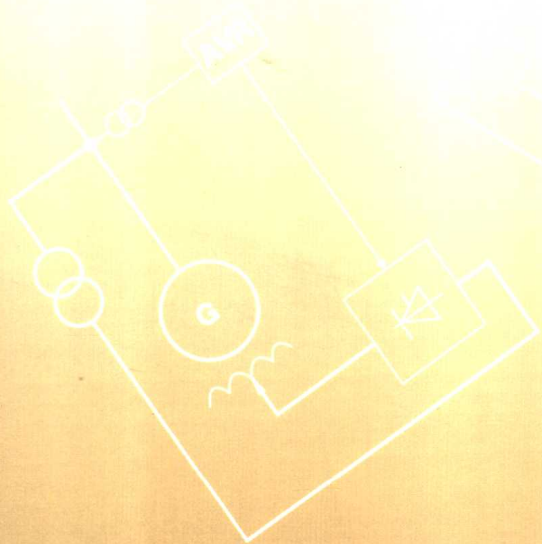


李基成 编著

现代同步发电机 励磁系统 设计及应用



中国电力出版社
www.cepp.com.cn



现代同步发电机 励磁系统设计及应用

李基成 编著

电力科技专著出版资金资助项目



中国电力出版社
www.cepp.com.cn

内 容 提 要

本书叙述了目前广泛应用的他励静止二极管励磁系统、无刷励磁系统、他励晶闸管励磁系统以及自励静止励磁系统等几种主要励磁方式的性能特征,涉及到励磁系统的发展与演绎、性能的评价、设计方法及数学模型的建立,以及励磁变压器和功率整流柜的技术规范等内容。

本书可作为高校电力系统专业学生的学习教材,也可作为电站设计、调试和运行维护人员的参考资料,并可供电力试验研究所和电机制造厂相关专业人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

现代同步发电机励磁系统设计及应用/李基成编著.北京:中国电力出版社,2002

ISBN 7-5083-1030-6

I. 现... II. 李... III. 同步发电机-励磁系统 IV. TM341

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2002)第032802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>)

汇鑫印务有限公司印刷厂印刷

各地新华书店经售

*

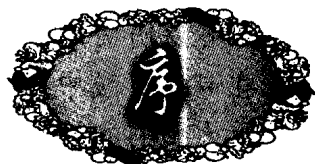
2002年7月第一版 2002年7月北京第一次印刷

787毫米×1092毫米 16开本 21.75印张 488千字

印数 0001—4000册 定价 45.00元

版 权 专 有 翻 印 必 究

(本书如有印装质量问题,我社发行部负责退换)



在励磁和励磁控制系统技术领域的开拓和发展中，世界各国的科技工作者在近半个世纪的时间里作出了不懈的努力和重要的贡献。如前苏联开发了强励式励磁调节器，其作用原理是利用多个参量的偏差和导数进行综合控制，以达到阻尼低频功率振荡和提高电力系统小扰动稳定性的目的。

众所周知，西方国家在解决电力系统低频振荡问题时，采用了“电力系统稳定器（PSS）”，此方法与前苏联强励式励磁调节器比较，其物理概念清晰，参数易于整定，在工程中得到了广泛的应用。

自 20 世纪 60 年代，随着现代控制论及计算机技术的飞速发展，国内、外一些知名学者相继提出了利用现代控制理论研究电力系统控制的课题，具有代表性的是在 70 年代初，加拿大的余耀南教授率先提出了利用现代控制理论对电力系统进行多参量线性最优控制的研究。其后，清华大学一些学者开拓性地将现代线性控制理论用于励磁控制系统的研究，并在 80 年代初完成了工业试验，取得了良好的效果。

正如 50 年代将拉氏变换、复变函数理论和传递函数描述方法应用于单参量输入和输出系统以及 60 年代将状态空间现代控制理论与线性代数分析方法相结合并应用于线性多变量最优控制系统一样，在近 10 年来，将微分几何理论引入非线性多变量控制系统的研究也取得了很大的进展。由清华大学研制的非线性多变量励磁控制器在设计中采用了精确的（非近似线性化）非线性电力系统模型，并基于微分几何原理，将电力系统描述为一个标准的仿射非线性系统，这种非线性励磁控制器对提高电力系统稳态和暂态稳定均有良好的效果，当系统参数变化时，亦具有良好的鲁棒性，在工业中也获得了应用。

