

同步发电机 微机励磁控制

陆继明 毛承雄 编著
范澍 王丹



中国电力出版社
www.cepp.com.cn

同步发电机 微机励磁控制

陆继明 毛承雄 编著
范澍 王丹



中国电力出版社
www.cepp.com.cn

内 容 提 要

本书系统介绍了同步发电机微机励磁控制的基本理论,其中重点介绍了线性最优励磁控制理论和自适应励磁控制理论;详细介绍了微机励磁调节器的硬件结构、软件设计、控制算法实现、可靠性设计、动模试验、现场试验以及运行维护等方面的基本知识和应用技术;最后对发电机交流励磁控制系统进行了介绍。本书力求理论与实践相结合,注重实用性。

本书可作为高校相关专业的教师和研究生科研和教学参考用书,以及从事励磁系统设计、试验、运行、维护和检修等专业技术人员的自学和技术培训教材,也可供励磁研发人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

同步发电机微机励磁控制/陆继明等编著. —北京:中国电力出版社, 2005

ISBN 7-5083-3587-2

I. 同… II. 陆… III. 同步发电机—励磁系统
IV. TM341

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2005) 第 099888 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>)

北京丰源印刷厂印刷

各地新华书店经售

*

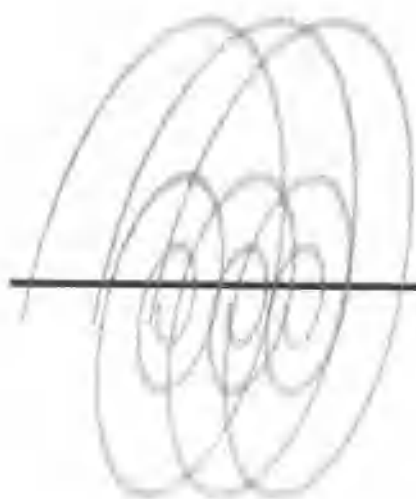
2006 年 1 月第一版 2006 年 1 月北京第一次印刷

787 毫米×1092 毫米 16 开本 18 印张 442 千字

印数 0001—3000 册 定价 29.00 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)



序

现代电力系统的发展,对同步发电机励磁控制提出了更高要求。从上个世纪 50 年代以来,广大科技工作者一直致力于同步发电机励磁控制系统的理论和应用研究,并取得了丰硕成果。单就励磁控制理论而言,已从最初的基于经典控制理论的单参量偏差励磁调节发展为多参量偏差、微分、积分综合励磁调节和基于现代控制理论的线性多变量最优励磁控制、非线性最优励磁控制以及自适应最优励磁控制等等。这一方面得益于控制理论的发展,另一方面则离不开微机技术的飞速发展和推广。

随着数字控制技术、计算机技术及微电子技术的飞速发展和日趋成熟,励磁控制已实现从原有的模拟式向数字式的转变。目前,数字化的微机励磁控制器已在同步发电机中普遍采用。

但遗憾的是,到目前为止,比较系统和全面地论述微机励磁控制理论及实现的专著较少。而另一方面,从事设计、试验、运行的励磁工作者又迫切要求进一步了解微机励磁控制原理及应用技术,以便正确地选择、调试、运行和维护微机励磁调节器。《同步发电机微机励磁控制》一书的问世,正好在一定程度上弥补了这一缺憾。

本书作者十几年来一直从事同步发电机微机励磁控制方面的研究和设计工作,既取得了丰富的理论成果,又积累了大量的实践经验。因此,本书具有如下特色:一方面比较系统地介绍了励磁控制的原理和基本理论,另一方面又全面介绍了微机励磁控制器的硬件和软件实现,尤其是重点阐述了励磁控制理论如何在微机励磁控制器中实现,充分体现了理论紧密联系实际;全书既回顾了励磁控制中的经典理论和成就,又突出了励磁控制理论和技术的新成就,内容丰富,重点突出,层次清晰,使读者比较容易全面了解同步发电机微机励磁控制系统。相信本书的出版必将会对我国励磁控制技术的发展起到促进作用。

