



电力科技专著出版资金资助项目

现代同步发电机 励磁系统设计与应用

(第二版)

Design & Application of
Modern Synchronous Generator
Excitation
System

李基成 编著



中国电力出版社
www.cepp.com.cn



现代同步发电机 励磁系统设计与应用

(第二版)

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

本书结合现代励磁控制技术的最新进展,系统和完整地介绍了同步发电机励磁系统在设计及应用中存在的 key 技术问题。包括对三相桥式整流线路、他励静止二极管整流器励磁系统、无刷励磁系统以及静态自励励磁系统性能特征的描述。

在涉及到水轮发电机励磁系统的内容中,除介绍了三峡水电厂 700MW 水轮发电机组励磁方式外,还对抽水蓄能机组励磁系统以及变频启动功能做了相关的介绍。在汽轮发电机励磁系统章节中,则对 600MW、1000MW 机组励磁系统的特征做了详细的描述。另在本书部分内容中,还对核电机组励磁系统进行了广泛地讨论。

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. —2 版. —北京:中国电力出版社,2009
ISBN 978-7-5083-8276-0

I. 现… II. 李… III. 同步发电机-励磁系统
IV. TM341.033

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2008)第 205908 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)

北京盛通印刷股份有限公司印刷

各地新华书店经售

*

2002 年 7 月第一版

2009 年 3 月第二版 2009 年 3 月北京第三次印刷

787 毫米×1092 毫米 16 开本 35.25 印张 862 千字

印数 6001—9000 册 定价 88.00 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

作为列入电力科技专著出版基金项目的重点著作,《现代同步发电机励磁系统设计及应用》(第二版)在 2009 年初终于问世了,这本著作是我国励磁资深专家李基成教授继《自动调整励磁装置》(1958 年),《现代同步发电机整流器励磁系统》(1987 年),《现代同步发电机励磁系统设计及应用》(2002 年第一版)三本励磁专著出版后,最新推出的又一精心构思的新作。

现出版的第四本励磁专著是著者在总结了 55 年来励磁工程实践的基础上,以新颖的思路、开拓的视野,从全新的设计理念出发,探讨了当前在励磁系统及参数选择方面一些前沿性的关键技术问题。

全书在取材方面具有鲜明的特点。

一、全书内容丰富,覆盖面广

对励磁系统作了系统和完整的论述,例如在涉及水轮发电机励磁系统方面,书中以三峡水电厂 700MW 大型水轮发电机组励磁系统为实例,探讨了水轮发电机组励磁系统的性能特征外,还论述了抽水蓄能机组励磁系统的功能特点以及变频启动系统(SFC)的工作原理与启动流程。

在汽轮发电机励磁系统章节中,以介绍传统 600MW, 1000MW 机组励磁系统性能特征为主线,分述了励磁系统中的励磁变压器、功率整流柜、灭磁装置、自动励磁调节器的构成外,还重点对 1000MW 核电机组励磁系统的性能特征做了深入地探讨与说明。

就内容而言,水电机组含常规、抽水蓄能机组及变频启动;火电机组含常规及核电机组励磁系统,为此本书是迄今为止最系统和完整的一部论述励磁系统的专著。

二、工程论述与基础理论密切相结合

本书在论述章节的安排上,较好的解决了专题论述与基础理论的配合,例如书中列入了与励磁系统分析密切相关的同步发电机的基础理论,与功率整流柜性能分析相关的对三相桥式整流线路的论述,对读者深入掌握系统总体功能起到了良好的辅导作用。

三、与其他学科相交融

在以励磁系统论述为中心的基础上,本书注重与其他相关学科的交融,在科技著作中这是一个创新的写作方式,例如在水电励磁系统章节中列入了抽水蓄能机组的励磁方式,进而拓展到变频启动;在发电机低励磁限制论述中,跨学科的交叉到失磁继电保护领域,有机地将两者纳入一体。使读者拓宽了视野,并在更深层次上洞悉其全貌。

