高压隔离开关                      | 168 |
| 第十一节 重合器                        | 169 |
| <b>第五章 互感器的运行</b>               | 174 |
| 第一节 电压互感器概述                     | 174 |
| 第二节 电磁式电压互感器                    | 176 |
| 第三节 电容式电压互感器                    | 181 |
| 第四节 电压互感器的接线与额定电压               | 184 |
| 第五节 电压互感器的熔断器装置                 | 185 |
| 第六节 电压互感器的运行                    | 186 |
| 第七节 电流互感器概述                     | 191 |
| 第八节 电流互感器的误差及准确等级               | 196 |
| 第九节 电流互感器的极性                    | 199 |
| 第十节 电流互感器的接线方式                  | 200 |
| 第十一节 零序电流滤序器与零序电流互感器            | 201 |
| 第十二节 电流互感器的运行                   | 202 |
| <b>第六章 并联电容器的运行</b>             | 205 |
| 第一节 并联电容器概述                     | 205 |
| 第二节 电容器的额定电压与额定容量               | 210 |
| 第三节 电容器接入电网的基本要求及接入方式           | 212 |
| 第四节 500kV 电网无功补偿及电容器            | 214 |
| 第五节 电容器的接线方式                    | 215 |
| 第六节 电容器装置的配套设备及其连接方式            | 216 |
| 第七节 电容器装置中的断路器                  | 217 |
| 第八节 电容器装置中的熔断器                  | 217 |
| 第九节 电容器装置中的电抗器                  | 219 |
| 第十节 电容器装置中的放电器                  | 221 |

|      |                    |     |
|------|--------------------|-----|
| 第十一节 | 电容器装置中的避雷器·····    | 225 |
| 第十二节 | 集合式电容器·····        | 226 |
| 第十三节 | 并联电容器的投切方式·····    | 228 |
| 第十四节 | 电容器布置和安装的基本要求····· | 228 |
| 第十五节 | 电容器的运行操作及故障处理····· | 230 |
| 第十六节 | 电容器的异常运行及保护配置····· | 231 |

|            |                       |     |
|------------|-----------------------|-----|
| <b>第七章</b> | <b>电力系统微机保护</b> ····· | 237 |
| 第一节        | 微机保护概述·····           | 237 |
| 第二节        | WXH-11 型线路微机保护·····   | 245 |
| 第三节        | 变压器微机差动保护·····        | 253 |
| 第四节        | BP-2A 型微机母线保护·····    | 260 |
| 第五节        | 电力电容器微机保护·····        | 263 |
| 第六节        | 500kV 自耦变压器微机保护·····  | 266 |
| 第七节        | 发电机—变压器组微机保护·····     | 267 |

|            |                        |     |
|------------|------------------------|-----|
| <b>第八章</b> | <b>电力系统的潮流计算</b> ····· | 271 |
| 第一节        | 电力系统潮流计算概述·····        | 271 |
| 第二节        | 电力线路参数的计算方法·····       | 272 |
| 第三节        | 变压器参数的计算方法·····        | 277 |
| 第四节        | 电力线路等值线路的计算方法·····     | 282 |
| 第五节        | 电力线路和变压器电压损耗的计算方法····· | 290 |
| 第六节        | 电力线路和变压器功率损耗的计算方法····· | 294 |
| 第七节        | 电力线路和变压器电能损耗的计算方法····· | 297 |
| 第八节        | 开式电网潮流分布的计算方法·····     | 299 |
| 第九节        | 闭式电网潮流分布的计算方法·····     | 304 |
| 第十节        | 输电线路导线截面的选择计算方法·····   | 306 |
| 第十一节       | 标幺制及其运算·····           | 309 |

|            |                           |     |
|------------|---------------------------|-----|
| <b>第九章</b> | <b>电力系统稳定及内部过电压</b> ····· | 313 |
| 第一节        | 电力系统静态稳定·····             | 313 |
| 第二节        | 电力系统暂态稳定·····             | 325 |
| 第三节        | 发电机次同步谐振·····             | 337 |
| 第四节        | 电力系统内部过电压·····            | 339 |

|            |                      |     |
|------------|----------------------|-----|
| <b>第十章</b> | <b>电力系统的运行</b> ····· | 350 |
| 第一节        | 电力系统概述·····          | 350 |
| 第二节        | 电气主接线·····           | 360 |
| 第三节        | 电力可靠性管理·····         | 370 |

|     |                     |     |
|-----|---------------------|-----|
| 第四节 | 电网自动装置·····         | 378 |
| 第五节 | 电力系统中性点接地·····      | 382 |
| 第六节 | 保护接地和接零·····        | 398 |
| 第七节 | 电力系统有功功率与频率的调整····· | 402 |
| 第八节 | 电力系统无功功率与电压的调整····· | 412 |
| 第九节 | 直流输电·····           | 426 |

