

# 同步发电机励磁系统 基本理论与设计

Basic Theory and Design of  
Synchronous Generator Excitation System

郭春平 高晓芳 编著



东南大学出版社  
SOUTHEAST UNIVERSITY PRESS

# 同步发电机励磁系统基本理论与设计

郭春平 高晓芳 编著

 东南大学出版社  
SOUTHEAST UNIVERSITY PRESS

· 南京 ·

## 内 容 提 要

本书较为系统地重点讨论了同步发电机励磁系统的基本理论与设计。同时,对励磁系统试验也作了简单介绍。

全书共9章及10个附录,分为两大部分。第一部分重点介绍了同步发电机励磁系统的基本理论,由第1章~第5章组成。第1章是预备知识,主要说明同步发电机励磁系统的发展、分类、作用及对其基本要求;第2章和第3章分别就同步发电机(包括同步电动机和同步调相机)和整流电路的有关基本内容进行了介绍;第4章和第5章分别对励磁控制系统的性能和励磁控制对电力系统稳定性的影响进行了详细的分析。第二部分是同步发电机励磁系统设计和试验,由第6章~第9章组成。第6章重点讨论了常规同步发电机的励磁系统设计;第7章分别就抽水蓄能发电电动机、燃气轮发电机和核电汽轮发电机,以及同步调相机、应急柴油发电机和同步电动机的励磁系统设计进行了讨论;第8章简单介绍了智能发电厂(站)中的励磁系统设计;第9章对励磁试验作了简单介绍。

本书可供研究同步发电机励磁系统基本理论和设计者学习,以及作为新入职励磁系统行业等工程技术人员的参考书目和培训教材,也可供高等院校“电气工程及其自动化”“自动化”等专业师生学习和了解同步发电机励磁系统之用。

### 图书在版编目(CIP)数据

同步发电机励磁系统基本理论与设计 / 郭春平, 高晓芳编著. —南京: 东南大学出版社, 2019. 9  
ISBN 978-7-5641-8545-9

I. ①同… II. ①郭… ①高… III. ①同步发电机—励磁系统—研究 IV. ①TM341.033

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2019)第 201046 号

同步发电机励磁系统基本理论与设计 Tongbu Fadianji Licixitong Jiben Lilun Yu Sheji

出版发行 东南大学出版社  
地 址 南京市四牌楼2号 邮编:210096  
出 版 人 江建中  
网 址 <http://www.seupress.com>  
经 销 全国各地新华书店  
印 刷 江苏凤凰数码印务有限公司  
开 本 787mm×1092 mm 1/16  
印 张 22.25  
字 数 541千字  
版 次 2019年9月第1版  
印 次 2019年9月第1次印刷  
书 号 ISBN 978-7-5641-8545-9  
定 价 89.00元

(本社图书若有印装质量问题,请直接与营销部联系,电话:025-83791830)

## 前 言

伴随同步发电机的发明,励磁系统也应运而生,至今已有百余年。随着电力系统的发展和同步发电机容量的增大(汽轮和水轮发电机单机额定容量均已达百万千瓦级水平),对励磁系统提出了新的要求,使其继续散发着活力。

励磁系统是同步发电机的重要组成部分,它不仅直接影响同步发电机的运行特性,还对电力系统的稳定性起着重要的作用。同步发电机励磁系统涉及电(磁)路理论、电机学、电力电子技术、控制理论、电力系统分析、计算机数值(或仿真)计算,以及电子技术、通信技术和嵌入式系统等多方面的知识,理论和技术性很强。其中,同步发电机、整流电路和自动控制原理是理论基本功。

在过去的近几十年里,有关同步发电机励磁系统的研究,业内取得了丰硕的成果,文稿浩如烟海,我国电力科技工作者也为此作出了重要贡献。因此,对前期工作进行梳理和总结,显然成为了时代发展的必然要求。也正是缘于此,笔者对其中涉及同步发电机励磁系统基本理论与设计的主要内容进行了初步、尝试性的提炼与概括,并给出了个人的一些看法。

工作之余,用时近两年才得以锱铢积累地将本书写完。本书的出版希望对这一行业的广大工作者有所裨益。期望对已熟悉同步发电机励磁系统基本理论与设计的人员,该书能够成为身边的备忘录,对刚入职励磁系统行业者,能够提供学习和指引的价值!

本书共9章和10个附录,分为两大部分。第一部分重点介绍了同步发电机励磁系统的基本理论,由第1章~第5章组成。第1章是预备知识,主要说明同步发电机励磁系统的发展、分类、作用及对其基本要求;第2章和第3章分别就同步发电机(包括同步电动机和同步调相机)和整流电路的有关基本内容进行了介绍;第4章和第5章分别对励磁控制系统的性能和励磁控制对电力系统稳定性的影响进行了详细的分析。第二部分是同步发电机励磁系统设计和试验,由第6章~第9章组成。第6章重点讨论了常规同步发电机的励磁系统设计;第7章分别就抽水蓄能发电电动机、燃气轮发电机和核电汽轮发电机,以及同步调相机、应急柴油发电机和同步电动机的励磁系统设计进行了讨论;第8章简单介绍了智能发电厂(站)中的励磁系统设计;第9章对励磁试验作了简单性介绍。全书由郭春平和高晓芳完成,其中的第3、5和9章由高晓芳编写,其余章节及附录由郭春平编写,最终由郭春平负责全书的统稿。