四、论述内容紧密与时代前沿技术的发展相平行

在学术观点上也有诸多创新之点,例如在关于自励励磁系统励磁变压器二次额定电压的选择上,著者提出了大系统的统一优化理念,即在选择励磁顶值电压倍数时不应仅以满足电力系统稳定一种需要,而且要兼顾到对励磁系统其他参数选择,如对整流桥尖峰过电压 $R-C$ 阻容缓冲器参数,对电力系统稳定器 PSS 整定范围以及发电机空载误强励转子电流增长等的影响,从优化大系统性能角度,求得全局的良好结果。

在灭磁理念的论述中,从中可以看出著者探索设计理念的途径,从遵循传统灭磁理念到对传统理念的修正以及提出全新的安匝平衡灭磁新理念。

多年来,著者勤于笔耕、不断创新、勇于进取的敬业精神一直为业界所敬重。在写作风格上,著者也独树一帜,以明确的思路、全新的视野、清晰的逻辑、精炼的语言来贯穿;在取材上更是与时俱进,紧密与时代的需求相结合。正是如此,在过去的半个世纪以来,每当著者的一部新的励磁专著问世,均对同时期的励磁技术的发展起到了有力的推动作用,为业界所称颂。

现今,第四本励磁专著《现代同步发电机励磁系统设计及应用》(第二版)的发行,无论就论述内容或者是写作深度而言,无疑地可堪称为励磁专业具有经典性的世纪代表之作,深信本书的问世必将对我国励磁控制技术的发展、加速励磁国产化的进程和对这一领域的人才培养起到有力的推动作用。

中科院院士
清华大学教授 卢强

《现代同步发电机励磁系统设计及应用》(第二版)终于问世了,这是在我逾半个世纪的励磁专业生涯中出版的第四本励磁专著,前三本励磁专著分别是《自动调整励磁装置》(1958年,水利电力出版社),《现代同步发电机整流器励磁系统》(1987年,水利电力出版社),《现代同步发电机励磁系统设计及应用》(2002年第一版,中国电力出版社),这些出版在不同年代的励磁专著,每一部背后都有一些由不同时代背景所编织的不同故事,但是有一点是共同的,由于这些书的写作是密切与时代发展需求相结合的,为此普遍受到了当前励磁同仁的赞许与认同。例如《自动调整励磁装置》是中国发行的第一本励磁专著,对电磁式励磁调节器有详细的描述,为此成为电站调试人员人手一册必备的励磁专著。

第二本励磁专著《现代同步发电机整流器励磁系统》签约于1968年,出版于1987年,先后历时近20年,其间先后易稿4次,其艰辛非笔墨所能形容,但是出版后由于改革开放政策的引导,本书同样地受到业界的好评。

第三本励磁专著《现代同步发电机励磁系统设计及应用》出版后受欢迎的程度超过我的预想,不仅在国内励磁专业厂家首选为设计指导及人员培训基本参考资料,而且在外企厂家中也成为专业人员必选读物。

在第四本励磁专著创作立意时,考虑基于多年来在大型火电机组方面担任过扬州第二发电厂西屋公司600MW机组、珠海电厂240MW机组励磁系统的现场调试及人员培训工作;在核电方面担任过大亚湾核电站法国1000MW核电机组及田湾核电站俄罗斯1000MW核电机组励磁系统调试及人员培训工作;在水电机组励磁系统的实践方面,特别是在2002年在三峡水电厂担任励磁系统首席技术顾问工作并亲身参加了中国首台700MW机组励磁系统的启动及调试工作;在水电机组方面,参与了一些抽水蓄能机组励磁系统的培训工作。在上述基础上,我萌生了新的一个思路,写一本水电机组励磁系统包括抽水蓄能机组励磁系统,而抽水蓄能机组的论述又跨专业的列入变频启动部分,火电机组励磁系统论述方面包括常规及核电机组。