多年来，随着我国电力系统建设和大型水、火发电机组制造事业的飞跃发展，以及国外发电设备的引进与技术交流，在励磁控制领域中已培育出一批在基础理论方面训练有素、在实践方面经验丰富和勇于进取的专业队伍。

在未来，随着诸如三峡电站的建设以及机组容量达 1000MW 的田湾核电站

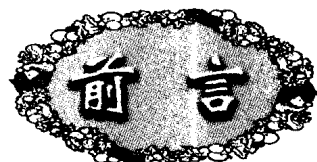
的兴建和西部大开发的带动,我国的科技工作者将担负着重大的历史使命。《现代同步发电机励磁系统的设计及应用》一书是作者继《自动调整励磁装置》、《现代同步发电机整流器励磁系统》两书出版之后的第三本励磁专著。本书作者以明确的思路,精练的语言和新颖的取材,系统地总结了作者近 50 年来在专业实践中的研究心得,涉及到了在大型水、火电机励磁系统发展中有重大影响的基础理论和特有的关键技术,是近年少见的励磁方面的专著,相信本书的问世必将会对我国励磁控制技术的发展和这一领域的人才培养起到有力地推动作用。

清华大学电力系统

国家重点实验室

卢 强

2002 年 2 月



在现代化电力系统中，同步发电机运行的稳定性一直是世界各国所普遍关注的课题，在诸多改善发电机稳定性的措施中，提高励磁系统的控制性能，被认为是最有效和经济的措施之一。

尽管励磁控制技术的重要性得到了普遍的认同，但是，较为系统的论述励磁系统的性能特征、参数选择原则和技术规范确定等具体工程应用方面的励磁专著仍属少见。

有鉴于此，作者结合近 50 年来从事励磁系统设计及研究开发方面的心得，撰写了这本突出实用性，兼顾励磁系统设计和应用，以论述励磁系统具体工程技术问题为中心的励磁专著，以应当前之所需。

此外，本书在取材方面也力求能反映国内、外励磁技术的一些新的进展，对诸如励磁变压器的特征、静止自励励磁的轴电压、功率整流柜的阻容保护电力系统电压调节器 PSVR 以及综合励磁与调速技术于一体的线性多变量控制器等专题作了介绍和论述，以期国内在开展这方面研究工作时引以为借鉴和参考。

