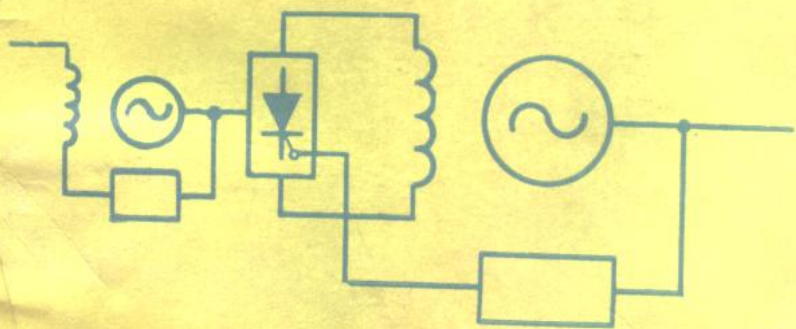


同步发电机 半导体励磁原理及应用



华中工学院 樊俊 陈忠 涂光瑜 编

水利电力出版社

同步发电机半导体励磁 原理 及 应用

华中工学院 樊俊 陈忠 涂光瑜编

水利电力出版社

内 容 提 要

本书系统地阐述了同步发电机各类半导体励磁方式及励磁调节器的基本原理和应用。全书共十四章，前八章叙述各种类型半导体励磁方式的工作原理、主要特性及应用、参数选择及主回路计算等，并综合介绍了半导体励磁装置的保护。后五章叙述半导体励磁调节器各单元的工作原理。最后一章介绍用于直流励磁机的可控硅励磁调节器。本书可供从事励磁专业工作的制造、设计、运行方面的工程技术人员和专业工人阅读，也可作为大专院校电力类有关专业的教学参考书。

同步发电机半导体励磁原理及应用

华中工学院 樊俊 陈忠 涂光瑜 编

(根据电力工业出版社纸型重印)

*

水利电力出版社出版

(北京三里河路6号)

新华书店北京发行所发行·各地新华书店经售

水利电力印刷厂印刷

*

850×1168毫米 32开本 14.625印张 385千字

1981年10月第一版

1985年11月新一版 1985年11月北京第一次印刷

印数0001—5070册 定价 3.25 元

书号 15143·5558

前 言

励磁系统是同步发电机极其重要的组成部分，国内外在这方面一直进行着大量的研究工作。随着单机容量的增大以及大功率半导体元器件制造技术的提高，以半导体整流装置为励磁功率单元并配以半导体励磁调节器共同组成的励磁系统，即所谓半导体励磁系统，逐步得到了推广。国外在六十年代初开始在中型同步发电机上采用半导体励磁系统，其后发展很快，到七十年代初已经在大型同步发电机上得到普遍应用。近十多年来，我国在半导体励磁方面也有较快的发展。用半导体励磁方式代替传统的直流励磁机，根据国内外实际运行的结果，证明其优越性是肯定的。半导体励磁系统的主要优点是励磁响应快，运行维护简便，制作容易，为引进附加控制信号或实现最佳励磁控制创造了条件。理论分析及实践表明，采用半导体励磁系统对提高电力系统稳定，改善系统运行质量有很大作用。

本书系统地阐述了同步发电机各类半导体励磁方式及励磁调节器的基本原理和应用。为了适应励磁专业工作人员提高理论水平和运行水平的需要，着重对国内常用的几种半导体励磁方式进行了分析比较。力求面向生产，联系实际。

考虑到在编写方式上如果按照各种具体型号的半导体励磁装置一一介绍，不仅内容上将会有重复，而且阐述上也会受到局限。故本书是按同步发电机半导体励磁系统的主要类型以及励磁调节器的各主要组成单元，系统阐述其工作原理、典型电路、性能和应用。编者认为这样可能有利于理解和比较同一类型或同一单元的不同方案或不同电路的共性和特点，有助于掌握其基本的原理与应用。在理解本书内容的基础上，对各种具体型号的半导体励磁装置，是不难进行分析、计算和掌握其运行性能的。

本书在共同讨论的基础上，由樊俊（第一、三、四、五、六、七章）、陈忠（第二、八、十三、十四章）、涂光瑜（第二、九、十、十一、十二章）三同志分工编写，由樊俊同志对各章进行统一修改和定稿。我院电力系统及其自动化教研室有关同志审阅了部分章节。