这种写法改变了过去由于受专业的限制,将本来是一个完整的系统分解到

不同专业的著作中，使读者难以形成完整的概念，本书创作的基点即在于此。

在本书出版之际，衷心的感谢中科院院士，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，及多年来卢强教授在多方面给予的无微不至的关怀与支持。

本书的出版也是对早逝的原清华大学高景德校长的缅怀，先生一生高风亮节，大器无华，治学严谨，诲人不倦，恩师的教导我终生铭记在心中。

编著者 李基成

2009年3月

序言

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	9
第四节 非线性多变量励磁控制器	17
第五节 电力系统电压调节器 PSVR	20
第二章 同步发电机的基本特性	28
第一节 同步发电机电势相量图	28
第二节 同步发电机的电磁功率与功角特性	31
第三节 同步发电机运行容量特性曲线	33
第四节 外接电抗对运行容量特性曲线的影响	36
第五节 发电机运行特性曲线	41
第六节 同步发电机的暂态特性	44
第三章 励磁调节对电力系统稳定性的影响	53
第一节 稳定性的定义和分类	53
第二节 稳定水平的判据	54
第三节 励磁调节对电力系统稳定的影响	54
第四章 励磁系统的静态及暂态特性	61
第一节 励磁系统的静态特性	61
第二节 发电机的电压调差及电压调差系数	64
第三节 励磁系统的暂态特性	68
第四节 励磁系统的稳定性分析	73
第五章 励磁系统的控制规律及数学模型	75
第一节 励磁系统的基本控制规律	75
第二节 励磁系统的数学模型	84
第三节 励磁控制单元的数学模型	91

第四节	励磁系统参数的设定	95
第六章	三相桥式整流线路的基本特性	107
第一节	概述	107
第二节	三相桥式整流器工作原理	107
第三节	第Ⅰ种换相状态	108
第四节	换相角	112
第五节	整流电压平均值	113
第六节	整流电压瞬时值	117
第七节	元件电流有效值	118
第八节	交流电流基波及谐波值	120
第九节	整流装置的功率因数	123
第十节	第Ⅲ种换相状态	128
第十一节	第Ⅱ种换相状态	132
第十二节	整流外特性曲线	133
第十三节	三相桥式逆变线路的工作原理	134
第七章	他励静止二极管整流器励磁系统	139
第一节	交流电流的谐波分析	139
第二节	非畸变正弦电势及等效换相电抗	141
第三节	换相角 γ 与负载电阻 γ_f 及换相电抗 X_γ 的关系式	144
第四节	整流电压比 β_u 和整流电流比 β_i	146
第五节	具有整流负载的交流励磁机稳态计算	148
第六节	励磁机通用外特性	150
第七节	具有整流负载的交流励磁机暂态过程	152
第八节	具有整流负载的交流励磁机暂态简化数学模型	154
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	156
第十节	二极管整流器对发电机励磁回路时间常数的影响	159
第十一节	具有整流器负载的交流励磁机励磁电压响应	160
第十二节	交流励磁机短路电流计算	163
第十三节	交流励磁机额定参数及强励参数的计算	167
第八章	无刷励磁系统	170
第一节	无刷励磁系统的发展	170
第二节	无刷励磁系统的技术规范	174
第三节	无刷励磁系统的组成	176
第四节	交流励磁机的电压响应特性	179
第五节	无刷励磁系统的控制特性	181
第六节	无刷励磁系统的数学模型	185
第七节	发电机励磁参数的检测及故障报警	196