在作者以往工作中,多次得到南瑞集团有限公司电气控制分公司余振经理的举荐,才得以作了很多有意义的事情,在本书酝酿期他给出了许多宝贵的意见,对其的感谢之情无以言表。此外,还要向公司的许其品、耿敏彪、朱宏超、黄卫平、何靖、史玉华、殷修涛、谢燕军、李勇泉、林元飞、孙延昭、李潇洛、徐春建、马腾宇、郝勇、吴杰、安宁、季婷婷、杨铭、杨玲、王啸等领导 and 同事,在以往的工作交流中对本书编写所带来的启发,以及湖北台基半导体股份有限公司的吕建忠、安徽电科技股份有限公司的陈玲和英国 M&I 公司国内代理商深圳克拉克自动化控制有限公司的刘晓鸿等提供的技术支持,与书后所列参考文献的各位作者,尤其是励磁行业内资深专家李基成老先生不厌其烦的解惑,一并致以最诚挚的谢意。最后,还要特别感谢南瑞集团有限公司电气控制分公司和国家电投宁夏能源铝业临河发电分公司所提供的平台和帮助,对家人在成书过程中的耐心支持表示深深的感激。

限于本人理论水平和实践经验,本书内容仅为管中窥豹,存在的不足和待改进之处,还望各位同行批评指正,不吝赐教。热忱欢迎大家来函交流,笔者 E-mail: [auto014@163.com](mailto:auto014@163.com)。

郭春平

2018 年 12 月 29 日丑时于南京家中

# 目 录

|                              |     |
|------------------------------|-----|
| 第一章 绪论 .....                 | 1   |
| 第一节 励磁系统的发展 .....            | 1   |
| 第二节 励磁系统的分类 .....            | 3   |
| 第三节 励磁系统的作用 .....            | 7   |
| 第四节 对励磁系统的基本要求 .....         | 18  |
| 第二章 同步电机 .....               | 20  |
| 第一节 同步发电机的基本类型、结构和工作原理 ..... | 20  |
| 第二节 同步发电机的数学模型 .....         | 23  |
| 第三节 同步发电机的运行特性及功率调节 .....    | 64  |
| 第四节 同步电动机和同步调相机 .....        | 71  |
| 第三章 整流电路 .....               | 80  |
| 第一节 三相半波可控整流电路 .....         | 80  |
| 第二节 三相桥式全控整流电路 .....         | 87  |
| 第三节 三相桥式半控、不可控整流电路 .....     | 102 |
| 第四节 单相桥式全控整流电路 .....         | 106 |
| 第五节 整流变漏感对整流电路的影响 .....      | 107 |
| 第四章 励磁控制系统性能分析 .....         | 119 |
| 第一节 励磁控制系统的数学模型 .....        | 119 |
| 第二节 励磁控制系统的静态特性 .....        | 135 |
| 第三节 励磁控制系统的动态特性 .....        | 141 |
| 第四节 系统辨识在励磁系统建模中的应用 .....    | 151 |
| 第五章 励磁控制对电力系统稳定性的影响 .....    | 153 |
| 第一节 仅考虑机械阻尼的系统低频振荡分析 .....   | 153 |
| 第二节 再考虑励磁系统的系统低频振荡分析 .....   | 155 |
| 第三节 PSS抑制低频振荡原理的简析 .....     | 157 |
| 第六章 常规同步发电机励磁系统设计 .....      | 165 |
| 第一节 系统设计 .....               | 165 |
| 第二节 励磁变压器及附属设备 .....         | 168 |
| 第三节 晶闸管整流装置 .....            | 184 |

|   |            |
|---|------------|
| 第四节 灭磁装置及过电压保护 .....                      | 215        |
| 第五节 调节器 .....                             | 249        |
| 第六节 其他装置 .....                            | 268        |
| 第七节 母线导体 .....                            | 276        |
| 第八节 二次接线设计 .....                          | 281        |
| <b>第七章 其他类型同步电机励磁系统设计 .....</b>           | <b>284</b> |
| 第一节 抽水蓄能发电电动机励磁系统设计 .....                 | 284        |
| 第二节 燃气轮发电机和核电汽轮发电机励磁系统设计 .....            | 290        |
| 第三节 同步调相机励磁系统设计 .....                     | 292        |
| 第四节 应急柴油发电机和同步电动机励磁系统设计 .....             | 293        |
| <b>第八章 智能电厂(站)中的励磁系统设计简述 .....</b>        | <b>295</b> |
| <b>第九章 励磁系统试验 .....</b>                   | <b>298</b> |
| 第一节 分类及试验 .....                           | 298        |
| 第二节 常见故障及处理 .....                         | 305        |
| <b>附录</b>                                 |            |
| <b>附录 A 同步发电机定、转子各绕组自感及互感的计算 .....</b>    | <b>307</b> |
| A.1 定子绕组的自感和定子绕组间的互感 .....                | 307        |
| A.2 定子绕组与转子绕组间的互感 .....                   | 308        |
| A.3 转子绕组的自感和转子绕组间的互感 .....                | 308        |
| <b>附录 B 励磁控制系统稳态误差计算 .....</b>            | <b>309</b> |
| B.1 误差及稳态误差的定义 .....                      | 309        |
| B.2 稳态误差的计算 .....                         | 310        |
| <b>附录 C 励磁控制系统动态性能分析法 .....</b>           | <b>312</b> |
| C.1 时域分析法 .....                           | 312        |
| C.2 根轨迹法 .....                            | 318        |
| <b>附录 D 拉氏变换及反变换 .....</b>                | <b>322</b> |
| D.1 拉氏变换的基本定理和常用函数的拉氏变换 .....             | 322        |
| D.2 用查表法进行拉氏反变换 .....                     | 323        |
| <b>附录 E 励磁系统设计所引用的主要技术标准和管理规定 .....</b>   | <b>325</b> |
| <b>附录 F 励磁系统中的短路电流计算 .....</b>            | <b>328</b> |
| F.1 晶闸管整流装置交流母线侧短路,即短路点 $d_1$ .....       | 328        |
| F.2 晶闸管整流装置直流母线侧正负极金属性短路,即短路点 $d_2$ ..... | 329        |
| <b>附录 G 晶闸管整流装置风道通风量计算 .....</b>          | <b>331</b> |
| <b>附录 H 常用直流磁场断路器简介 .....</b>             | <b>332</b> |