在编写本书的过程中，参阅了国内许多兄弟单位提供的有关资料，编者在此对有关兄弟单位表示深切的感谢。

由于我们的水平有限，加之编写时间比较仓促，书中疏漏错误之处，敬请读者批评指正。

编 者

1980年12月于华中工学院

符 号 说 明

一、设备、元件文字符号

F 发电机	FMK 发电机灭磁开关
JL 交流励磁机	JMK 交流励磁机灭磁开关
JFL 交流副励磁机	LMK 直流励磁机灭磁开关
L 直流励磁机	QLC 强励接触器
LL 直流副励磁机	ZLT 自动励磁调节器
B 变压器	LT 励磁调节器
LB 励磁变压器	Z 整流桥
TB 同步变压器	GZ 硅整流桥
CB 测量变压器	KZ 可控整流桥
MB 脉冲变压器	J 继电器
XB 旋转变压器	SJ 时间继电器
YH 电压互感器	ZJ 中间继电器
LH 电流互感器	XD 信号灯
GLH 功率电流互感器 (励磁变流器)	AN 按钮
CF 磁放大器	YM 压敏电阻
Q 线圈	KRD 快速熔断器
DL 断路器	W 电位器
K 开关	WY 稳压管
DK 刀开关(或电抗线圈)	DJT 单结晶体管
ZK 自动开关	D 二极管
HK 转换开关	T 晶体三极管
MK 灭磁开关	SCR 可控硅(晶闸管)

二、文字下角符号

s r 输入	w 稳定(或稳压等)
s c 输出	c 测量(或与电容有关的量等)

fz 负载
 xt 系统
 xl 续流
 jx 极限
 lj 临界
 xz 限制
 fl 复励
 fk 反馈
 cj 冲击
 dz 等值
 bh 饱和
 gd 关断
 pj 平均
 g 给定, 触发
 z 整定

b 比较
 k 控制
 s 剩磁
 m 灭磁
 F 发电机定子量
 fd 发电机转子 d 轴量
 L 励磁机电量
 LL 副励磁机电量
 D 短路
 0 初始状态
 (0) 空载
 (e) 额定
 (q) 强励

三、通用文字符号

E, e 电势	δ 功率角 (或转子角)
U, u 电压	t 时间
I, i 电流	τ 时间常数
P 有功功率	T 周期 (或时间常数)
Q 无功功率	M 互感 (或力矩)
S 视在功率 (或铁芯截面)	Φ 磁通 (或角度)
$\cos\varphi$ 功率因数	B 磁通密度
Z, z 阻抗	W 绕组匝数
R, r 电阻	max 最大
X, x 电抗	min 最小
C 电容	m 正弦量幅值
L 电感	d 纵轴
f 频率	q 横轴
ω 角频率	
n 转速	

四、常用文字和下角符号

U_d 整流器直流侧平均电压	U_l 三相交流线电压
I_d 整流器直流侧平均电流	I_l 三相交流线电流
α 可控硅控制角	X_l 发电机定子绕组漏抗
$\theta (\beta)$ 可控硅导通角	X_{ll} 发电机励磁绕组漏抗
β 可控硅逆变角 (或导通比)	X_{Σ} 发电机出口至短路点的 短路外电抗
γ 硅元件换流角	E_q 励磁电势
U_γ 硅元件换流压降	E'_q 暂态电势
U_k 控制电压	
u_T 同步信号电压	

目 录

前 言

符号说明

第一章 同步发电机半导体励磁概述	1
1-1 同步发电机励磁系统的任务	1
一、电压控制及无功分配(1) 二、提高同步发电机并列运行 的稳定性(2)	
1-2 半导体励磁系统的发展	8
1-3 半导体励磁系统的分类	10
1-4 各种半导体励磁方式的构成	13
一、他励系统(13) 二、自励系统(16) 三、用于直流励 磁机的可控硅励磁方式(19)	
1-5 半导体励磁调节器概述	21
一、励磁控制系统(21) 二、对励磁调节器的要求(22) 三、励磁调节器的构成(23)	
第二章 整流电路	25
2-1 单相半波整流电路	25
一、单相半波不可控整流电路(26) 二、单相半波可控整流 电路(29) 三、带感性负载的单相半波可控整流电路(31) 四、具有续流管的单相半波可控整流电路(34)	
2-2 三相半波整流电路	37
一、三相半波不可控整流电路(37) 二、三相半波可控整流 电路(40) 三、带感性负载的三相半波可控整流电路(42)	
2-3 三相桥式不可控整流电路	44
一、电压源供电的三相桥式整流电路(44) 二、电流源供电 的三相桥式整流电路(48)	
2-4 三相桥式半控整流电路	52
2-5 三相桥式全控整流电路	58
一、整流工作状态(59) 二、逆变工作状态(64)	