第九章 他励晶闸管整流器励磁系统	203
第一节 概述	203
第二节 他励晶闸管整流器励磁系统的特征	203
第三节 谐波电流负载对辅助发电机电磁特性的影响	208
第四节 他励晶闸管整流器励磁系统参数计算	214
第五节 具有高、低压桥式整流器的他励晶闸管励磁系统	218
第六节 高、低压桥式整流线路参数的计算	220
第七节 他励晶闸管整流器励磁系统的暂态过程	224
第十章 静止晶闸管整流器自励励磁系统	228
第一节 概述	228
第二节 静止晶闸管自动励磁系统的特征	230
第三节 自励晶闸管励磁系统的轴电压	244
第四节 低励限制与失磁保护的整定配合	248
第十一章 自动励磁调节器	251
第一节 概述	251
第二节 数字控制的理论基础	252
第三节 数字采样与信号变换	257
第四节 控制运算	259
第五节 标么值的设定	264
第六节 数字式移相触发器	264
第七节 三相全控桥式整流线路的外特性	266
第八节 数字式励磁系统的描述	268
第十二章 励磁变压器	274
第一节 概述	274
第二节 树脂浇注干式励磁变压器的结构特征	276
第三节 树脂浇注干式励磁变压器的应用特征	277
第四节 树脂浇注干式变压器技术规范	277
第十三章 功率整流柜	298
第一节 晶闸管整流元件的技术规范及基本参数	298
第二节 功率整流柜的基本参数计算	303
第三节 大容量功率整流柜的冷却方式	307
第四节 功率整流柜的均流	312
第五节 功率整流柜的保护	314
第六节 晶闸管的故障损坏	325
第七节 功率整流柜的并联运行容量	327
第八节 双桥功率整流柜并联运行的不确定性	331

第九节	功率整流柜的五极隔离开关	332
第十四章	同步发电机灭磁及转子过电压保护	334
第一节	概述	334
第二节	灭磁系统性能的评价	336
第三节	灭磁系统的性能特征	338
第四节	饱和对灭磁的影响	360
第五节	阻尼绕组回路对灭磁的影响	362
第六节	灭磁系统设计新理念	365
第七节	灭磁系统仿真计算	372
第八节	发电机转子回路的过电压保护	377
第九节	过电压保护回路的设计原则	382
第十五章	水轮发电机组励磁系统的特征	385
第一节	概述	385
第二节	大型水轮发电机组励磁系统参数选择	385
第三节	静止晶闸管自励励磁系统的应用实例	389
第四节	三峡水轮发电机组低励限制与失磁保护的配合	401
第五节	水轮发电机的电气制动	408
第六节	抽水蓄能水电站电气制动的应用实例	412
第十六章	可逆式抽水蓄能机组励磁控制及启动系统的功能特征	415
第一节	概述	415
第二节	抽水蓄能机组的运行方式与励磁控制	415
第三节	抽水蓄能机组励磁系统的应用实例	418
第四节	静止变频器 SFC 的工作原理	432
第五节	静止变频器 SFC 电流和转速双闭环控制系统	448
第六节	变频启动电流谐波分量对电站及电力系统的影响	449
第七节	抽水蓄能机组 LCU 控制程序	453
第八节	抽水蓄能机组调相运行方式	455
第九节	抽水蓄能机组的灭磁系统	456
第十节	抽水蓄能机组的电气制动	458
第十一节	抽水蓄能机组的轴电流保护	460
第十二节	抽水蓄能机组 PSS 的应用特征	462
第十七章	1000MW 汽轮发电机组励磁系统的性能特征	464
第一节	概述	464
第二节	1000MW 级汽轮发电机励磁方式的选择	468
第三节	自励励磁系统的组成	476
第四节	1000MW 汽轮发电机自励励磁系统应用实例	479

第五节 1000MW 汽轮发电机无刷励磁系统应用实例	487
第十八章 核电汽轮发电机组励磁系统的特征	496
第一节 核电汽轮发电机组励磁系统的选择	496
第二节 核电机组他励无刷励磁系统	496
第三节 核电机组自励无刷励磁系统	518
参考文献	542
跋	545

第一章

现代同步发电机励磁系统设计及应用

(第二版)

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 20 世纪 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,从中拓展出有益的结论。