## 第十一章

|           |     |
|-----------|-----|
| 运行操作····· | 430 |
|-----------|-----|

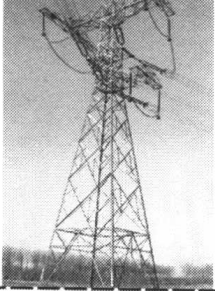
|     |                           |     |
|-----|---------------------------|-----|
| 第一节 | 电网操作原则和基本要求·····          | 430 |
| 第二节 | 高压断路器、隔离开关及电力线路的操作·····   | 432 |
| 第三节 | 母线操作·····                 | 438 |
| 第四节 | 发电机操作·····                | 439 |
| 第五节 | 变压器操作·····                | 440 |
| 第六节 | 电力系统并列、合解环及定相·····        | 442 |
| 第七节 | 对 500kV 断路器控制回路的具体要求····· | 445 |
| 第八节 | 防误闭锁装置·····               | 446 |

## 第十二章

|                |     |
|----------------|-----|
| 电网异常与事故处理····· | 453 |
|----------------|-----|

|      |                                 |     |
|------|---------------------------------|-----|
| 第一节  | 电网事故处理概述·····                   | 453 |
| 第二节  | 电网大面积停电事故预防及黑启动·····            | 455 |
| 第三节  | 高压开关非全相运行故障处理·····              | 459 |
| 第四节  | 输电线路过负荷处理·····                  | 461 |
| 第五节  | 开关控制回路断线及其处理·····               | 462 |
| 第六节  | 频率异常处理·····                     | 463 |
| 第七节  | 电压异常处理·····                     | 466 |
| 第八节  | 发电机、变压器及线路跳闸事故处理·····           | 467 |
| 第九节  | 厂(所)母线失压及发电厂全厂、变电所全所停电事故处理····· | 469 |
| 第十节  | 电力系统解列事故处理·····                 | 470 |
| 第十一节 | 电力系统非同步振荡事故处理·····              | 471 |

|       |     |
|-------|-----|
| ····· | 474 |
|-------|-----|



## 第一章

# 同步发电机的运行

电力系统运行技术

本章以 300MW 汽轮发电机组为例, 主要介绍发电机的辅机系统、运行方式、运行特性、运行操作、运行监视和维护、异常运行及事故处理等方面的运行知识和技术问题。

### 第一节 发电机的辅机系统

汽轮发电机按冷却介质和冷却方式不同, 可分为双水内冷、水氢氢冷和全氢冷等类型。这三类机组的辅机系统大体相似, 均配有冷却系统、温度监视系统、励磁系统、轴振监视系统<sup>①</sup>等。下面以水氢氢冷汽轮发电机组为例, 介绍其辅机系统。

水氢氢冷汽轮发电机的定子绕组采用水内冷, 转子绕组采用氢内冷, 定子铁芯为氢冷。

#### 一、冷却系统

##### 1. 氢气冷却系统

##### (1) 氢系统的构成。

汽轮发电机的氢气冷却系统由发电机内部通风系统和外部供气系统构成。

水氢氢冷汽轮发电机的内部通风系统的风路有打风式和抽风式两种形式。

水氢氢冷却的汽轮发电机要求建立专用的外部供气系统。这种供气系统既能向发电机充氢气, 也能充空气, 还能进行氢气和空气的置换、补漏气、自动监视, 并保持机壳内氢气的额定压力和纯度。各种不同形式的汽轮发电机供气系统都大体相同, 由氢气供气装置、二氧化碳供气装置、氢油水系统监测控制柜、气体干燥器、发电机工况监视器、纯度风扇监视装置、浮子式检漏计、自动化控制仪表装置、管道和阀门等组成。

##### (2) 氢气系统主要装置的功能。

1) 纯度风扇监视装置。正常运行时, 发电机内部氢气纯度应保持在 98% 以上。在运行过程中, 纯度风扇监视装置能自动分析和检测发电机内部氢气的纯度及压力, 并能进行超限报警。如氢气纯度低于 92% 时, 该装置自动报警, 提醒运行人员排污补氢。