在本书定稿时，蒙中国电力科学研究院刘增煌高工对书稿进行了审阅，并提出了宝贵的改进意见，对此致以谢意。

作者衷心地感谢中科院院士、清华大学电力系统国家重点实验室主任卢强教授为本书所作的序言。

多年来，卢强教授在诸多方面给予了作者大力的支持与帮助，于此一并致以谢忱。

在本书出版之际，使作者更加缅怀早逝的清华大学原校长高景德教授，先生一生治学严谨，诲人不倦，为人高风亮节，大器无华，恩师的关怀与教诲使我终生铭记难忘！

李基成

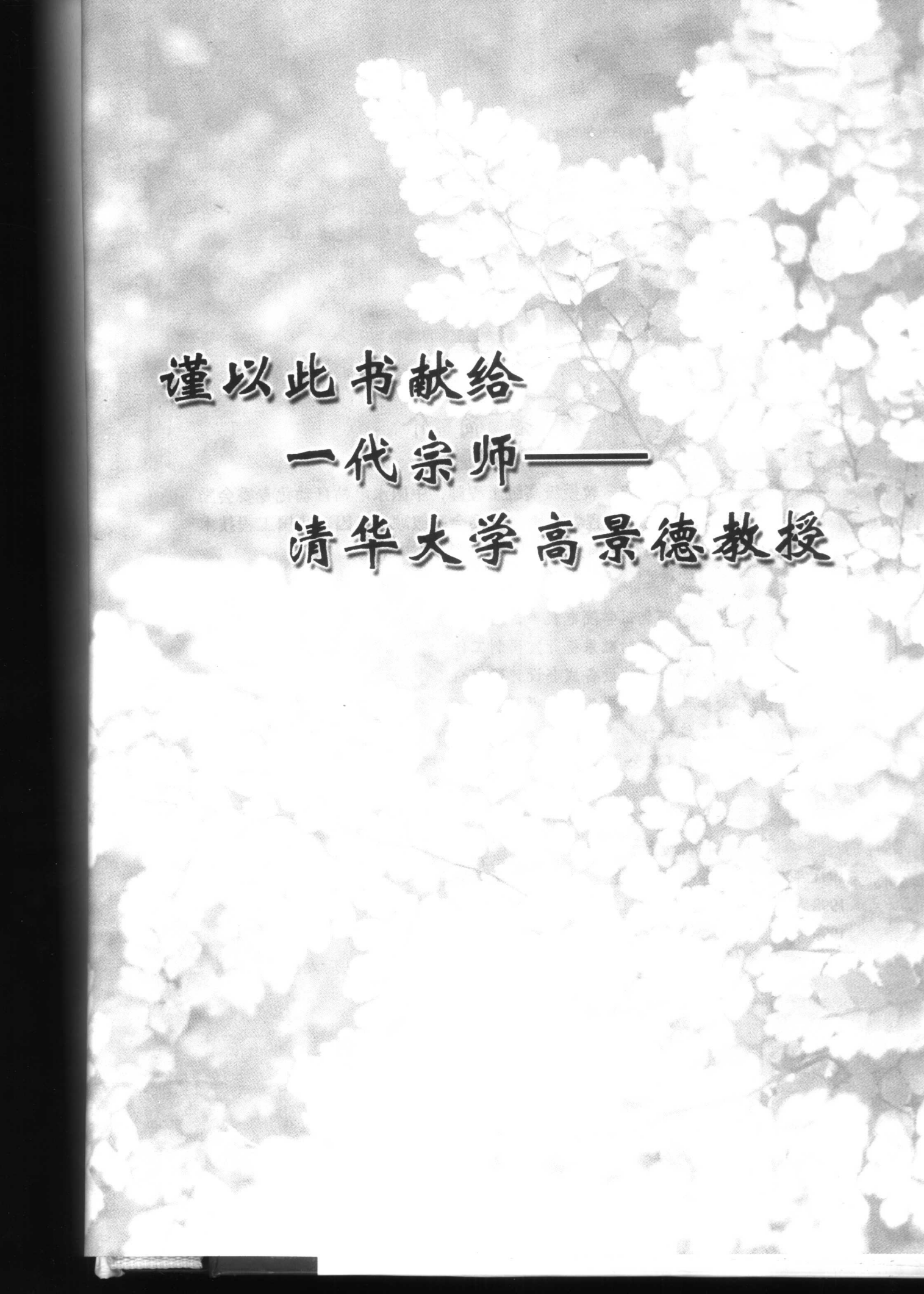
2002 年 3 月 20 日



作者简介

李基成 男 汉族 教授级高级工程师，中国水电站自动化专委会励磁分委会及中国电机工程学会励磁分委会高级顾问，因对我国工程技术事业有特殊贡献而享受国务院颁发的政府特殊津贴待遇。

- 1953 年 毕业于东北工学院电机系，同年 9 月入哈尔滨电机厂，后转入大电机研究所从事励磁系统开发研制工作
- 1979 年 在哈尔滨电站设备成套设计研究所工作
- 1981 年 赴美国西屋公司匹兹堡及奥兰多分厂学习 600MW 汽轮发电机无刷励磁系统设计
- 1987 年 赴美国 GE 公司验收华能上安及南通电厂 350MW 汽轮发电机组及励磁设备
- 1990 年 参加原能源部组团的中国电气专家代表团访问前苏联电力试验研究部门，进行技术交流
- 1991 年 赴菲律宾工地主持水电工程励磁设备的安装及调试
- 1998 年 任清华大学同方公司发电设备部总工程师
- 1999 年 任清华大学电力系统国家实验室兼职正研究员
- 1999 年至今 承担大亚湾核电站、扬州第二发电厂及珠海发电厂大型汽轮发电机组励磁系统培训及现场技术改造任务