|      |                       |     |
|------|-----------------------|-----|
| H.1  | DMX 系列                | 332 |
| H.2  | CEX 系列                | 333 |
| H.3  | GE Rapid 系列           | 335 |
| H.4  | UR 系列和 HPB 系列         | 337 |
| H.5  | Emax 系列               | 340 |
| 附录 I | 交流信号采样离散的计算           | 342 |
| 附录 J | 与励磁系统有关的主要组织、网站及制造厂名录 | 344 |
| J.1  | 组织                    | 344 |
| J.2  | 网站                    | 344 |
| J.3  | 主要制造厂名录               | 344 |
| 参考文献 |                       | 346 |

# 第一章 绪论

同步发电机是电力系统的主要设备之一,它实现了机械能到电能的转化。为完成这一转化,它需要一个直流磁场,产生这一磁场的直流电流称之为励磁电流,由励磁系统提供。同步发电机励磁系统的基本工作原理如图 1-0 所示。

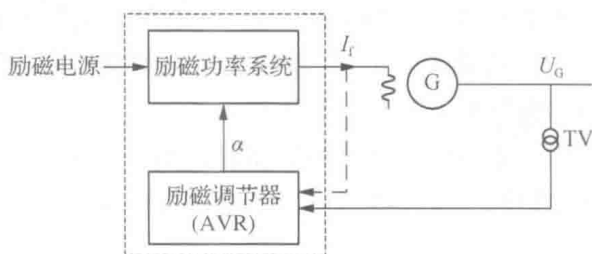


图 1-0 同步发电机励磁系统基本工作原理

可见,同步发电机励磁系统(图中虚线框部分)主要由励磁功率系统和励磁调节器(即励磁控制部分)两部分构成,其作用分别为:

励磁功率系统负责向同步发电机励磁绕组提供直流励磁电流,并在同步发电机故障、异常运行和停机等工况时,实现灭磁、保护和制动等功能。一般由励磁变压器、直流励磁机、交流励磁机或半导体静止整流装置、灭磁装置及过电压保护、起励装置、制动装置及母线导体等设备(或其中部分设备)组成。其中的励磁变压器、直流励磁机、交流励磁机或半导体静止整流装置,有时又习惯统称之为励磁机。

励磁调节器(简称调节器、AVR)依据输入的端电压(包括励磁电流,图中虚线)和给定的调节与控制准则,实时地控制励磁功率系统的电压输出,从而实现调节发电机励磁电流大小的目的。

按照自动控制原理来划分,同步发电机是控制对象,调节器是控制器,励磁功率系统是执行机构,它们组成一个完整的励磁控制系统。严格地讲,励磁控制系统还应包括发电机并网后的电力网和负荷。

以上内容是阅读本书之前所必须先要建立的基本概念。

## 第一节 励磁系统的发展

随着电力系统的互联和单机容量的增大,同步发电机励磁系统也相应地发生了深刻的变化。以下从励磁功率系统和励磁调节器两个角度予以说明,具体表现为:



## 一、励磁功率系统

励磁系统应能够给同步发电机励磁绕组提供足够的、可靠的及连续可调的直流电流。励磁系统的额定容量一般约为发电机额定容量的1%。

20世纪50年代初期,励磁系统都是由同轴直流励磁机供电。当发电机容量超过200 MW时,特别是汽轮发电机,由于转速高,直流励磁机换向困难,所以存在运行可靠性不高的问题,于是后期就发展了各种不同类型的交流励磁机励磁系统。

在交流励磁机系统中,同轴的交流励磁机经二极管整流器向发电机励磁绕组供电,就解决了直流励磁机换向困难的问题。但是,这一励磁系统反应速度较慢,所以后来又陆续出现了相对快速的交流励磁机励磁系统,如用可控硅整流代替二极管整流的他励励磁系统,以及为取消滑环的无刷励磁系统等。

近几十年,为克服交流励磁机励磁系统的不足,已取消交流励磁机,又出现了静止励磁系统,即励磁电源来自发电机机端或厂用电,经励磁变压器降压后,通过可控硅整流装置整流后,向发电机励磁绕组提供励磁电流的一种励磁方式。

目前,工程上普遍使用交流励磁机励磁系统和静止励磁系统,直流励磁机励磁系统已基本被淘汰。有关励磁系统的分类,将在本章第二节中详细介绍。

## 二、励磁调节器

励磁调节器是励磁控制系统的调节与控制中心,可从不同角度进行分类。比如,按其元件构成可分为机电型、电磁型、半导体型(又称电子型)和数字式(或微机型)4个种类;按其调节规律可分为比例或比例—积分—微分(P或PID)调节、线性最优控制、自适应控制、非线性控制和智能型等多种;按其控制方式可分为电压闭环控制、电流闭环控制、功率因数闭环控制和无功功率闭环控制等4种。