2) 氢气干燥器。在发电机的风扇前后, 分别装有氢气回流管, 该回流管与氢系统中的氢气干燥器连通, 使发电机内一部分氢气在风扇的前后压差作用下, 不断流经干燥器, 对机内的氢气进行干燥, 且无需更换干燥剂。

3) 浮子式检漏计。当发电机内出现水、油等液体时, 由三台浮子式检漏计分别对发电机各部位的积液进行监测, 及时报警, 以便排除积液, 检查处理。

4) 自动化控制仪表装置。关键运行参数均有电信号输出, 可供程序控制检查及报警。

5) 发电机工况监视器。当发电机内定子铁芯或定子绕组局部发生过热时, 热粒子随气流流入工况监视器, 被监视器内离子室吸收后, 监视器内的电流将产生变化。当电流下降到一定限度, 报警信号开关闭合, 由氢油水系统监测控制柜发出报警信号。

<sup>①</sup> 因在汽轮机教科书中均有介绍有关发电机组的轴振监视系统的内容, 此处从略, 只较详细地介绍其他三个系统。

## 2. 定子冷却水系统

### (1) 定子冷却水系统的构成。

定子冷却水系统是水氢氢冷发电机组的辅机配套系统之一，用于向发电机定子绕组提供内冷工作水，使定子绕组的温升保持在规定范围内，并对定子绕组进行监测、控制及保护，同时监视水压、水量、水温 and 水的导电率等参数。定子冷却水系统由定子绕组水系统和定子外部供水系统组成。

#### 1) 定子绕组水系统。

300MW 发电机的定子绕组及其连线、出线都采用水内冷。定子每个上层线棒与下层线棒在鼻端并成 1 个水路，水自励磁机端（励端）总水管（汇水管）分 54 个水路经绝缘引水管进入定子绕组，再自汽轮机端（汽端）定子绕组的 54 个绝缘引水管流至汽端总水管，然后，水从汽端总水管流出。

#### 2) 定子外部供水系统。

300MW 发电机定子外部供水系统由 1 个水箱、2 个冷却水泵、2 组水冷却器、3 个过滤器、1 个混合离子交换器、有关指示仪表及信号器组成。

### (2) 定子冷却水系统主要装置的功能。

1) 水箱。又称凝结水箱，用于储存定子冷却用凝结水或化学水。当水箱中的水位降至低水位时，水箱上的液位计能发出报警信号，并自动打开补水电磁阀门，向水箱补水。补到正常水位后，液位计自动关闭该电磁阀门，停止补水。当水箱中的水位升高到高水位时，液位计将发出报警信号，运行人员应手动打开水箱的排水门，将多余的水排入地沟，使水箱水位正常。当补水电磁阀门发生故障不能正常动作时，可打开手动补水门补水。

2) 冷却水泵。又称定子冷却水泵，水箱内的水靠冷却水泵打入定子绕组内进行冷却，并使定子冷却水进行闭式循环。

3) 水冷却器。通过二次水冷却内冷水，即水箱中的热水经过冷却器时，在水冷却器内通以二次水，将热水的温度降低到规定值范围内。两组水冷却器可以单个运行，互为备用，也可以两组并列运行。

4) 过滤器。对水箱流来的水起过滤杂质的作用。为避免定子绕组的空心导线（特别在导线的转弯处）脏污或堵塞，凝结水进入定子绕组之前，先经过两个网状过滤器过滤，阻止脏物或杂质通过。两个过滤器可以一个运行，一个备用。

5) 混合床离子交换器。当水箱补充化学水时，离子交换器对化学水进行水处理，以保持良好的水质。

6) 仪表及信号器。为了运行安全可靠，定子冷却水系统装有一系列的指示仪表及信号器。当出现水箱水位过高或过低、水泵停止、进水或出水的水温过高、凝结水导电率过高、发电机的氢水压差低等情况时，相应的仪表及信号器将有相应的指示和相应的信号，以便及时处理。

## 二、温度监视系统

发电机运行时，定子和转子由于铜损、铁损及机械损耗等会产生温度的升高，为此，发电机装设了测温装置，以便监视发电机各部位的运行温度。300MW 及以上汽轮发电机组的测温装置主要监测定子绕组、定子铁芯、冷风区、热风区、氢气冷却器、密封油及轴承油的温度。此外，在氢气冷却器的热风入口和冷风出口处、定子出线瓷套管导电杆出水绝缘引水