2-6	整流电路的换流压降及外特性	68
2-7	异常情况下的三相整流桥	73
	一、一臂失控单相导通(73) 二、一相或两相脉冲丢失(75)	
	三、一臂、两臂或一相开断(77)	
第三章	励磁系统主回路计算	81
3-1	主回路电压、电流及控制角的计算	81
	一、交流侧线电压计算(82) 二、计算控制角 α (83)	
	三、交流侧线电流计算(83) 四、交流电源功率计算(85)	
3-2	整流桥负载的功率因数计算	85
	一、基波功率因数(86) 二、总功率因数(88)	
3-3	三相整流桥短路电流的计算	89
	一、三相整流桥直流侧短路的计算(89) 二、三相桥式整流 电路一臂击穿时短路电流计算(91)	
3-4	三相整流桥硅元件选择	95
	一、硅元件额定电流的选择(95) 二、可控硅额定电压的选 择(97) 三、硅元件的冷却(98)	
3-5	暂态过程有关计算	98
	一、同步发电机电磁暂态方程(99) 二、不调节励磁情况 下同步发电机三相短路的暂态过程(100) 三、强行励磁对同步 发电机三相短路电磁暂态过程的影响(103) 四、暂态过程中 转子电流的计算(108) 五、固有强励倍数 K_u 的计算(111)	
3-6	励磁电压响应比	113
3-7	同步发电机的灭磁及其计算	116
	一、单独励磁机灭磁(117) 二、利用放电电阻灭磁(119)	
	三、利用非线性电阻灭磁(122) 四、采用灭弧栅灭磁(124)	
	五、利用可控硅桥逆变灭磁(128)	
第四章	自并励半导体励磁系统	131
4-1	自并励励磁系统接线方式	131
4-2	起励问题	132
	一、他励起励(133) 二、残压起励(134)	
4-3	自并励发电机的稳定运行	138
4-4	自并励发电机短路电流计算	141
	一、自并励发电机短路电流的特点(141) 二、三相短路各电 量之间的关系(142) 三、三相短路的暂态过程(143) 四、	

临界外电抗(146)	五、试验曲线(148)	六、不对称短路(150)
4-5 自并励发电机对继电保护的影响	152	
4-6 自并励励磁系统与电力系统稳定	154	
一、静态稳定(155)	二、动态稳定(156)	
4-7 自并励可控硅励磁系统的优缺点和应用范围	158	
第五章 直流侧叠加自复励半导体励磁系统	161	
5-1 直流侧并联自复励半导体励磁系统的工作原理	161	
5-2 励磁变流器参数选择	164	
一、在对可控硅桥最不利的工况下保证其正常工作(164)		
二、在机端发生三相短路时应使机组不致失励(166)		
5-3 励磁变压器参数选择	168	
一、可控硅桥应具有一定的强励能力(168)	二、可控硅桥应	
满足正常运行工况(170)	三、可控硅桥应适应特殊运行工	
况(170)		
5-4 励磁变流器副方过电压问题	171	
5-5 并联自复励发电机的自动励磁问题	174	
5-6 并联自复励半导体励磁系统的运行	178	
一、起励及空载运行(178)	二、并列时窜无功现象(178)	
三、运行方式(179)		
5-7 直流侧串联自复励半导体励磁系统的工作原理	181	
5-8 串联自复励系统的参数选择	183	
一、励磁变压器参数选择(183)	二、励磁变流器参数选	
择(185)		
5-9 串联自复励发电机短路电流变化规律	187	
一、近端三相短路(188)	二、远方三相短路(191)	三、短
路过程中的动态性能(193)		
第六章 交流侧叠加自复励半导体励磁系统	194	
6-1 概述	194	
6-2 可控电抗器相复励半导体励磁系统	197	
一、工作原理(197)	二、参数计算(198)	
6-3 交流侧串联自复励半导体励磁系统的工作原理及参数选择		
原则	204	
一、工作原理(204)	二、主回路参数选择(206)	三、同步