早期的调节器为振动型和变阻器型,均含有机电部件,可统称为机电型调节器,这一类型调节器由于不能连续调节、响应速度缓慢,并存有死区,现早已被淘汰。

20世纪50年代,磁放大器出现后,广泛采用磁放大器和电磁元件组成的电磁型调节器。这类调节器具有时滞性,时间常数较大,调节速度也较慢,当时主要应用于直流励磁机励磁系统。

到了60年代初期,随着半导体技术的发展,开始采用由半导体元件组成的半导体型调节器。半导体型调节器由于调节速度较快,因此随后在他励交流励磁机励磁系统上得到广泛应用。

实际上,无论是电磁型还是半导体型调节器,均属于模拟式调节器,其电压测量、调差、脉冲移相和校正等环节均由相应的硬件模拟电路来完成。若要调整或增加某些功能环节,则必须修改相应的硬件电路,这就带来了装置运行、维护上的不便。

随着大规模集成电路和微机技术的迅速发展,20世纪80年代数字式(或微机型)调节器出现。数字式调节器的电压测量、调差、脉冲移相和校正等环节基本上均由软件来实现。若要调整或增加某些环节,则可根据工程实际需要,直接修改相应程序即可,一般对硬件电路不作改动或改动较小,因此在应用上极为灵活和方便。此外,模拟式调节器很难或无法实现的功能,数字式调节器通常可以很容易地实现,使得其功能也越来越丰富。图1-1-1示出了模拟式与数字式励磁系统在构成上的主要差异。可以看出,主要区别在励磁调节器上。

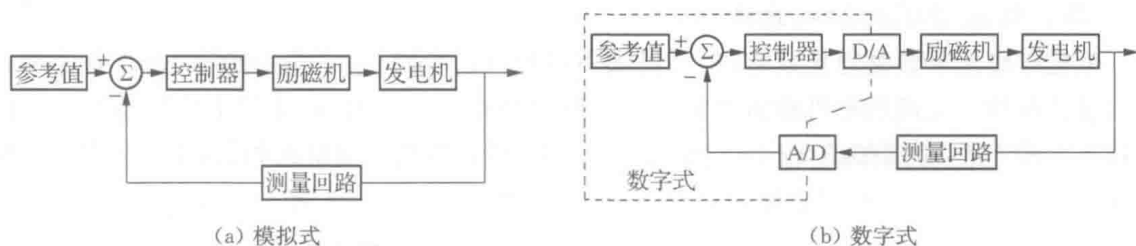


图 1-1-1 模拟式和数字式励磁系统

我国首台 WLT-1 型数字式励磁调节器由水利电力部南京自动化研究所(现为南瑞集团有限公司)于 1985 年研制成功,并成功应用于福建池潭水电站。

随着智能电网的发展,智能型励磁系统的定义、研制及设计也势在必行。有关其特点和要求等基本内容,将在第八章予以介绍。

## 第二节 励磁系统的分类

同步发电机励磁系统类型较多,叫法也不完全统一。根据励磁系统的构成特点,比如是否含有旋转励磁机,以及旋转励磁机的类型,可分为以下 3 个大类:

- (1) 直流励磁机励磁系统。
- (2) 交流励磁机励磁系统。
- (3) 静止励磁系统。

目前,同步发电机励磁系统广泛采用的励磁类型,主要有交流励磁机励磁系统和静止励磁系统 2 种,直流励磁机励磁系统已很少采用。为对励磁系统有一个全面的认识 and 了解,以下将对上述 3 种类型作一简单介绍,并给出原理性的框图。

### 一、直流励磁机励磁系统

依据直流励磁机励磁方式的不同,直流励磁机励磁系统有自励式和他励式 2 种方式,其原理接线分别如图 1-2-1(a)和(b)所示。自励式中直流励磁机的励磁电流由直流励磁机电枢经可调电阻提供;他励式中主励磁机励磁电流由与发电机同轴旋转的副励磁机提供。可以看出,他励式比自励式多用了一台直流副励磁机。

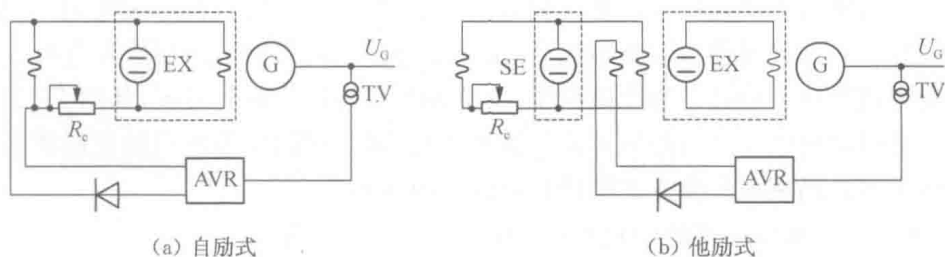


图 1-2-1 直流励磁机励磁系统

G—同步发电机;EX—直流励磁机(简称主励磁机);SE—直流副励磁机(简称副励磁机);AVR—励磁调节器(Automatic Voltage Regulator); $R_c$ —可调电阻;TV—电压互感器;◀—整流装置;□—旋转部分