马国农

2005 年 4 月



前 言

近年来,随着同步发电机微机励磁控制技术的普及应用,对于从事微机励磁控制系统研究、设计、试验、运行、维护和检修等广大励磁工作者来说,迫切希望进一步深入系统地了解 and 掌握微机励磁控制系统的理论、硬件系统、软件系统及其运行、调试和维护方面的知识。为此,我们将课题组多年来从事微机励磁控制技术的理论研究和实际开发方面的研究成果加以认真总结和归纳,并结合我们近年来举办的面向全国微机励磁控制技术学习班培训教材,编写成这本《同步发电机微机励磁控制》。

该书系统介绍了微机励磁控制的基本理论,其中重点介绍了线性最优励磁控制理论和自适应励磁控制理论;详细介绍了微机励磁控制器的硬件结构、软件设计、控制算法实现、可靠性设计、动模试验、现场试验以及运行维护等方面的基本知识和应用技术;最后对发电机交流励磁控制系统进行了介绍。该书力求理论与实践相结合,注重实用性。希望能够对我国同步发电机微机励磁控制技术的发展与普及贡献一份力量。

本书共分十一章,其中第一、二、六、十一章由毛承雄、范澍、王丹编写,第三、四章由王丹、陆继明编写,第五、七、八、九、十章由陆继明、毛承雄编写。全书由陆继明、毛承雄统稿。

感谢东方电机股份公司马国农教授级高工对本书全部内容进行了审阅并为本书写序。

在本书编写过程中,华中科技大学樊俊教授、涂光瑜教授和中国长江三峡开发总公司胡国庆高级工程师提出了很多宝贵意见;课题组博士生余翔、胡兆庆和硕士生姜巍青、万毅、曹解围、张俊峰、何雄开等做了大量具体工作;书中还参考了同行们的一些研究成果,在此一并表示感谢。还要感谢上海交通大学陈陈教授、东方电机股份公司马国农教授级高工、华中科技大学涂光瑜教授和浙江电力试验研究院竺士章教授级高工在本书出版立项过程中的积极推荐。

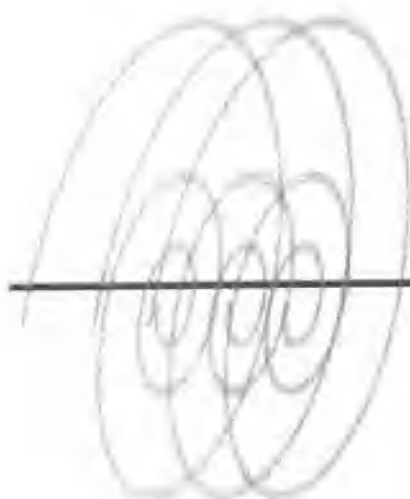
受作者水平所限,错漏之处敬请读者斧正!

作 者

2005 年 4 月

本书英文缩写列表

A/D, ADC	Analog to Digital Converter 模数转换器	LOEC	Linear Optimal Excitation Control/ Controller
AOC	Adaptive Optimal Control 自适应最优控制	LSB	Least Significant Bit 最低有效位
AOEC	Adaptive Optimal Excitation Control/ Controller 自适应最优励磁控制/控制器	NNOEC	Neural Network Optimal Excitation Control/Controller 神经网络最优励磁控制/控制器
AOPSS	Adaptive Optimal Power System Sta- bilizer 自适应最优电力系统稳定器	PD	Proportional-Differential 比例微分
AVR	Automatic Voltage Regulator 自动电压调节器	PI	Proportional-Integral 比例积分
D/A, DAC	Digital to Analog Converter 数模转换器	PID	Proportional-Integral-Differential 比例积分微分
DAOEC	Double-loop Adaptive Optimal Exci- tation Control/Controller 双环自适应最优励磁控制/控制器	PRBS	Pseudo-Random Binary Sequence 伪随机二进制序列
ESS	Excitation System Stabilizer 励磁系统稳定器	PSS	Power System Stabilizer 电力系统稳定器
LCD	Liquid Crystal Display 液晶显示器	PWM	Pulse Width Modulation 脉宽调制
LED	Light Emitting Diode 发光二极管	RTOEC	Real-Time Optimal Excitation Con- trol/Controller 实时最优励磁控制/控制器
LOC	Linear Optimal Control 线性最优控制	SNR	Signal Noise Ratio 信噪比