谨以此书献给

一代宗师——

清华大学高景德教授



序

前言

第一章 励磁控制方式的演绎与发展	1
第一节 概述	1
第二节 励磁控制方式的演绎	1
第三节 线性多变量综合控制器	10
第四节 非线性多变量励磁控制器	19
第五节 电力系统电压调节器 PSVR	19
第二章 励磁系统性能的评价	27
第一节 励磁系统的静态特性	27
第二节 励磁系统的暂态响应	30
第三章 励磁调节对电力系统稳定性的影响	34
第一节 稳定性的定义和分类	34
第二节 稳定水平的判据	35
第三节 励磁调节对电力系统稳定的影响	35
第四章 励磁系统的设计	43
第一节 励磁系统的控制特性	43
第二节 励磁系统的设计	46
第三节 励磁系统的规范	60
第四节 励磁装置与高次谐波	62
第五章 励磁系统的传递函数及数学模型	66
第一节 励磁系统的传递函数模型	66

第二节 控制装置的传递函数模型	73
第六章 三相桥式整流线路的基本特性	79
第一节 概述	79
第二节 三相桥式整流器工作原理	79
第三节 第Ⅰ种换相状态	80
第四节 换相角	85
第五节 整流电压平均值	86
第六节 整流电压瞬时值	90
第七节 元件电流有效值	91
第八节 交流电流基波及谐波值	93
第九节 整流装置的功率因数	96
第十节 第Ⅲ种换相状态	101
第十一节 第Ⅱ种换相状态	106
第十二节 整流外特性曲线	107
第十三节 三相桥式逆变线路的工作原理	109
第七章 他励静止二极管整流器励磁系统	114
第一节 交流电流的谐波分析	114
第二节 非畸变正弦电势及等效换相电抗	116
第三节 换相角 γ 与负载电阻 γ_f 及换相电抗 X_f 的关系式	120
第四节 整流电压比 β_u 和整流电流比 β_i	122
第五节 具有整流负载的交流励磁机稳态计算	124
第六节 励磁机通用外特性	127
第七节 具有整流负载的交流励磁机暂态过程	129
第八节 具有整流负载的交流励磁机暂态简化数学模型	130
第九节 发电机励磁电流小偏差变化时励磁系统的暂态过程	133
第十节 二极管整流器对发电机励磁回路时间常数的影响	136
第十一节 具有整流器负载的交流励磁机励磁电压响应	138
第十二节 交流励磁机短路电流计算	141
第十三节 交流励磁机额定参数及强励参数的计算	145
第八章 无刷励磁系统	149
第一节 无刷励磁系统的发展	149
第二节 无刷励磁机组的结构	154
第三节 无刷励磁系统的技术规范	158
第四节 无刷励磁系统的组成	160
第五节 交流励磁机的电压响应特性	163
第六节 无刷励磁系统的控制特性	165
第七节 无刷励磁系统的数学模型	169

第八节 发电机励磁参数的检测及故障报警	181
第九章 他励晶闸管整流器励磁系统	187
第一节 概述	187
第二节 他励晶闸管整流器励磁系统的特征	188
第三节 谐波电流负载对辅助发电机电磁特性的影响	192
第四节 他励晶闸管整流器励磁系统参数计算	199
第五节 具有高、低压桥式整流器的他励晶闸管励磁系统	202
第六节 高、低压桥式整流线路参数的计算	205
第七节 他励晶闸管整流器励磁系统的暂态过程	209
第十章 静止晶闸管整流器自励励磁系统	213
第一节 概述	213
第二节 自励晶闸管励磁系统的特征	216
第三节 自励晶闸管励磁系统的轴电压	227
第四节 低励限制与失磁保护的整定配合	232
第五节 励磁变压器的保护方式	233
第十一章 自动励磁调节器	238
第一节 概述	238
第二节 数字控制的理论基础	239
第三节 数字采样与信号变换	244
第四节 控制运算	247
第五节 标么值的设定	252
第六节 数字式移相触发器	252
第七节 三相全控桥式整流线路的外特性	254
第八节 数字式励磁系统的描述	257
第十二章 励磁变压器	263
第一节 概述	263
第二节 环氧干式励磁变压器的结构特征	265
第三节 环氧干式励磁变压器技术规范	269
第四节 励磁变压器的交流阻容保护	280
第十三章 功率整流柜	284
第一节 晶闸管整流元件的技术规范及基本参数	285
第二节 大容量功率整流柜的技术功能特征	289
第十四章 同步发电机的灭磁及转子过电压保护	294