管出口、发电机轴承回油管、氢侧密封回油管等处都装有测温元件。

### 三、励磁系统

#### 1. 励磁系统及励磁控制系统

同步发电机在向系统输送电能的过程中,还应向其转子绕组提供可调节的直流励磁电流。为同步发电机提供可调节的励磁电流的供电电源系统,称为同步发电机的励磁系统。

励磁系统由两部分组成:励磁功率单元向同步发电机的励磁绕组提供直流励磁电流;励磁调节器能感受运行工况的变化,并自动调节励磁功率单元输出的励磁电流的大小,以满足系统运行的要求。

由励磁功率单元、励磁调节器、同步发电机共同构成的闭环反馈控制系统称为发电机的励磁控制系统,其框图如图 1-1 所示。

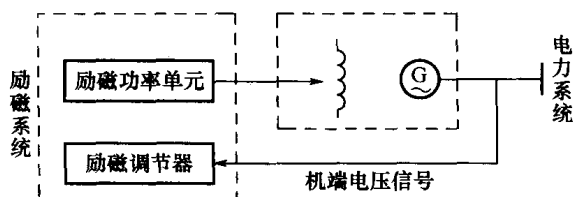


图 1-1 励磁控制系统框图

#### 2. 300MW 汽轮发电机励磁控制系统

目前,我国 300MW 汽轮发电机励磁控制系统中,由同轴交流副励磁机、主励磁机提供的交流电源经静止半导体(或旋转半导体)整流后,经过(或经过)滑环电刷向发电机转子绕组提供励磁电流。

目前,国产 300MW 汽轮发电机多采用静止硅整流励磁方式,即转子励磁电流经滑环电刷引入。而进口及引进技术制造的 300MW 汽轮发电机,则多采用旋转半导体整流励磁方式,即转子励磁电流由同轴旋转半导体整流后直接输入。

##### (1) 静止硅整流励磁控制系统。

静止硅整流励磁控制系统又称有刷励磁控制系统,系统图如图 1-2 所示。

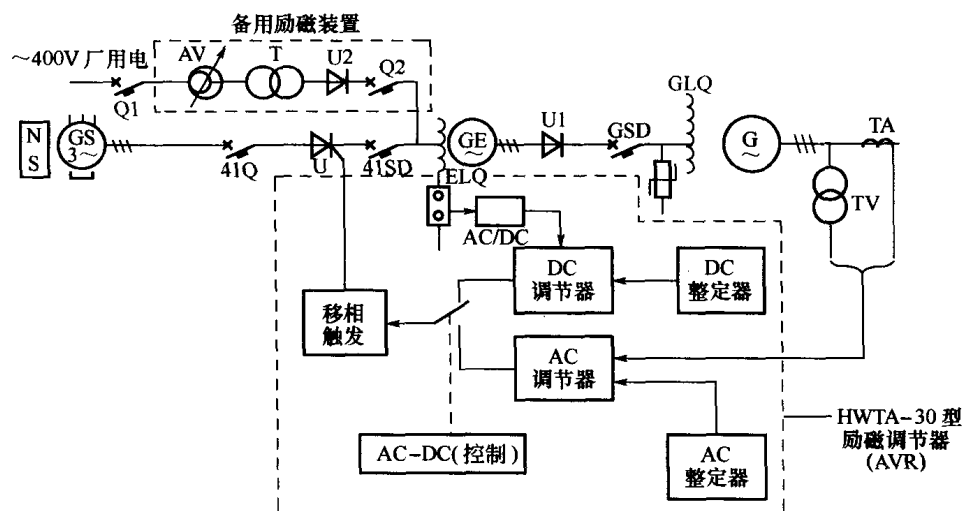


图 1-2 静止硅整流励磁控制系统

GS—永磁副励磁机; GE—主励磁机; G—发电机; 41Q—低压断路器; 41SD—主励磁机灭磁开关; ELQ—同轴交流主励磁机的励磁绕组; GSD—发电机灭磁开关; Q1、Q2—低压断路器; U1、U2—硅整流器; U—可控硅整流器; AV—感应调压器; T—隔离变压器; TA—电流互感器; TV—电压互感器

图 1-2 中, 400Hz 的同轴永磁副励磁机 GS 提供三相交流, 经三相全控桥式接线的可控硅整流器整流后, 向同轴交流主励磁机 GE 的励磁绕组 ELQ 提供励磁电流; GE 发出的 100Hz 的三相交流经三相桥式接线的静止硅整流器后, 向同轴发电机 G 提供励磁电流。励磁调节器根据运行工况, 自动调节可控硅元件的导通角, 以此改变主励磁机的励磁电流, 从而达到调节同步发电机励磁电流的目的。