目 录

序
前言

第一章 绪论	1
第一节 励磁控制系统的作用	1
第二节 励磁方式的分类	3
第三节 励磁控制理论的发展	7
第四节 励磁控制器国内外研究状况	10
第五节 微机励磁控制器特点	11
第二章 微机励磁控制基本理论	15
第一节 PID 励磁控制原理	15
第二节 电力系统稳定器原理	21
第三节 线性最优励磁控制理论	26
第四节 自适应励磁控制理论	44
第三章 励磁系统基本构成及其工作原理	70
第一节 测量比较单元	71
第二节 调差单元	75
第三节 综合放大单元	78
第四节 移相触发单元	82
第五节 励磁限制单元	89

第五节	运行方式管理与自动跟踪	194
第六节	人一机接口与机—机接口	196
第七节	起励、灭磁控制	199
第八节	控制参数管理	201
第九节	实时时钟管理和事故/试验记录	202
第十节	励磁控制程序设计	203
第九章	微机励磁控制器的可靠性设计	207
第一节	硬件冗余设计	208
第二节	故障检测与自动切换	216
第三节	硬件抗干扰设计	219
第四节	软件抗干扰设计	224
第五节	软件的容错设计	227
第六节	数字滤波方法	229
第十章	微机励磁控制系统的调试与试验	231
第一节	静态调试与整定	231
第二节	动态模拟试验	235
第三节	现场调试	244
第四节	现场试验	247
第五节	使用、维护及异常处理	251
第六节	励磁控制系统常用技术术语简介	253
第十一章	交流励磁控制系统简介	256
第一节	交流变频励磁控制	256
第二节	新型功率器件及 PWM 整流技术	262
附录 A	线性最优励磁控制系统模型和参数	271
附录 B	自适应最优励磁控制系统模型和参数	273
附录 C	多模振荡仿真系统参数	275
参考文献		277

第一章

绪 论

励磁系统是同步发电机的一个重要组成部分,它直接影响发电机的运行特性,对电力系统的安全稳定运行有重要的影响。随着电力系统的扩大和发电机组容量的增大,大型同步发电机的励磁系统也在不断发展,励磁方式从直流励磁机方式发展到采用交流励磁机加静止(或旋转)半导体整流器的励磁方式和自励式半导体励磁方式,励磁控制器也从传统的模拟式调节单元发展到了以微型计算机为核心的数字式。近年来,随着大功率电力电子和微机控制技术水平的提高,还出现了交流变频励磁系统。

本书系统介绍了微机励磁控制的基本理论,其中重点介绍了线性最优励磁控制理论和自适应控制理论;详细介绍了微机励磁控制器的硬件结构、软件设计、控制算法实现、可靠性设计、动模试验、现场试验以及运行维护等诸方面的基本知识和应用技术;最后对发电机交流励磁控制系统进行了介绍。

第一节 励磁控制系统的作用

一、维持发电机机端电压

在发电机正常运行条件下,励磁系统应维持发电机机端(或指定控制点)电压在给定水平。通常当发电机负荷变化时,发电机机端电压将随之变化,这时,励磁系统将自动地增加或减少发电机的励磁电流,使机端电压维持在一定的水平上,保证有一定的调压精度。当机组甩负荷时,通过励磁系统的快速调节作用,应限制机端电压不致过分升高。维持发电机机端(或指定控制点)电压在给定水平上是励磁控制系统最基本和最重要的作用。

二、在并列运行的发电机间合理分配无功功率

多台发电机在母线上并列运行时,它们输出的有功决定于输入的机械功率,而发电机输出的无功则和励磁电流有关,控制并联运行的发电机之间无功分配是励磁控制系统的一项重要功能。各并联发电机间承担的无功功率的大小取决于各发电机的调差特性,即发电机端电压 U_i 和无功电流 I_{Qi} 的关系。定义调差系数

$$\delta = - \frac{\Delta U_1^*}{\Delta I_Q^*} \quad (1-1)$$

式中: ΔU_1^* 为发电机端电压变化对额定电压之比, $\Delta U_1^* = \Delta U_1 / U_{1e}$; ΔI_Q^* 为无功电流变化对额定无功电流之比, $\Delta I_Q^* = \Delta I_Q / I_{Qe}$, 在实际电力系统中常用无功变化对额定无功之比, $\Delta Q^* = \Delta Q / Q_e$ 。