第一节	概述	294
第二节	灭磁系统性能的评价	296
第三节	灭磁系统的特征	299
第四节	饱和对灭磁的影响	314
第五节	阻尼绕组回路对灭磁的影响	316
第六节	灭磁电阻的选择	319
第七节	灭磁方式的展望	322
第八节	发电机转子回路的过电压保护	324
第九节	过电压保护回路的设计原则	330
参考文献		334



励磁控制方式的演绎与发展

第一节 概 述

在现代化的电力系统中,提高和维持同步发电机运行的稳定性,是保证电力系统安全、经济运行的基本条件之一。在众多改善同步发电机稳定运行的措施中,运用现代控制理论、提高励磁系统的控制性能是公认的经济而有效的手段之一。

自 50 年代以来,随着时代的进展,不论是在控制理论还是在电子器件的研制和实际应用方面,均取得长足的进展,这些成果进一步促进了励磁控制技术的发展。

在本章中将对半个世纪以来不同历史时期励磁控制技术的演绎作一简要的阐述。但是在论述上,将不会过多的引用数学逻辑上的推导,而是以国内学术界认同的主要论断为依据,从中引伸出有益的结论。

第二节 励磁控制方式的演绎

在 50 年代初期,自动电压调节器的主要功能是维持发电机电压为给定值。当时应用的电压调节器多为机械型的,其后又发展为电子型或者电磁型。

在 50 年代后期,随着电力系统的大型化和发电机单机容量的增长,出于提高电力系统稳定性的考虑,自动电压调节器的功能已不再局限于维持发电机电压恒定这一要求上,而更多地体现在提高发电机的静态及动态稳定性方面。这标志着对励磁调节器的功能要求已有了根本的转变。

在 50 年代期间,有一点须说明的是关于强行励磁的作用问题。当时有一种观点认为,在系统事故时,应当限制强励的作用,以防止发电机定子电流过载。但是,前苏联的学者经过试验及实践表明:采用强行励磁可加速切除系统事故后电压的恢复,并可缩短定子电流过负载的时间,这对于缩短事故后系统电压的恢复时间及系统稳定性都是极为有利的。

自 50 年代至今,励磁控制技术也有了极大的发展。概括地说,励磁控制方式的演绎大致经历了单变量输入及输出的比例控制方式、线性多变量输入及输出的多变量反馈控制

方式以及伴随控制理论发展起来的非线性多变量控制方式等几种主要的演绎阶段，现分述如下。

一、基于古典控制理论的单变量控制方式^[1]

在 50 年代初期，随着电力及电子技术的进展，电力系统对发电机励磁系统的控制功能也不断地提出新的要求，主要体现在对自动励磁调节器的功能要求上，已由维持发电机端电压恒定的目标扩展到提高发电机运行静态稳定极限的要求上。在这一历史时期中，发电机多采用直流励磁机励磁方式，励磁的调节多作用在直流励磁机励磁绕组侧，须经过具有相当惯性的励磁机功率环节实现对发电机励磁的调节。为此它属于慢速励磁调节系统。这一时期，在励磁控制方面，主要采用了下列几种励磁调节方式：

- 1) 按发电机端电压偏差进行比例调节励磁的比例式励磁调节方式；
- 2) 按发电机定子电流作为扰动量进行补偿的复式励磁补偿调节方式；
- 3) 按发电机端电压和定子电流及功率因数角等信号进行综合相位补偿控制的相补偿式励磁调节方式。由于当时以直流励磁机励磁方式为主，为此，励磁调节器多由磁性元件组成并基本上满足了运行方式的要求。

在这一时期中，前苏联的学者在电力系统稳定性研究方面取得了许多重要的成果。例如，早在 50 年代，前苏联学者 C.A. 列别节也夫、M.M. 波特维尼克等在进行电力系统稳定研究工作中首次提出了同步发电机运行在人工稳定区的概念，指出只要在自动励磁调节器具有无失灵区的作用性能条件下，即使是在简单的按发电机电压偏差反馈调节控制规律作用下，亦可使发电机稳定扩展地运行到转子功率角 $\delta > 90^\circ$ 的区域中。由于在无励磁调节时，发电机运行的功角极限值 $\delta = 90^\circ$ ，为区别于此，称角 $\delta > 90^\circ$ 的扩展运行区为“人工稳定区”。