当励磁调节器发生故障不能运行时, 由备用励磁装置代替其运行。由 400V 的低压厂用母线提供备用励磁电源。

## (2) 旋转半导体整流励磁控制系统。

旋转半导体整流励磁控制系统又称无刷励磁控制系统, 系统简图如图 1-3 所示。

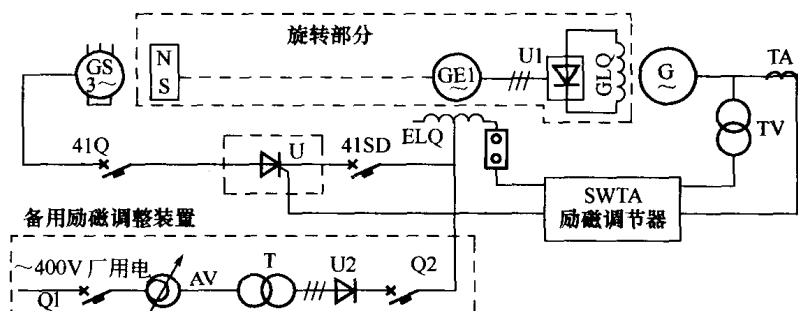


图 1-3 旋转半导体整流励磁控制系统简图

图 1-3 中, 主励磁系统分为旋转和静止两部分。交流主励磁机 GE1 的电枢绕组、旋转硅整流器 U1、永磁副励磁机的转子 (N-S) 等组成旋转部分, 与发电机的转子绕组 GLQ 同轴旋转, 静止部分是交流主励磁机的励磁绕组 ELQ、可控硅整流器 U、永磁副励磁机 GS 的电枢绕组及励磁调节器 SWTA 等。该励磁控制系统的励磁及励磁调节过程与前述相同。

## (3) 励磁系统元件简介。

1) 永磁副励磁机。现代大型汽轮发电机的副励磁机一般采用永磁发电机。永磁发电机是一种中频电源, 其磁极采用永磁材料, 且磁极数多。永磁发电机频率可达 400~1000Hz。300MW 汽轮发电机的永磁副励磁机通常采用 350~400Hz 的永磁发电机, 容量在 100kVA 以下。这种永磁发电机结构简单, 磁极上不装设励磁绕组, 与外界直流无依赖关系; 磁极固定牢靠, 机械强度高, 适于高速运行; 电动势波形好, 噪声小; 不需要励磁, 不会出现失磁现象; 无电刷、滑环, 维护简单, 运行可靠。

2) 交流主励磁机。按结构可分为两种: 一种为旋转磁极结构的交流励磁机, 适用于静止半导体励磁系统; 另一种为旋转电枢结构的交流励磁机, 适用于旋转半导体整流无刷励磁系统。

旋转磁极结构的交流励磁机, 除转子结构和极数外, 其余与隐极式同步发电机基本相同。旋转电枢结构的交流励磁机与普通同步发电机基本相同, 不同的是: 定子绕组为励磁绕组, 安装在静止不动的定子铁芯上; 转子绕组为电枢绕组, 三相 Y 接线的电枢绕组和电枢铁芯安装在与发电机转子同轴的转轴上。

3) 感应调压器。感应调压器在结构上与绕线式异步电动机相同, 实质上是一台静止的三相绕线式异步电动机, 但其转子被卡住不能自由旋转, 只能借助蜗轮杆由人工操作, 在一

定角度范围内转动，一般限制在  $0^\circ \sim 180^\circ$ 。因此，它不需要绕线式异步电动机那样装设滑环和电刷。此外，在接线上和绕线式异步电机也有不同，感应调压器的定子绕组和转子绕组有电的联系，如图 1-4 所示。为了连接和操作上的方便，将转子绕组作为一次接到电源上，而将定子绕组作为二次接到负载上。感应调压器的调压原理如下。