## 二、交流励磁机励磁系统

依据硅整流装置是静止或旋转、可控或不可控,以及励磁机自身的励磁方式(有他励式和自励式两种),交流励磁机励磁系统可有多种组合形式。目前,在工程上应用最为广泛的主要有6种方式,分别如图1-2-2所示。实际上,若依据副励磁机的相数,还有三相和单相之分。

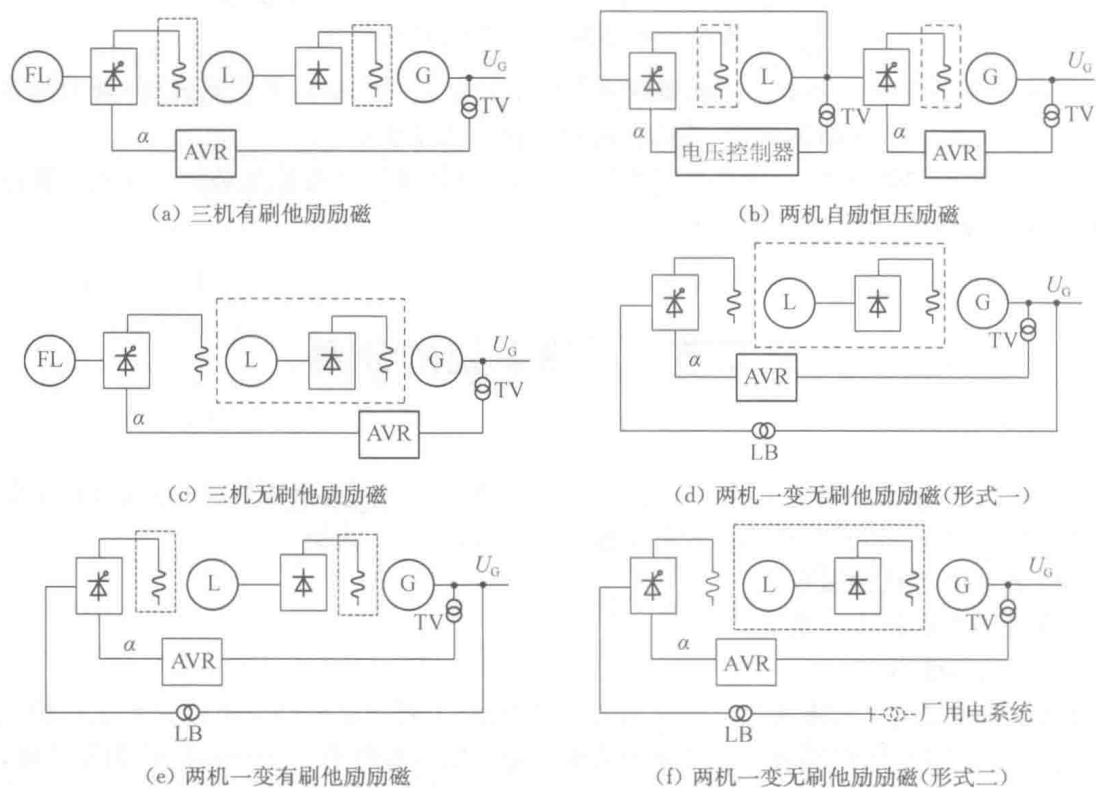


图 1-2-2 交流励磁机励磁系统

L—交流励磁机(简称主励磁机);FL—交流副励磁机(简称副励磁机);LB—励磁变压器; —可控硅整流装置; —二极管整流装置;其他符号含义同上

## (一) 交流励磁机静止硅整流励磁系统,是一种有刷励磁方式

交流励磁机静止不可控硅整流励磁系统,又称三机有刷他励励磁系统,如图1-2-2(a)所示。副励磁机输出电压经可控硅整流装置整流后,给主励磁机提供励磁电流,主励磁机输出电压再经静止的二极管整流装置整流后,最终通过碳刷提供励磁电流给发电机。

交流励磁机静止可控硅整流励磁系统,又称两机自励恒压励磁系统,如图1-2-2(b)所示。交流励磁机输出电压经可控硅整流装置整流后,通过碳刷给发电机提供励磁电流,而交流励磁机则采用自励恒压励磁方式维持自身的端电压恒定。

此外,还有一种两机一变的励磁方式,如图1-2-2(e)所示。

## (二) 交流励磁机旋转硅整流励磁系统,是一种无刷励磁方式

交流励磁机的交流绕组(或电枢绕组)和不可控硅整流装置随同发电机主轴一起旋转,就构成了交流励磁机旋转硅整流励磁系统。具体有三机无刷他励励磁和两机一变无刷他励



励磁两种方式,分别如图 1-2-2(c)和(d)所示。其中,对两机一变励磁方式,还有一种励磁电源从厂用电系统接线的情况,如图 1-2-2(f)所示。

### 三、静止励磁系统

静止励磁系统,有时又称为静态励磁系统,主要有自并励静止励磁、恒电压源静止励磁和自复励静止励磁等 3 种方式。其中,前 2 种励磁系统应用最为广泛。

#### (一) 自并励静止励磁系统

在自并励静止励磁系统中,发电机的励磁电源并非来自励磁机,而取自经励磁变压器降压后的机端,没有转动部件,故称之为自并励静止励磁系统,如图 1-2-3 所示。

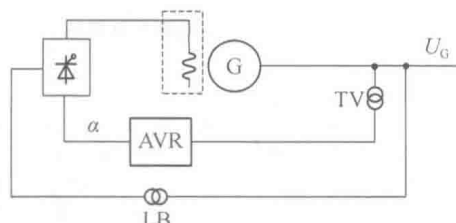


图 1-2-3 自并励静止励磁系统(图中符号含义同上)