在励磁控制规律方面，这一时期的励磁调节器多属于按发电机电压偏差进行负反馈控制的比例式调节，或者按发电机电压偏差的比例、积分、微分进行控制的所谓 PID 调节方式。

1. 比例控制方式

按比例控制方式的传递函数表达式为：

$$\frac{u}{\Delta U_i} = K_p \quad (1-1)$$

其中

$$\Delta U_i = U_{\text{ref}} - U_i(t)$$

上两式中 u ——输出量；

ΔU_i ——输入量；

K_p ——比例系数；

U_{ref} ——参考电压；

$U_i(t)$ ——发电机端电压实时三相有效值的平均值。

按发电机电压偏差的比例、积分、微分调节，即按 PID 调节的传递函数表达式为：

$$\frac{u}{\Delta U_i} = (K_P + K_D s) \frac{1}{1 + K_I s} \quad (1-2)$$

式中 K_P 、 K_D 、 K_I ——分别为比例、积分、微分调节系数。

对应于式 (1-1) 和式 (1-2) 的闭环系统传递函数方框图如图 1-1 和图 1-2 所示。

现对图 1-2 所示的 PID 控制方式的物理概念作进一步的阐述, 由式 (1-2) 可知, PID 控制方式的传递函数由比例环节 K_P 与微分环节 $K_D s$ 之和再与惯性环节 $\frac{1}{1 + K_I s}$ 串联所组成。如果惯性环节的时间常数足够大, 亦即 $K_I s \gg 1$, 数值 1 可忽略, 此时的惯性环节将近似于一个积分环节 $\frac{1}{K_I s}$ 。由此, 可将这种控制方式称为按发电机电压偏差调节的比例、积分、微分调节, 即 PID 控制系统。

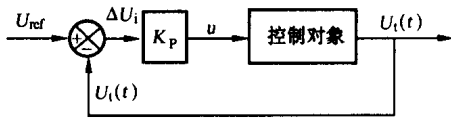


图 1-1 单参量比例调节控制方式传递函数方框图

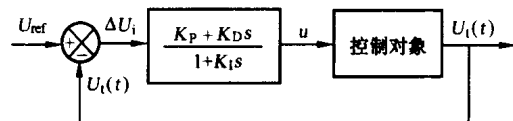


图 1-2 PID 调节控制方式传递函数方框图

下面将讨论如图 1-3 所示的单参量输入和输出的 PID 控制系统的性能特征。

在图 1-3 中 $X_R(s)$ 、 $Y(s)$ 和 $E(s)$ 分别表示输入量 $X_R(t)$ 、输出量 $y(t)$ 和调节误差 $e(t)$ 的拉氏变换函数, K_P 、 $G(s)$ 表示前向通道的传递函数, $H(s)$ 为反馈通道的传递函数。

根据古典调节原理可知: 对于图 1-3 所示的闭环控制系统, 随着增益 K_P 的增加, 闭环系统特征方程式的主导根将向复平面的右方移动, 当增益 K_P 超过其临界值 K_c 时, 在复平面的右半部将出现一对闭环系统的特征根, 此时闭环系统将是不稳定的系统, 系统的动态响应将呈现增幅的振荡。因此, 必须将比例调节系统的增益 K_P 限制在 $K_P < K_c$ 的范围内, 以保证系统的稳定性。此时, 如只采用按发电机电压偏差控制方式, 对于远距离输电系统, 发电机与系统的电联系愈弱, 临界增益 K_c 允许值也愈小, 一般在 5~20 之间。