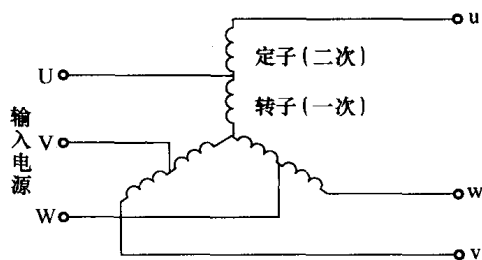


图 1-4 感应调压器原理接线

当三相交流电压加到三相转子绕组上时，就产生旋转磁场。这个磁场分别使转子绕组和定子绕组感应出电动势  $\dot{E}_1$  和  $\dot{E}_2$ ，由感应调压器的接线可知，感应调压器的输出电压是  $\dot{E}_1$  和  $\dot{E}_2$  的相量和，即

$$\dot{U} = \dot{E}_1 + \dot{E}_2$$

$\dot{E}_1$ 、 $\dot{E}_2$  的大小与绕组匝数、电源频率成正比。对已制造好的感应调压器，其绕组匝数、电源频率已固定， $\dot{E}_1$ 、 $\dot{E}_2$  的大小也就确定了。要改变感应调压器的输出电压  $\dot{U}$  的大小，唯有改变  $\dot{E}_1$  与  $\dot{E}_2$  之间的相角，即改变转子和定子绕组之间的相对位置。当  $\dot{E}_1$  与  $\dot{E}_2$  之间的夹角  $\alpha=0^\circ$  时， $\dot{U}$  的输出最大； $\alpha=180^\circ$  时， $\dot{U}$  的输出为 0；任意改变  $\alpha$  的大小，可使  $\dot{U}$  的大小得到平滑调节。

4) 自动励磁调节器 (AVR)。有刷或无刷励磁系统所采用的 AVR 型式较多，结构差别也较大，但其组成及工作原理大同小异。前述 HWTA-30 型和 SWTA 型励磁调节器均设有 AC（自动）和 DC（手动）双通道调节器。AC 调节器工作时，从发电机机端取得电压调节量，能自动维持发电机机端电压在给定水平；DC 调节器工作时，从主励磁机励磁分流器取得主励磁机励磁电流量，能自动维持发电机励磁电流在给定水平。AC 是主调节器，正常运行时，由它担负发电机的励磁调节任务，维持机端电压稳定，DC 调节器备用。当 AC 调节器故障时，由自动切换装置控制将 AC 调节器退出，投入 DC 调节器，这时，由 DC 担负发电机的励磁调节任务，维持发电机励磁电流在给定水平。

为了减小 AC 向 DC 切换时发电机的无功冲击，该装置设有自动跟踪单元，该单元使 DC 调节器的输出始终跟随 AC 调节器的输出，并力求保持一致，一旦发生 AC 向 DC 的切换，可使发电机的无功冲击最小。

## 第二节 发电机运行方式

### 一、额定运行方式

发电机按制造厂铭牌额定数据运行的方式，称为额定运行方式。发电机的额定数据是制造厂对其在稳定、对称运行条件下规定的最合理的运行参数。当发电机在各相电压和电流都对称的稳态条件下运行时，具有损耗小、效率高、转矩均匀等优点。所以在一般情况下，发电机应尽量保持或接近额定工作状态。

二、允许运行方式

发电机一般是在额定参数下运行。由于电网负荷的供需平衡，不可能所有的机组都按铭牌额定参数运行，会出现某些机组偏离铭牌参数运行的情况。发电机的运行参数偏离额定值，但在允许范围内的，称为允许运行方式。下面介绍发电机有关运行参数的允许变化范围。

1. 发电机允许温度和温升

发电机运行时会产生各种损耗，这些损耗使发电机的效率降低，且会变成热量使发电机各部分的温度升高。温度过高及高温延续时间过长都会使绝缘加速老化，缩短使用寿命，甚至引起发电机事故。一般来说，发电机温度若在超过额定允许温度 6℃ 情况下长期运行，其使用寿命会缩短一半。所以，发电机运行时，必须严格监视各部分的温度，使其在允许范围内。另外，当周围环境温度较低，温差增大时，为使发电机内各部位实际温度不超过允许值，还应监视其允许温升。

发电机的允许温度和允许温升，决定于发电机采用的绝缘材料等级和温度测量方法。300MW 机组，其绝缘材料有的采用 B 级绝缘，有的采用 F 级绝缘，而且测温方法也不完全相同。因此，发电机运行时的允许温度和温升，应根据制造厂规定的允许值（或现场试验值）确定。表 1-1 是某电机厂 300MW 机组的允许值。

表 1-1 某电机厂 300MW 发电机温度、温升允许值

| 部 位      | 允许温升 (℃) | 最高允许温度 (℃) | 测试条件                   | 测试方法   |
|----------|----------|------------|------------------------|--------|
| 定子铁芯齿部   | 74       | 120        | 氢压 0.31MPa<br>入口氢温 46℃ | 热电偶法   |
| 定子铁芯轭部   | 74       | 120        | 氢压 0.31MPa<br>入口氢温 46℃ | 热电偶法   |
| 定子绕组槽内层间 | 50       | 100        | 入口冷却水温度 50℃            | 电阻温度计  |
| 转 子      | 64       |            |                        | 电阻法    |
| 水支路出水    |          | 85         |                        | 微型测温元件 |
| 汽端总水管出水  |          | 85         |                        | 微型测温元件 |