当母线电压发生波动时, 发电机无功电流的增量与电压偏差成正比, 与调差系数成反比。通常我们希望发电机间的无功电流应当按照机组容量的大小成比例地进行分配, 即大容量机组担负的无功增量应大些, 小容量机组担负的无功增量相应小些, 这样就可使得各机组无功增量的标么值 ΔI_Q^* 相等。由于励磁调节器可对调差系数进行调节, 所以就可以达到机组间无功负荷合理分配的目的。

三、提高电力系统的稳定性

1. 提高电力系统的静态稳定性

电力系统的静态稳定性实质是运行点的稳定性。通常是指发电机在稳态运行时遭受到某种微小的扰动后, 能自动地回复到原来的运行状态的能力。

我们知道, 对于一条交流输电线路, 在不计电阻损耗的前提下, 其上流动的有功功率 P 与线路两端电压 U_1 、 U_2 , 线路电抗 X 间的关系为

$$P = \frac{U_1 U_2}{X} \sin \delta \quad (1-2)$$

其中, δ 为两端电压之间的电角度差。在 $\delta = 90^\circ$ 时线路达到所能输送的极限功率, 即

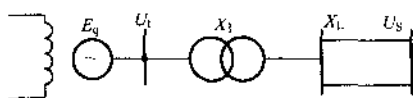


图 1-1 单机 无穷大母线系统

$$P_m = \frac{U_1 U_2}{X}$$

对于图 1-1 所示的单机—无穷大母线系统, 不考虑凸极效应和定子电阻。发电机送出的有功功率 P 可用以下两式表示

$$P_{Eq} = \frac{E_q U_s}{X_d + X_T + X_L} \sin \delta_{Eq} \quad (1-3)$$

$$P_{Ut} = \frac{U_1 U_s}{X_T + X_L} \sin \delta_{Ut} \quad (1-4)$$

式中: δ_{Eq} 为 E_q 与 U_s 间的电角度差; δ_{Ut} 为 U_1 与 U_s 间的电角度差; X_d 为发电机同步电抗; X_T 为变压器电抗; X_L 为线路电抗; E_q 为发电机空载电动势 (励磁电动势); U_1 为发电机端电压; U_s 为无穷大母线电压。

在发电机不进行励磁调节, 即 $E_q = E_{q0}$ 不变的条件下, 极限功率角为 $\delta_{Eq} = 90^\circ$, 线路所能输送的静稳极限功率为

$$P_{mEq} = \frac{E_q U_s}{X_d + X_T + X_L}$$

当有励磁调节器, 并且具有足够能力维持发电机端电压为恒定不变时, 极限功率角为 $\delta_{Ut} = 90^\circ$, 此时线路所能输送的静稳极限功率为

$$P_{mUt} = \frac{U_1 U_s}{X_T + X_L}$$

由于同步发电机内电抗较大,通常 P_{max} 要大于 P_{max_0} 。这样,发电机励磁调节器实际上起到了补偿发电机内电抗的作用。最初的复励和电压校正器由于允许的反馈增益系数较小,通常只相当于补偿掉 $X_d - X'_d$ 那一段内电抗,这时静稳功率极限只提高到 E'_d 维持不变的功角特性最大值。灵敏快速的励磁调节器可以维持发电机机端电压恒定,相当于补偿了全部发电机的 d 轴同步电抗,即达到线路静稳功率极限。

综上所述,性能优良的励磁控制系统,对提高电力系统的静态稳定水平效果明显。

2. 改善电力系统的暂态稳定性

电力系统的暂态稳定性是指系统遭受到大干扰(如短路、断线等)时,能否维持同步运行的能力。总的来说,调节励磁对暂态稳定的改善没有对静态稳定那样显著。励磁系统对提高暂态稳定而言,表现在强行励磁和快速励磁的作用上。