但是, 对励磁系统性能的要求不仅表现在维持调节系统的稳定性方面, 还有对调节精度的要求。对于如图 1-3 所示的闭环系统, 其静态误差为:

$$\epsilon(\infty) = \lim_{t \rightarrow \infty} e(t)$$

根据我国有关标准规定, 发电机端电压调节的静态误差 $\epsilon(\infty)$ 不应大于 0.5%。

对于图 1-3 所示的系统, 其闭环传递函数为:

$$\frac{Y(s)}{X_R(s)} = \frac{K_P G(s)}{1 + K_P H(s) G(s)} \quad (1-3)$$

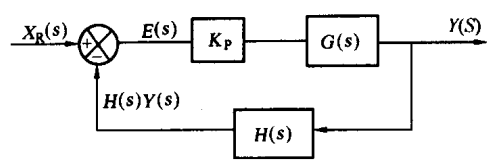


图 1-3 单变量输入和输出的闭环调节系统

静态误差 $\epsilon(t)$ 与输入量 $X_R(t)$ 之间的传递函数为:

$$\frac{E(s)}{X_R(s)} = \frac{X_R(s) - H(s)Y(s)}{X_R(s)} = \frac{1}{1 + K_P H(s) G(s)} \quad (1-4)$$

由式 (1-4) 可求得:

$$E(s) = \frac{1}{1 + K_P H(s) G(s)} X_R(s) \quad (1-5)$$

设输入量 $x_R(t)$ 为单位阶跃函数, 其拉氏变换函数为 $X_R(s) = \frac{1}{s}$ 。此时, 对于图 1-3 所示的闭环调节系统, 在单位阶跃函数作用下的静态误差拉氏变换表达式为:

$$E(s) = \frac{1}{1 + K_P H(s) G(s)} \times \frac{1}{s} \quad (1-6)$$

依据调节原理中的终值定理可知, 上式静态误差的稳态值为:

$$e(\infty) = \lim_{t \rightarrow \infty} e(t) = \lim_{s \rightarrow 0} s E(s)$$

将式 (1-6) 代入上式, 并将 $H(s)G(s)$ 写为关于 s 的多项式形式:

$$e(\infty) \lim_{s \rightarrow 0} \frac{1}{1 + K_P \frac{b_m s^m + \dots + b_1 s + 1}{a_n s^n + \dots + a_1 s + 1}} = \frac{1}{1 + K_P} \quad (1-7)$$

由上式可知, 对于一个单变量输入和输出的闭环调节系统, 在单位阶跃函数作用下, 其静态误差 $e(\infty)$ 约等于闭环增益 K_P 的倒数, 因在一般情况下 $K_P \gg 1$, 依此可得:

$$e(\infty) \approx \frac{1}{K_P}$$

由上式可得出结论, 为在单位阶跃函数作用下保持发电机电压的静态误差小于 0.5%, 励磁系统的开环增益 K_P 应不小于 200。但是在比例式励磁控制方式中, 过大的开环增益会导致励磁系统工作的不稳定, 为此, 在选择增益 K_P 时应兼顾两者的要求。

2. PID 控制方式

为了兼顾与协调静态误差与保证系统暂态稳定性两方面的要求, 可改变励磁调节器传递函数的结构, 将励磁调节器的增益分为两部分, 一部分为无时滞的暂态增益 K_D , 另一部分为有时滞的稳态增益 K_S , 相应的励磁调节器传递函数方框图如图 1-4 (a) 所示, 图 1-4 (b) 为等效简化方框图。

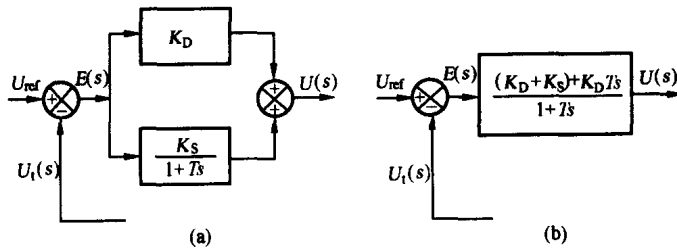


图 1-4 励磁调节器的静态及暂态增益传递函数方框图

(a) 传递函数方框图; (b) 等效传递函数

假如在 $t = 0^+$ 瞬间在系统输入端加入一单位阶跃函数 $E(s) = \frac{1}{s}$, 此时, 由初值定理可知控制端的暂态输出量为:

$$\begin{aligned} u(0^+) &= \lim_{t \rightarrow 0^+} u(t) = \lim_{s \rightarrow \infty} s U(s) = \lim_{s \rightarrow \infty} \left[s \frac{(K_D + K_P) + K_D Ts}{1 + Ts} \times \frac{1}{s} \right] \\ &= \lim_{s \rightarrow \infty} \frac{(K_D + K_P) + K_D Ts}{1 + Ts} = K_D \end{aligned} \quad (1-8)$$