注 定子为 B 级绝缘。

表 1-1 中，转子绕组允许温升高于定子绕组槽内层间允许温升，其原因是转子绕组电压较低，且绕组温度分布均匀，不会出现局部过热，其次，定、转子绝缘材料不同，测温方法也不同。

2. 冷却介质的质量、温度、压力允许变化范围

水氢氢冷发电机的冷却介质为氢气和水。为保证发电机能在绝缘材料的允许温度下长期运行，必须使其冷却介质的温度、压力在规定的范围内。为保证机组的安全运行，其冷却介质的质量也必须符合规定。

(1) 氢气的质量、压力和温度。机组运行时，为防止氢气爆炸，氢气质量必须达到规定标准。当发电机两端的空气侧和氢气侧密封油泵均工作时，氢气纯度应不低于 98%；当氢气侧密封油泵停运时，应维持在 90% 及以上。发电机补氢用氢气纯度不得低于 99.5%，在大气压下，含水量不大于 2g/m<sup>3</sup>。

发电机运行时,应保持机壳内的氢气压力在制造厂规定的额定值范围内。特殊情况需降低氢压运行时,应根据温升试验接带负荷,且运行时间不超过制造厂的规定。为了保持发电机氢气的运行压力正常,通常必须维持机端轴承的密封油压高于机壳内的氢压。正常运行时,密封油压和油氢压差应保持在规定范围内。空气侧和氢气侧油压应尽量相等,以免窜油,但空气侧和氢气侧密封油压差不应超过规定值。

氢气运行温度太低,发电机内容易结露,温度太高,影响出力。为保证机组额定出力和各部分温度、温升不超过允许值,发电机冷氢温度应不超过其额定值。当冷氢温度发生变化时,其接带负荷应按制造厂的规定调整。如某机组冷氢额定温度为 $40^{\circ}\text{C}$ ,在额定冷氢温度下运行时,出力为额定值;冷氢温度低于额定值时,不许提高机组出力;当冷氢温度高于额定值时,每升高 $1^{\circ}\text{C}$ ,定子电流应降低 $2\%$ 额定值,冷氢温度高于 $50^{\circ}\text{C}$ 时,不允许发电机运行。

(2) 冷却水的水质、温度和水压。定子内冷却水的水质对发电机的运行有很大影响。如导电率大于规定值,运行中会引起较大的泄漏电流,使绝缘引水管老化,过大的泄漏电流还会引起相间闪络。水的硬度过大,则水中含钙、镁离子多,管路易结垢,影响冷却效果,甚至堵塞管道。为保证发电机的安全运行,对内冷水水质有如下规定:导电率 $<1.5\mu\Omega/\text{cm}$ ( $20^{\circ}\text{C}$ );硬度 $<10\mu\text{g}/\text{L}$ ;  $\text{pH}=7\sim 9$ 。

定子内冷水进水温度过高,影响发电机出力,水温太低,使机内结露。 $300\text{MW}$ 发电机内冷水进水温度一般规定为 $40\sim 45^{\circ}\text{C}$ ,有的制造厂规定为 $45\sim 50^{\circ}\text{C}$ 。

定子内冷水水压影响定子绕组的冷却效果,影响机组出力,故机组内冷水进水压力应符合制造厂规定。为防止定子绕组漏水,内冷水运行压力不得大于氢压。当发电机的氢压发生变化时,应相应地调整水压。

### 3. 发电机电压允许变化范围

发电机应在额定电压下运行,而实际运行时,发电机的电压是根据电网的需要而变化的。发电机电压在额定值的 $\pm 5\%$ 范围内变化时,允许长期按额定出力运行,但最大变化范围不得超过额定值的 $\pm 10\%$ 。发电机电压偏离额定值超过 $\pm 5\%$ 时,会给发电机的运行带来不利影响。