只有励磁电压上升快速并且顶值电压高的励磁系统对于改善暂态稳定才有较显著的作用,快速强励可减少加速面积,增加减速面积,提高系统的暂态稳定性。由于提高励磁系统的强励倍数受到励磁系统和发电机制造成本的制约以及发电机转子时间常数较大使励磁电流上升速度受到限制等原因,使得靠励磁控制来提高暂稳极限的幅度不可能像提高静稳极限那么显著,但其提高暂稳极限的效益还是明显的。良好的励磁控制在增加人工阻尼、消除第二摆或多摆失步方面的作用则更为重要。

3. 改善电力系统的动态稳定性

动态稳定是研究电力系统受到扰动后,恢复原始平衡点(瞬时扰动)或过渡到新的平衡点(大扰动后)的过程稳定性。研究的前提是:①原始平衡点(或新的平衡点)是静态稳定的;②大扰动的过程是暂态稳定的。

电力系统的动态稳定问题,可以理解为电力系统机电振荡的阻尼问题。当阻尼为正时,动态是稳定的;阻尼为负时,动态是不稳定的;阻尼为零时,是临界状态。零阻尼或很小的正阻尼,都是电力系统运行中的不安全因素,应采取措施提高系统的阻尼特性,即动态响应特性。

研究表明^{[1][2]},按电压偏差调节的比例式快速励磁系统,会造成电力系统机电振荡阻尼变弱(甚至变负)。在一定的运行方式和励磁系统参数下,快速励磁调节系统的电压调节作用,在维持发电机电压恒定的同时,将产生负的阻尼作用,当系统总阻尼较小时,就容易导致低频振荡的发生。

目前解决这一问题的方法,是在励磁调节器上附加一个补偿环节,称为电力系统稳定器(Power System Stabilizer, PSS)。此外,采用现代控制理论的励磁控制器,如线性最优励磁控制器、自适应励磁控制器和非线性励磁控制器等励磁系统,也能有效地抑制各种频率的低频振荡。

第二节 励磁方式的分类

在电力系统发展初期,同步发电机容量较小,励磁电流通常由与发电机组同轴的直流发电机供给,即直流励磁机方式。随着发电机容量的提高,所需励磁电流也随之增大,而直流励磁机由于存在机械整流环,功率过大时制造存在困难,因此在大容量的发电机组上很少采用。20世纪60年代初国外开始在中型发电机上采用交流励磁电源加半导体整流器的励磁方

式(简称半导体励磁方式),到20世纪60年代末和70年代初,已得到普遍应用。目前,半导体励磁已成为励磁方式的主流^{[3],[4]}。

同步发电机半导体励磁系统中的直流励磁电流是通过把交流励磁电源经半导体整流后得到的。根据交流励磁电源的不同种类,同步发电机半导体励磁系统又可分为两大类:

1. 他励半导体励磁系统

这类励磁系统采用与主发电机同轴的交流发电机作为交流励磁电源,经二极管、晶闸管或全控功率器件进行整流后,供给发电机励磁;这类励磁系统由于交流励磁电源取自轴功率,即主发电机之外的独立电源,故称为他励半导体励磁系统,简称他励系统。用作励磁电源的同轴交流发电机称为交流励磁机。

这类励磁系统根据半导体整流器是静止的还是旋转的,又可分为他励静止式半导体励磁系统和他励旋转式半导体励磁系统。其中后者由于半导体整流元件和交流励磁机电枢与主轴一同旋转,直接给主发电机转子励磁绕组供给励磁电流,不需要经过转子滑环及炭刷引入,也称为无刷励磁方式。

2. 自励半导体励磁系统

这类励磁系统通常采用变压器提供交流励磁电源,励磁变压器接在发电机机端或厂用电母线上。因励磁电源取自发电机自身或发电机所在的电力系统,故这种励磁方式称为自励励磁系统,简称自励系统。

自励励磁系统又可进一步细分为多种具体的实现方式,如果只用一台励磁变压器并联在机端,则称为自并励方式。如果除了并联的励磁变压器外,还有与发电机定子电流回路串联的励磁变流器(或串联变压器),则构成所谓自复励方式,根据励磁变压器和串联变压器结合的方式又可分为:①直流侧并联自复励方式;②直流侧串联自复励方式;③交流侧并联自复励方式;④交流侧串联自复励方式。