相比励磁机励磁系统,自并励静止励磁系统的主要优点,可总结为以下几点:

- (1) 励磁系统接线方式和设备比较简单,也无转动部分,便于操作和维护,可靠性较高。
- (2) 不需要同轴励磁机,减少了相关设备,缩短了机组主轴长度,降低了工程造价。
- (3) 励磁系统励磁电压响应速度快,功能多样,实现灵活。

由于自并励静止励磁系统优势明显,因此,被推荐应用于大型发电机,特别是水轮发电机。国外已将这一励磁系统作为大型发电机的定型励磁方式。近年来,我国也开始在一些大型发电机上进行了推广应用。

#### (二) 恒电压源静止励磁系统

恒电压源静止励磁系统主要有如图 1-2-4(a)和(b)所示两种接线方式,其中第一种方式常应用于抽水蓄能发电电动机上。

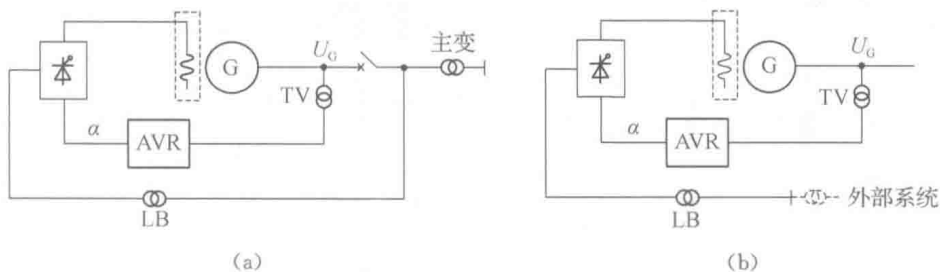


图 1-2-4 恒电压源静止励磁系统(图中符号含义同上)

#### (三) 自复励静止励磁系统

自复励静止励磁是一种由电压源和电流源构成复合励磁电源,再经可控硅整流装置整流后,提供励磁电流的励磁系统。依据机端电压量和电流量叠加方式的不同,可细分为直流侧并联叠加、直流侧串联叠加、交流侧并联叠加和交流侧串联叠加 4 种情况,其原理接线分别如图 1-2-5(a)~(d)所示。

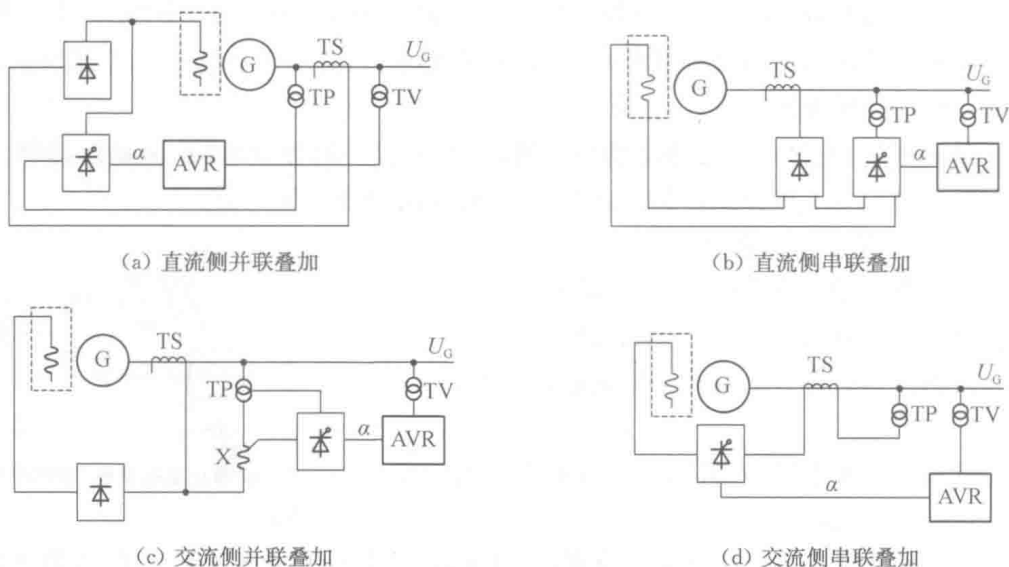


图 1-2-5 自复励静止励磁系统励磁系统

TS—串联变压器; TP—并联变压器; X—电抗值可调型电抗器; 其他符号含义同上

实际上,在静止励磁系统中,除上述 3 种常见励磁形式外,还有 P 棒励磁、定子绕组双星型(相移  $30^\circ$ )接线励磁、谐波励磁等一些非主流励磁系统。其中,前 2 种励磁系统的原理接线图,分别如图 1-2-6(a)和(b)所示。