(1) 电压低于额定值对发电机运行的主要影响。

1) 降低发电机运行的稳定性,包括并列运行的稳定性和发电机电压调节的稳定性。

并列运行稳定性的降低可从功角特性看出。当电压降低时,功率极限降低,若保持输出功率不变,则势必增大功角运行,而功角愈接近 $90^{\circ}$ ,稳定性愈差。

电压调节稳定性降低,是指电压降低时发电机的铁芯可能处于不饱和状态,其运行点可能落在空载特性的直线部分(见图 1-7),这时只要励磁电流作很小范围的调节,都会造成较大幅度的电压变动,甚至不易控制。这种情况,还会影响并列运行的稳定性。

2) 使发电机定子绕组温度升高。在发电机电压降低的情况下,保持出力不变,则定子电流增大,有可能使定子绕组温度超过允许值。

3) 影响厂用电动机和整个电力系统的安全运行,反过来又影响发电机本身。

(2) 电压高于额定值对发电机运行的主要影响。

1) 使转子绕组温度升高。保持发电机有功输出不变而提高电压时,转子绕组励磁电流就要增大,这会使转子绕组温度升高。当电压升高到 $1.3\sim 1.4$ 倍额定电压时,转子表

面由于脉动损耗（这些损耗与电压的平方成正比）增加，使转子绕组的温度有可能超过允许值。

2) 使定子铁芯温度升高。定子铁芯的温升一方面是定子绕组发热传递的，另一方面是其本身的损耗发热引起的。当定子端电压过分升高时，定子铁芯的磁通密度增高，铁芯损耗明显上升，使定子铁芯的温度大大升高。过高的铁芯温度会使铁芯的绝缘漆烧焦、起泡。

3) 使定子结构部件出现局部高温。如定子电压过高，定子铁芯磁通密度增大，使定子铁芯过度饱和，从而会造成较多的磁通逸出轭部并穿过某些结构部件，如机座、支撑筋、齿压板等，形成另外的漏磁磁路，过多的漏磁会使结构部件产生较大涡流，可能引起局部高温。

4) 对定子绕组绝缘造成威胁。正常情况下，定子绕组的绝缘能耐受 1.3 倍额定电压。但对运行多年、绝缘已老化或本身有潜伏性绝缘缺陷的发电机，升高电压运行，定子绕组的绝缘可能被击穿。

#### 4. 发电机频率允许变化范围

##### (1) 低频运行对发电机运行的影响。

1) 影响发电机通风冷却效果。发电机是靠转子两端的风扇来通风的，频率降低即为转子的转速下降，将使风扇鼓进的风量减少，造成发电机的冷却条件变坏，从而使绕组和铁芯的温度升高。

2) 若保持出力不变，会使定子、转子绕组温度升高。由于发电机的电动势与频率和主磁通成正比，频率下降时，电动势也下降。若发电机出力不变，则定子电流增加，使定子绕组的温度升高；若保持电动势和出力均不变，则应增加转子的励磁电流，这使转子绕组的温度也升高。

3) 保持机端电压不变，会使发电机结构部件产生局部高温。频率降低时，若用增加转子电流来保持机端电压不变，会使定子铁芯中的磁通增加，定子铁芯饱和程度加剧，磁通逸出磁轭，使机座上的某些结构部件产生局部高温，有的部位甚至冒火星。

4) 影响厂用电及系统安全运行。频率降低，使厂用电动机转速下降，厂用机械的出力降低，这将导致发电机的出力降低，从而加剧系统频率的降低，如此循环，将影响系统稳定运行。

5) 可能引起汽轮机叶片断裂。因为功率等于转矩与角速度的乘积，角速度  $\omega = 2\pi f$ ，频率  $f$  降低，则  $\omega$  降低，若出力不变，转矩应增加。可见，叶片会过负荷。此时，叶片将产生较大振动，若叶片的振动频率与固有振动频率接近或相等，叶片可能因共振而折断。

##### (2) 高频运行对发电机运行的影响。

频率过高，使发电机的转速增加，转子离心力增大，会使转子部件损坏，影响机组安全运行。所以，当转速达到汽轮机危急保安器动作值时，危急保安器将动作，使汽轮机主汽门关闭，机组停止运行。

根据上述分析，正常运行时，发电机的频率应经常保持在 50Hz。正常变化范围应在  $\pm 0.2\text{Hz}$  以内，最大偏差不应超过  $\pm 0.5\text{Hz}$ 。300MW 机组的频率偏离额定值的  $\pm 0.5\text{Hz}$  为紧急频率，此时，应汇报调度并作相应处理；频率偏离额定值的  $\pm 2.5\text{Hz}$  时，应停机。

#### 5. 发电机功率因数允许变化范围及安全运行极限

功率因数在数值上等于有功功率与视在功率的比值，即