下面对大容量发电机组中使用较多的几种励磁方式进行分析和说明。

一、他励带静止二极管整流方式

图1-2为他励静止二极管整流励磁系统的原理接线图。发电机GS的励磁电流由交流励磁机G1经二极管整流装置 U_1 整流后通过滑环引入,交流励磁机的励磁电流则由交流副励磁机G2经可控硅整流装置 U_2 整流后供给。自动励磁调节器AVR随运行工况的变化而改变 U_2 的输出电压,以改变交流励磁机的励磁电流和端电压,从而起到调节发电机GS励磁电流的作用。

为了减小励磁电压的纹波系数和励磁机励磁绕组的电感及时间常数,以加快调节速度,交流励磁机的频率一般采用100Hz的交流发电机,而交流副励磁机则采用400~500Hz的中频发电机。早期的交流副励磁机曾采用过感应式交流发电机加自动恒压装置的方案实现,相比较目前普遍采用的永磁式交流副励磁机方案,不但结构和接线复杂,而且可靠性低。因此,目前运行中的许多他励静止二极管整流励磁方式的发电机都是采用永磁式发电机作为副励磁机。

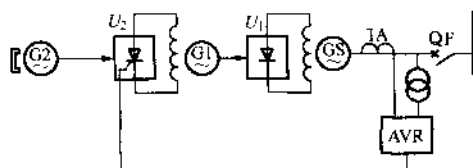


图 1-2 他励静止二极管整流励磁方式

由于高速大容量交流励磁机易于制造,且有较丰富的运行经验,故这种励磁系统在20世纪80年代前后在大型汽轮机上得到了广泛采用。我

功率电源, 故在电力系统受扰动时可使机组有较高的同步转矩, 并且在系统短路 (特别是发电机出口端短路) 时有较好的强励能力, 从而有利于改善系统的暂态稳定性。但这种励磁方式需要变流器, 鉴于变流器在制造技术、电厂布置、运行维护、可靠性及造价等方面的因素, 随着励磁技术的进步, 自复励励磁方式在大型机组上已很少采用。

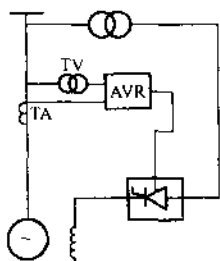


图 1-4 自并励系统原理图

(一) 自并励系统原理

自并励励磁方式是自励系统中接线最简单、造价最低廉的一种励磁方式, 其典型接线如图 1-4 所示。自并励励磁方式只用一台接在发电机端的励磁变压器作为励磁电源, 通过晶闸管整流装置直接控制发电机的励磁。

(二) 自并励励磁系统中的几点技术问题讨论

1. 自并励励磁系统的强励能力

发电机近端短路时, 由于端电压大幅下降, 自并励系统能否满足强励要求, 保证机组不会失磁, 是在自并励技术的发展过程中曾出现的疑虑。由于现代大型同步发电机大都采用单元式接线, 可能使自并励系统交流电源完全消失的惟一机会是很少发生的发电机机端三相短路, 而机端三相短路在差动保护范围内, 这时不对发电机进行强励, 对保护发电机有利。对占电力系统短路故障 90% 以上的不对称短路来说, 合理的设计可以使短路时自并励系统仍有足够的强励能力。

这样的惟一问题便是同样很少发生的升压变压器高压侧三相短路, 当此故障发生时, 自并励系统仍可具备一定的强励能力 (采用高强励的倍数), 因这时发电机机端仍为 30% ~ 40% 的额定电压。研究表明, 当升压变压器高压侧三相短路时, 若不对发电机强励, 一方面会使电力系统的暂态稳定极限下降 1% ~ 3%, 另一方面会使发电机后备保护的灵敏度不够。对前一问题, 考虑到三相短路发生的几率很小而且稳定极限下降不多, 通常都认为影响不大。对后一问题, 通常采用更换发电机后备保护的方法来解决。