同时,由终值定理可知,对于单位阶跃输出 $E(s) = \frac{1}{s}$,在稳态时的控制输出量为:

$$u(\infty) = \lim_{t \rightarrow \infty} u(t) = \lim_{s \rightarrow 0} sU(s) = \lim_{s \rightarrow 0} \left[s \frac{(K_D + K_s) + K_D Ts}{1 + Ts} \times \frac{1}{s} \right] = K_D + K_P \quad (1-9)$$

由式(1-9)可知,如将励磁调节器的增益分为稳态及暂态两个部分,则在过渡过程开始瞬间,其暂态增益相当于增益为 K_D 的比例调节;而对于稳态而言,其稳态增益相当于 $K_D + K_s$ 的比例调节。

由此利用暂态增益降低的作用,可兼顾到调节精度与稳定性之间的协调。按比例积分微分控制规律进行调节的 PID 式励磁调节器,其基本作用即在于此。

应强调指出的是,自 50 年代至今,大部分单变量励磁调节器的控制规律仍是按古典调节原理在 s 频率域对励磁系统的性能进行分析的。在线性化小偏差条件下,励磁控制规律可按发电机电压偏差,或比例积分微分规律进行调节,根据励磁系统传递函数的频率特性,给出波特(Bode)图,依此求出励磁系统的幅频及相频裕度,并选择相应的校正措施。

由励磁系统的开环特性确定发电机励磁系统的空载稳定性和由励磁系统的闭环特性确定电力系统稳定器的参数是应用至今的古典调节原理基本分析方法。

应重点说明的是,在 50 年代,随着高起始快速励磁系统的应用,发生了所谓动态稳定问题,即在大事故扰动后系统恢复到原运行方式时,应用快速励磁系统在转子第一摆期间内有助于转子摇摆的制动,但是在以后的动态稳定过程中,在特定情况下采用快速励磁系统会引起转子摇摆期间的延长、功角振荡的增大,甚至引起振荡失步。

对此,前苏联的学者认识到,为抑制这种功率振荡失步,应在励磁调节器的控制规律中附加与发电机功率有关的附加量,以提高发电机在运行中的暂态稳定性。

在 50 年代期间,前苏联所研制的所谓“强力式励磁调节”即是基于上述基本思路而研制的多参量调节器。但是,由于测量发电机转子功率角较为困难,因而采用与功角 δ 作用近似量取代功角 δ 信号。在强力式励磁调节器中的信号包括发电机电压偏差、电压导数、频率偏差、频率导数以及发电机转子电流等参量。在小偏差扰动条件下,采用强力式调节器可使系统稳定功率极限比采用比例式励磁调节器时高 10% ~ 12%。由此可以看出,前苏联所研制的强力式励磁调节器,虽然仍应用古典调节理论进行励磁调节器的参数整定,但是应用了所谓 D 域划分的方法,可在一个 s 频率平面上研究两个参量之间的关系,这样可分别求出各个参量 ΔU 、 Δf 、 f' 等的共同稳定域,实现了多参量参数的整定,但是这种方法过于复杂,当系统结构参数变化时,修改整定参数比较复杂,为此,未在国际上获得应用。由于在前苏联的强力式励磁调节器中,主要采用了电压偏差量及微分量 ΔU 和 U' 作为调节信号,并引入了转子电压软负反馈量 $\Delta U'_f$ 用以降低暂态增益,并保持较高的稳态增益。此外,还应用了频率偏差量及微分量 Δf 和 f' 作为功率阻尼信号。为此,就本质而言,前苏联的强力式励磁调节器相当于一个附有稳定功率信号 Δf 的 PID 励磁调节器。

其后,在 60 年代中期,由于快速励磁系统的普遍应用,在一些大型输电系统中频繁地出现了低频功率振荡以及在大扰动事故后动态稳定恢复过程中的振荡失步的情况。对