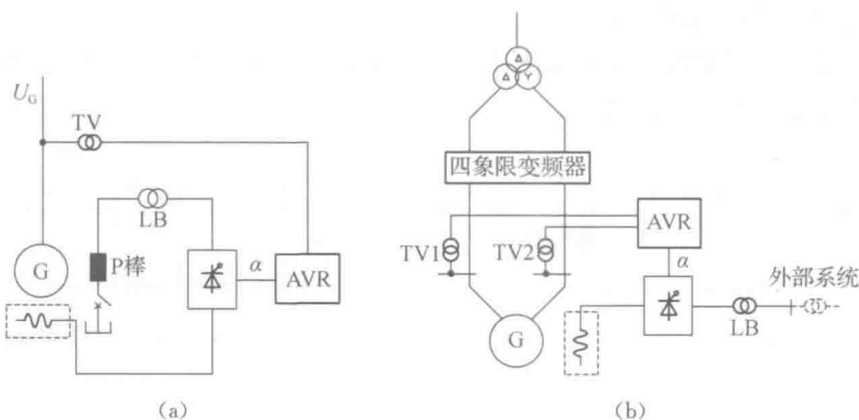


图 1-2-6 P 棒励磁和定子绕组双星(相移  $30^\circ$ )形接线励磁方式

应当指出,实际上,在工程中励磁系统还有另外 2 种常见的分类方法,分别依据励磁电源是否受发电机运行状态的影响和励磁系统对系统暂态过程的响应时间<sup>[14]</sup>来进行分类,见表 1-2-1 所示。



表 1-2-1 励磁系统的其他分类

| 分类依据              | 励磁系统类型           |           |           |                 |
|-------------------|------------------|-----------|-----------|-----------------|
| 励磁电源是否受发电机运行状态的影响 | 旋转励磁机励磁系统        | 直流励磁机励磁系统 | 自励式       |                 |
|                   |                  |           | 他励式或自复励式  |                 |
|                   |                  | 交流励磁机励磁系统 | 可控整流式     | 两机自励恒压式(两机系统)   |
|                   |                  |           | 不可控整流式    | 两机一变有刷他励式(两机系统) |
|                   | 三机有刷他励式(三机系统)    |           |           |                 |
|                   | 静止励磁系统           | 自并励式      |           |                 |
|                   |                  | 自复励式      |           |                 |
|                   |                  | 恒电压源式     |           |                 |
|                   | 励磁系统对系统暂态过程的响应时间 | 快速励磁系统    | 自并励静止励磁系统 |                 |
|                   |                  |           | 自复励静止励磁系统 |                 |
| 恒电压源静止励磁系统        |                  |           |           |                 |
| 经特殊设计的高起始响应励磁系统   |                  |           |           |                 |
| 慢速励磁系统            |                  | 直流励磁机励磁系统 |           |                 |
|                   |                  | 交流励磁机励磁系统 |           |                 |

注:慢速励磁系统,又称常规励磁系统,是指未经特殊设计的直流励磁机或交流励磁机励磁系统

### 第三节 励磁系统的作用

励磁系统是保证发电机输出合格电能质量和电力系统安全稳定运行的重要保障之一,具有投资少、效果好等优点,其作用主要体现在以下几方面。

#### 一、电压控制

电力系统正常运行时,负荷随机波动,此时需要对励磁电流进行实时调节,以控制机端或系统中某一点的电压在给定水平。为简单起见,以一台隐极式同步发电机接入系统为例,如图 1-3-1(a)所示,相应的等值电路及相量图分别如图 1-3-1(b)和(c)所示。图中忽略了发电机定子绕组电阻。

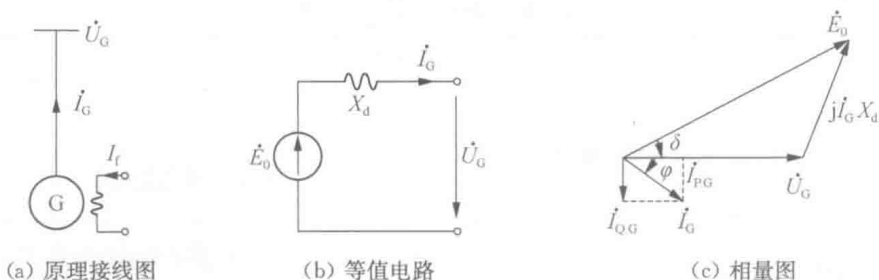


图 1-3-1 单机运行系统

据图 1-3-1(c) 可得, 空载电动势  $\dot{E}_0$  与机端电压  $\dot{U}_G$  两者间的幅值关系式为

$$E_0 \cos \delta = U_G + I_{Q,G} X_d \quad (1-3-1)$$

式中:  $\delta$ ——发电机功角;

$I_{Q,G}$ ——发电机的无功电流。

通常功角  $\delta$  较小, 可近似认为  $\cos \delta = 1$ , 这样上式就可简化为

$$U_G = E_0 - I_{Q,G} X_d \quad (1-3-2)$$

由此可以看出, 无功电流是造成  $U_G$  和  $E_0$  幅值差(或机端电压变化)的主要原因。

将上式以图形的形式进行表示, 如图 1-3-2 所示。图中直线 1 和 2 分别是励磁电流  $I_f$  为不同值时的情况。

可以看到, 在无功电流为  $I_{Q1,G}$  时, 端电压为  $U_{G1}$ , 相应地励磁电流为  $I_{f1}$ , 即直线 1。当无功电流增加到  $I_{Q2,G}$  时, 如果励磁电流不增加, 则端电压将降低至  $U_{G2}$ , 此时可能满足不了系统运行的要求, 因此必须将励磁电流增加至  $I_{f2}$ , 即直线 2, 这样才能维持端电压保持在无功电流增加前的  $U_{G1}$  水平。同样, 在无功电流减小时, 端电压会上升, 相应地必须减小励磁电流, 是上述过程的逆过程。也就是说, 励磁系统正是通过不断调节励磁电流的大小, 来维持发电机端电压或系统中某点电压在给定水平的。