2. 自并励系统给继电保护带来的问题

当发电机近端发生三相短路时, 自并励系统的强励能力将显著降低, 在某些情况下不能使发电机的短路电流维持在使过电流保护动作的水平, 带时限的继电保护可能会拒绝动作。为使保护可靠动作, 以便将故障点或机组由系统中切除, 保护装置应采取相应措施。

对于大中容量机组, 由于其励磁绕组时间常数较大, 励磁电流要在短路 0.5s 后才显著衰减, 因此, 在短路开始的 0.5s 内, 自并励励磁方式与他励方式的励磁电流是很接近的, 只是在短路 0.5s 后, 才有明显差异。考虑到高压电网中重要设备的主保护动作时间都在 0.1s 内, 且都设双重保护, 主保护可靠动作是没有问题的。但对于大于 0.5s 的后备保护, 则不一定能保证可靠动作, 可将低压闭锁过流保护换成带过电流记忆式或低阻抗保护的形式。

3. 关于起励

自并励系统的机组启动时, 发电机的端电压是残压, 其值一般较低, 约为额定电压的 1% ~ 2%。这样, 励磁回路不能满足自励条件, 发电机得不到建立电压所需的励磁电流。为此, 必须供给发电机初始励磁, 即所谓起励。起励电源一般取自直流蓄电池组或交流厂用电加整流器。若将励磁变压器接在发电机断路器 QF 外侧 (系统侧), 或接在厂用电母线上, 则不需另外采取起励措施。由于这种接线使励磁系统的工作受系统或厂用电运行情况的影响

较大,故较少采用。

(三) 自并励励磁系统的优点

1. 运行可靠性高

自并励励磁系统为静态励磁,与交流励磁机励磁系统比较,它没有旋转部件,运行可靠性高。随着电力电子技术的发展,近年来大功率可控整流装置的可靠性已与不可控整流装置相当,国内外统计资料表明,自并励励磁系统造成发电机强迫停机率低于交流励磁机励磁系统。

2. 能改善发电机组轴系稳定性

自并励励磁系统可缩短发电机组的轴系长度,减少轴承数量。如 300MW 汽轮发电机的轴系长度,可减少大约 3m,因而可提高轴系的稳定性,改善轴系振动,从而提高了机组的安全运行水平。

3. 可提高电力系统稳定水平

在小干扰稳定方面,自并励励磁系统配置电力系统稳定器(Power System Stabilizer, PSS)后,小干扰稳定水平较交流励磁机励磁系统有明显提高。在大干扰稳定方面,研究表明,自并励励磁系统的暂态稳定水平与交流励磁机励磁系统相近或略有提高。

4. 经济性好

自并励励磁系统造价低,由于缩短了轴系长度,因而可减少厂房和基础造价;调整容易,维护简单,故障后修复时间短,因而可提高发电效益。

目前,自并励方式愈来愈得到普遍使用,很多国内外公司已经把这种方式列为大型机组的定型励磁方式。我国很多电厂在发电机组励磁系统的改造中,也大多选用了自并励方式。

第三节 励磁控制理论的发展

励磁调节器控制规律的研究多年来一直是一个极为活跃的领域,长期以来,各国科学工作者在同步发电机励磁控制理论和技术的研究方面做了大量工作,取得了丰硕的研究成果,本节对励磁控制理论的发展、现状以及走向进行介绍。

一、同步发电机和电力系统对励磁系统的要求

同步发电机和电力系统对励磁系统的要求主要有两方面,即高度可靠性和快速响应。具体地说,就是要实现下列要求:

(1) 同步发电机的励磁控制应能保证在各种运行状态下的可靠性。其中包括:起励状态、空载状态、负荷状态、强励状态、灭磁状态等。

(2) 在正常工作状态时,电压控制和无功功率控制应能得到很好的响应,并有足够的调节范围。例如,当负荷从零变到额定值时,端电压应得到稳定调节,调节精度应保证在 $\pm 0.5\%$ 以内。

(3) 励磁系统应能快速动作,在故障状态时应能迅速强励,将励磁电压迅速上升至顶值电压。换句话说,应有大的强励倍数和电压上升速度。强励倍数是指强励时励磁机最大稳定电压对发电机额定转子电压之比。根据规程,强励倍数一般不小于 1.8~2.0。为了提高远距离输电功率极限,强励倍数可以提高到 3~4 及以上。