电压模拟装置(209)	
6-4 交流侧串联自复励半导体励磁系统的设计计算步骤	210
6-5 一种新型结构的相补偿自复励半导体励磁系统	214
第七章 他励半导体励磁系统	218
7-1 他励静止硅整流器励磁方式	218
7-2 他励静止可控硅励磁方式	221
一、原理简述(222) 二、起励及升压(224) 三、关于交流励磁机的几个问题(224)	
7-3 他励旋转硅整流器励磁方式	226
一、工作原理(226) 二、灭磁方式(228) 三、关于检测(231)	
7-4 他励旋转可控硅励磁方式	231
第八章 半导体励磁装置的保护	234
8-1 过电压的来源及保护方式	234
8-2 阻容吸收保护	238
一、交流侧阻容保护(239) 二、直流侧阻容保护(242)	
三、关断过电压保护(243)	
8-3 硒堆及压敏电阻浪涌吸收器	244
一、硒堆吸收装置(244) 二、压敏电阻浪涌吸收器(246)	
8-4 转子过电压保护	251
8-5 过电流保护	254
一、快速熔断器(255) 二、快速过电流继电器(256)	
8-6 电压上升率的抑制	260
8-7 电流上升率的抑制	265
一、本臂并联 RC 的放电(266) 二、交流侧 RC 的放电(268)	
三、桥臂 RC 环节的放电(269) 四、对直流侧 RC 环节的充电(269) 五、交替电流上升率(269)	
8-8 串并联支路的均流、均压	270
一、并联支路间的均流(271) 二、串联元件间的均压(273)	
第九章 半导体励磁调节器的测量比较单元	275
9-1 半导体励磁调节器的测量整流电路	275
一、六相桥式整流(276) 二、十二相桥式整流(278) 三、测量变压器的计算(281)	
9-2 滤波电路	282
一、 Π 型、 Γ 型滤波器(282) 二、桥式滤波器(283)	

9-3 正序电压过滤器	287
一、工作原理(287) 二、参数选择(290)	
9-4 比较整定电路	290
一、桥式比较整定电路(291) 二、桥式比较整定电路的几个问题(297) 三、集成元件比较整定电路(299)	
9-5 调差电路	301
一、调差特性与机组间无功功率的分配(301) 二、调差电路的原理及接线方式(303)	
第十章 综合放大单元	308
10-1 综合放大单元的任务、要求和种类	308
10-2 简单的晶体管直流放大器	309
10-3 晶体管直流运算放大器	310
一、运算放大器的原理和特点(311) 二、晶体管运算放大器(313)	
10-4 集成元件运算放大器	317
一、线性集成放大器(318) 二、集成元件运算放大器线路(319)	
10-5 磁放大器	321
一、磁放大器的工作原理(321) 二、双拍磁放大器(326)	
三、中频电源(326)	
第十一章 移相触发单元	331
11-1 概述	331
一、触发电路的种类(331) 二、对移相触发单元的基本要求(332) 三、同步电压(332)	
11-2 单结晶体管触发电路	334
一、单结晶体管振荡电路(334) 二、单结晶体管触发电路(337)	
11-3 锯齿波触发电路	342
一、锯齿波的形成(342) 二、移相控制方式(345) 三、锯齿波移相触发电路举例(346)	
11-4 单稳态触发电路	349
一、同步信号环节(351) 二、移相控制环节(351) 三、脉冲输出环节(353) 四、单稳态触发电路实例(353)	
11-5 脉冲变压器	355

- 一、脉冲变压器的功用和结构(356)
- 二、脉冲变压器的等效电路(357)
- 三、脉冲顶部失真(359)
- 四、脉冲前沿上升时间(361)
- 五、脉冲变压器的计算(362)

第十二章 半导体励磁调节装置的特性和运行.....365

12-1 半导体励磁调节装置的静态调节特性.....365

- 一、励磁调节装置的静态调节特性(365)
- 二、励磁调节系统的静特性(369)

12-2 半导体励磁调节器的镇定环节.....371

- 一、励磁装置稳定器(371)
- 二、电力系统稳定器(372)

12-3 励磁调节器的运行方式.....378

- 一、自动、手动运行方式及其切换(378)
- 二、两套调节器互为备用的运行方式(380)

12-4 励磁调节器中的直流供电电源.....383

- 一、励磁调节器中的直流供电电源的特点(383)
- 二、直流供电电源的运行方式(384)

第十三章 励磁限制及运行检测.....386

13-1 空载励磁限制及励磁过载延时限制.....386

- 一、空载励磁限制及励磁过载延时限制(387)
- 二、具有反时限特性的励磁过载限制(390)
- 三、低频过励限制(392)

13-2 最大励磁电流限制(瞬时过励限制).....393

13-3 欠励限制(最小励磁限制).....396

- 一、欠励限制的条件(397)
- 二、模拟功率圆图的欠励限制接线(400)
- 三、模拟相角差 δ 的欠励限制接线(403)

13-4 运行检测.....406

- 一、可控硅元件控制角 α 的测定(406)
- 二、无刷励磁系统中励磁电流的测量问题(408)