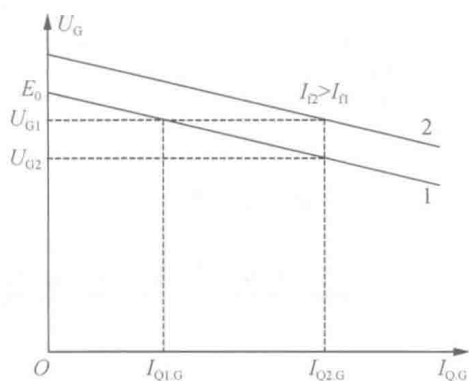
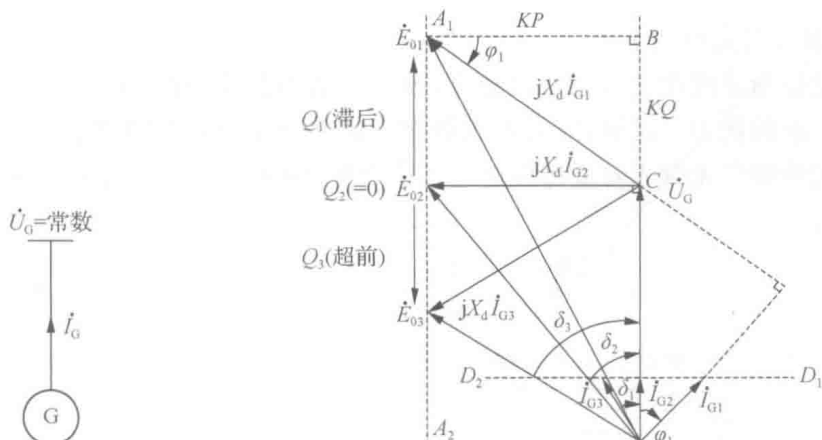


图 1-3-2 无功电流对端电压的影响及励磁调节

## 二、无功功率的调节和分配

为便于分析, 以图 1-3-3(a) 所示单机与无穷大容量母线并联运行系统为例。在端电压  $U_G$  和输出有功功率  $P$  恒定时, 图 1-3-3(b) 示出了励磁电流变化对无功功率  $Q$  的影响。



(a) 原理接线图

(b) 有功功率恒定时励磁电流变化对无功功率的影响

图 1-3-3 单机接入无穷大容量母线运行

从上图可以看出,  $\dot{E}_0$  终端变化轨迹为平行于  $\dot{U}_G$  的  $\overline{A_1A_2}$ , 定子电流  $\dot{I}_G$  的变化轨迹为  $\overline{D_1D_2}$ ,  $\overline{CA_1}$  (或相量  $jX_d \dot{I}_G$ ) 在  $BA_1$  线和  $CB$  线上的投影分别为  $\overline{BA_1}$  和  $\overline{CB}$ , 长度分别为

$$\left. \begin{aligned} BA_1 &= CA_1 \cos \varphi_1 = I_{G1} X_d \cos \varphi_1 = \frac{X_d}{U_G} U_G I_{G1} \cos \varphi_1 = KP \\ CB &= CA_1 \sin \varphi_1 = I_{G1} X_d \sin \varphi_1 = \frac{X_d}{U_G} U_G I_{G1} \sin \varphi_1 = KQ \end{aligned} \right\} \quad (1-3-3)$$

式中: 常数  $K = X_d / U_G$ ;  $P = U_G I_{G1} \cos \varphi_1$ ,  $Q = U_G I_{G1} \sin \varphi_1$ 。

可以看到,  $X_d I_G$  在  $BA_1$  线和  $CB$  线上的投影长度  $BA_1$  和  $CB$ , 分别正比于发电机输出的有功功率和无功功率。在前者保持不变时, 后者则随着励磁电流的变化而发生变化。也就是说, 接入无穷大系统的发电机, 在输出有功功率恒定时, 通过改变励磁电流, 可实现调节发电机输出无功功率大小和方向的目的。

但在实际运行中, 通常同一母线上有多台发电机接入, 并且系统也并非严格意义上的无穷大系统, 母线电压会随着无功负荷的波动而变化, 比如在扩大单元接线系统中。调节其中任一发电机的励磁电流, 不但影响其本身的无功功率输出, 而且还影响与之并联运行的其他发电机, 具体情况与各发电机的调差特性设置有关。有关这一内容的介绍, 将在第四章第二节中进行讨论。因此, 励磁系统还担负着调节并联运行机组间无功功率分配的任务。

### 三、提高电力系统的稳定性

电力系统稳定运行是保证电力系统可靠供电的首要条件, 一方面它必须时刻保证必要的电能数量和质量, 另一方面它又处在不断的扰动之中, 且扰动具有随机性。在扰动发生后的过渡过程中一旦发生失稳问题, 将会造成严重的社会影响和极大的经济损失。

目前, 关于电力系统稳定性的分类, 有多种方法, 行业上并不统一, 并且各种方法, 各有优缺点。为便于研究, 我国习惯于按照电力系统受到干扰的大小, 将电力系统稳定性问题分为静态稳定、暂态稳定和动态稳定三种, 其中的动态稳定是严格的小扰动稳定, 静态稳定是简化的小扰动稳定。以下将按照上述的分类方法, 就励磁系统对电力系统稳定性的影响作