第二节 励磁控制方式的演绎

在 20 世纪 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 20 世纪 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 20 世纪 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均是极为有利的。

自 20 世纪 50 年代至今,励磁控制技术取得了极大的进展。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 20 世纪 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,需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 20 世纪 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负反馈调节控制规律作用下,亦可使发电机稳定运行区扩展到转子功率角 $\delta > 90^\circ$ 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,称功角 $\delta > 90^\circ$ 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

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

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;

$U_t(t)$ ——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_I 、 K_D ——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。

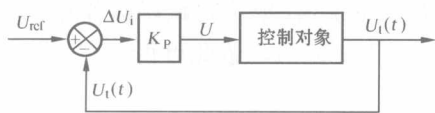


图 1-1 单变量比例调节控制方式传递函数方框图

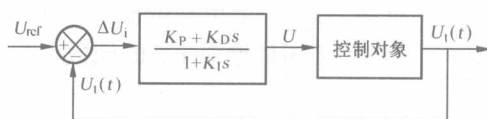


图 1-2 PID 调节控制方式传递函数方框图

下面将讨论如图 1-3 所示的单变量输入和输出的 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

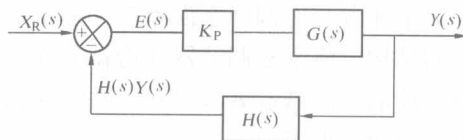


图 1-3 单变量输入和输出的闭环调节系统

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:

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

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 的多项式形式为:

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

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。

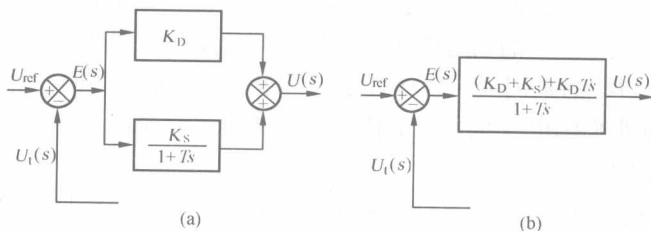


图 1-4 励磁调节器的静态及暂态增益传递函数方框图

(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:

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

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 20 世纪 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20世纪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,即在重大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20世纪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 $\Delta U'_r$ 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。对此,美国学者F. D. 迪米洛(Demello)和C. 康柯迪亚(Concordia)首先从分析低频振荡发生的机理入手,探讨了在采用快速励磁系统以及特定电力系统参数条件下造成动态稳定性恶化的原因。他们利用R. A. 菲利普斯和W. G. 埃弗伦提出的建立在线性化小偏差理论基础上的数学模型,经分析得出结论,认为单机—无限大系统的正阻尼转矩恶化的主要原因是由于励磁系统和发电机励磁绕组的滞后特性所致。

在正常运行条件下,以发电机端电压 ΔU_t 为负反馈量的发电机闭环励磁调节系统是稳定的。由图1-5可看出, ΔU_t 与 $\Delta E'_q$ 两相量之间存在一定的相位滞后,滞后的相位与频率有关。因此,当转子功率角发生振荡时, $\Delta E'_q$ 滞后于 ΔU_t ,即励磁系统提供的励磁电流的相位滞后于转子功率角。在某一频率下,当滞后角度达到180°时,原来的负反馈变为正反馈,励磁电流的变化进一步导致转子功率角的振荡,即产生了所谓的“负阻尼”。

如果励磁系统采用PID控制方式,以发电机电压偏差信号进行调节励磁,有助于改善发电机电压的动态和静态稳定性。同时,向励磁系统提供的超前相位输出会在一定程度上补偿励磁电流的滞后相位和负的阻尼转矩。但是PID调节主要是针对电压偏差信号而设计的,它所产生的超前相位频率未必与低频振荡频率同相,亦即未必能满足补偿负阻尼所需的相位。此外,在PID调节系统中为了控制电压,必须连续地对电压偏差进行调节,因此无法