13-5 运行监视.....409

- 一、桥臂电流消失的监视(409)
- 二、串、并联时支路元件的监视(410)
- 三、无刷励磁系统中交流励磁机两相运行的监视问题(413)
- 四、脉冲消失的检测(413)

13-6 励磁系统的信号.....415

第十四章 用于直流励磁机的可控硅励磁调节器.....418

14-1 可控硅开关式调节器总体工作原理.....418

14-2 开关式调节器主回路的工作原理及特性.....422

一、调节励磁的基本原理(422)	二、开关调节方式(423)	
三、续流方式及调节特性(425)		
14-3 开关式调节器关断回路的工作原理·····		431
一、关断过程(431)	二、开关回路的主要波形(434)	三、
带附加可控硅的关断回路(436)	四、由励磁机供电的关断回	
路(438)		
14-4 可控硅连续式调节器·····		440
一、总体工作原理(441)	二、移相回路(443)	三、触发回
路(445)	四、功率输出回路(446)	
14-5 励磁变压器供电的可控硅调节器·····		447
参考文献及资料·····		449

第一章 同步发电机半导体励磁概述

励磁系统是同步发电机的重要组成部分，直接影响发电机的运行特性。励磁系统一般由两部分构成：第一部分是励磁功率单元，它向同步发电机的励磁绕组提供直流励磁电流；第二部分是励磁调节器，它根据发电机的运行状态，自动调节功率单元输出的励磁电流，以满足发电机运行的要求。

旧式的励磁系统，其励磁功率单元是直流发电机，称为直流励磁机。励磁调节多采用机电型或电磁型调节器。随着同步发电机单机容量的增大以及大功率半导体元件的广泛应用，以半导体整流器为励磁功率单元，和由半导体元件构成的励磁调节器共同组成的励磁系统，即所谓半导体励磁系统，逐步得到了推广。本章对同步发电机半导体励磁系统先作一总体概述。

1-1 同步发电机励磁系统的任务

无论在稳态运行或暂态过程中，同步发电机的运行状态在很大程度上与励磁有关。优良的励磁系统不仅可以保证发电机运行的可靠性和稳定性，而且可以有效地提高发电机及其相联的电力系统的技术经济指标。为此，在正常运行或事故情况下，同步发电机都需要调节励磁电流。励磁调节应执行下列任务。

一、电压控制及无功分配

在发电机正常运行工况下，励磁系统应维持发电机端电压（或升压变压器高压侧电压）在给定水平。当发电机负荷改变而端电压随之变化时，由于励磁调节器的调节作用，励磁系统将自动地增加或减少供出的励磁电流，使发电机端电压回复到给定水平，保证有一定的调压精度。当机组甩负荷时，通过励磁系统的

调节作用，应限制机端电压使之不致过份升高。另外，当几台机组并列运行时，通过励磁系统应能稳定地分配机组的无功功率。

维持电压水平和机组间稳定分担无功功率，这是励磁调节应执行的基本任务。

二、提高同步发电机并列运行的稳定性

电力系统可靠供电的首要要求，是使并入系统中的所有同步发电机保持同步运行。系统在运行中随时会遭受各种扰动，这样，伴随着励磁调节，系统将由一种平衡状态企图建立新的平衡状态。这一过渡历程的时间叫做暂态时间。在这个时间内系统是振荡的。如果振荡逐渐衰减，在有限的时间内系统稳定到新的平衡状态，则称系统是稳定的。电力系统稳定的主要标志是，在暂态时间末了，同步发电机维持或恢复同步运行。

如果扰动是一种大的冲击，例如高压输电网络中发生短路，或一台主要发电机被切除，系统将发生较强烈的振荡，一些同步发电机也可能失步。这种情况下的稳定问题，习惯上称为动态稳定问题（现在国外有些文献中，称为暂态稳定）。

扰动的另一种形式是负荷随机地发生小的变化，即所谓小干扰。同步发电机在小干扰下的稳定问题，习惯上称为静态稳定问题。

分析及实践表明，励磁系统对提高同步发电机并列运行的稳定性具有重要作用。现分述如下。

1. 励磁对静态稳定的影响

静态稳定是指发电机在稳态运行时遭受到某种极其微小的扰动后，能够自动地恢复到原来的运行状态。由多合同步发电机并联组成的电力系统应该是静态稳定的，这是电力系统能够正常运行的基本条件。

图1-1（a）为一个简单的电力系统接线图，其中发电机F经升压变压器、输电线和降压变压器送电到受端母线。发电机F也可以代表一个远方电厂。设受端母线上连接另一个大系统，母线