(4) 在电磁暂态和机电暂态过程中应有足够的阻尼,以保证有良好的动态稳定性。

(5) 故障消除后, 电压应能得到很好的恢复。

值得注意的是, 在各种运行状态下, 上述各项要求的侧重点是不相同的。例如, 在负荷波动时, 要求调节性能好; 在出现小振荡时, 要求稳定性能好; 在严重故障时, 要求迅速强励, 维持暂态稳定。所以, 在设计励磁控制和选择整定有关参数时, 必须分析各种可能的运行情况, 综合考虑各方面的要求。

二、励磁控制理论的发展

励磁控制理论的发展与自动控制理论本身的发展是息息相关的, 控制理论总的发展趋势是由单变量到多变量, 由线性到非线性, 再到智能化控制。同样, 励磁控制方式的发展也经历了一条与之相对应的道路。

励磁控制发展的第一阶段可称之为古典励磁控制方式。在这一阶段, 励磁控制首先从单机系统的分析和设计开始, 提出了按发电机端电压偏差进行比例式调节的单输入—单输出的励磁控制方式, 即比例调节方式。由于比例调节方式不能很好满足大电力系统对抑制振荡、提高静态稳定极限以及稳态电压调节精度等方面要求, 于是便发展到按发电机端电压偏差的比例—积分—微分调节的 PID (Proportional-Integral-Differential) 调节方式。这两种调节方式都是基于线性传递函数数学模型上的单变量设计方法。

PID 调节方式虽在一定程度上提高了稳态电压精度, 却不能有效地改善系统的动态品质和提高系统的稳定水平。尤其是快速励磁方式的采用会使电力系统特性恶化, 致使出现负阻尼情况, 使电力系统发生低频振荡。

为了改善 PID 式励磁控制器在调节精度和稳定性间的矛盾以及在提供人工阻尼方面的不足, 美国学者 F.D.Demello 和 C.Concordia 采用古典控制理论中的相位补偿原理, 于 1969 年提出了电力系统稳定器的辅助励磁控制策略, 从而形成了“AVR + PSS”结构的励磁控制器。这样, 励磁控制技术由单输入的控制系統发展成为双输入的控制系統, AVR + PSS 这一控制方式至今仍被广泛采用。最初的 PSS 采用机组转速或角频率作为反馈量, 由于角频率难以测量, 为测量方便, 现在多采用发电机机端有功功率作为反馈量, 这是一种针对特定网络模型和振荡频率区域设计的单输入、定参数和线性控制规律, 适应能力不强。为提高其鲁棒性, 许多学者提出了大量的鲁棒和自适应设计方法, 这方面的研究至今仍在继续。

与 PSS 相对应的还有 20 世纪 50 年代末前苏联提出的强力式励磁调节器。这种调节器的反馈信号除包括机端电压偏差及其一次微分、二次微分外, 还采用一些其他物理量, 如频率、发电机定子电流的偏差及其一次微分、二次微分等等。由于这种调节器的分析和参数整定方法受当时控制理论发展水平的限制, 未能在国际上获得推广应用。

然而, 电力系统是多自由度的, 亦即多变量的多输入、多输出的动力学系统。电力系统控制的实践也表明无论从提高电力系统的稳定性还是从改善电力系统的动态品质出发都需要有多变量参与控制, 多变量反馈控制是电力系统这一控制对象的客观需求。然而, 以上两个阶段励磁控制器的设计方法均是基于以传递函数为基础的古典控制理论, 对电力系统这样的多输入、多输出或多个控制信号的系统就很难满足要求。

随着现代控制理论和实践的发展, 研究方法和工具得到了不断的改进。20 世纪 70 年代, 作为现代控制理论分支的状态空间法获得了迅速发展, 建立了完整的控制系统状态空间描述方法以及多维空间中的算子理论。它的研究对象扩展到多输入—多输出的动态系统, 使用的数学工具的范围涉及到现代微分方程理论、泛函极值理论和线性代数等。与此同时, 微