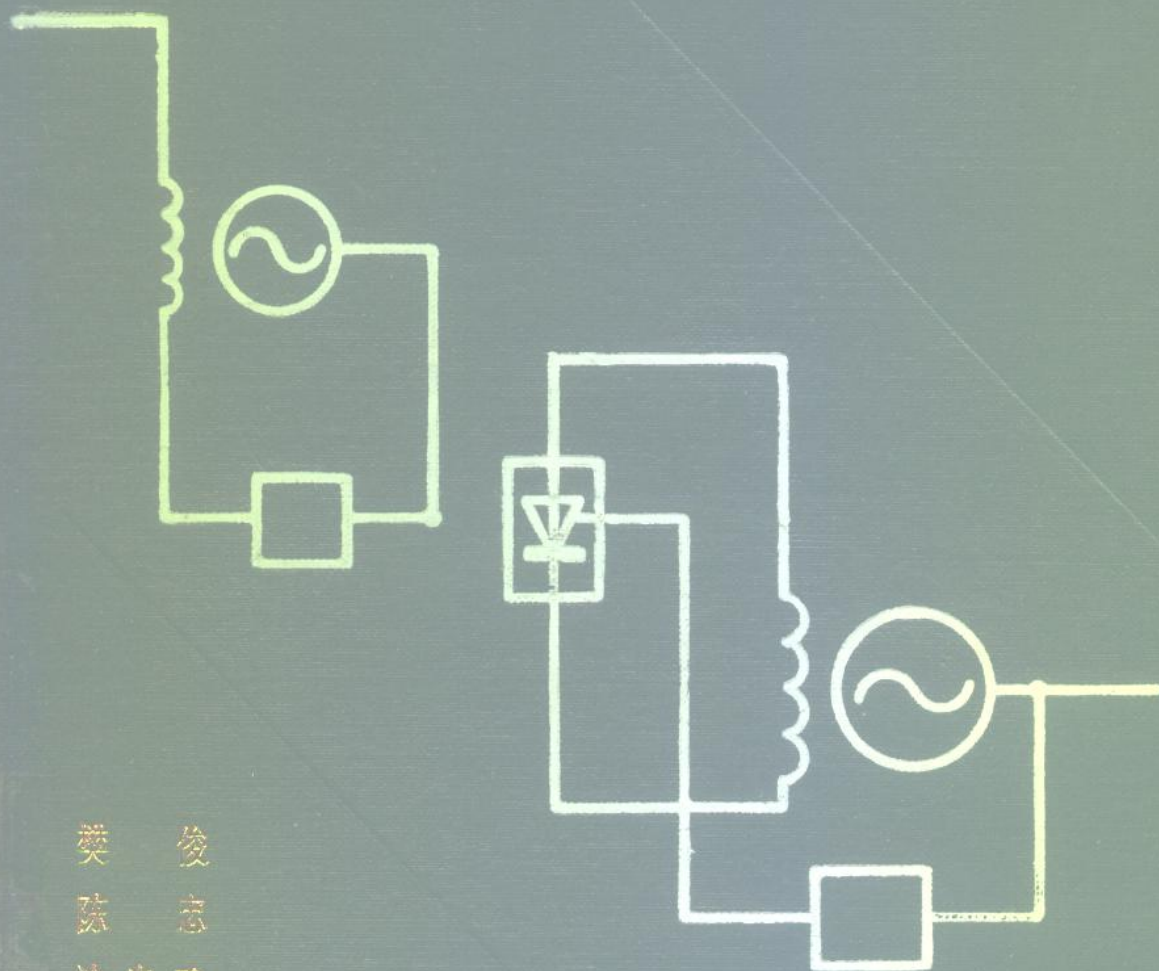


同步发电机半导体励磁 原理及应用

第二版



樊 俊
陈 志
涂 光
瑜 编著

水利电力出版社

77.24
F11
9

同步发电机半导体励磁 原理及应用

第 二 版

樊俊 陈忠 涂光瑜 编著

水利电力出版社

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。国外在本世纪60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70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

第二版说明

本书自1981年出版以来，至今已将近十年了。现修订再版，以满足广大读者的需要。

第二版力求保持第一版的体系和特色，各章内容作了一些修改、增添和删减，以反映同步发电机半导体励磁系统的发展和现状。另外新增第十五章，扼要介绍近几年开始应用的微机型励磁调节器的基本原理。

全书由樊俊、陈忠、涂光瑜三同志按第一版的分工进行修订，第十五章由樊俊同志执笔。全书修订稿由樊俊同志定稿。

在修订过程中，参阅了近几年来的有关文献资料。本书修订版的参考文献，按规定只列正式出版物。部分引用了的资料采用页下注说明。对所有有关文献资料的作者表示感谢。

限于水平，书中疏漏不当之处，恳请读者批评、指正。

编著者

1990年4月于华中理工大学

符 号 说 明

一、设备、元件文字符号

F 发电机	JMK 交流励磁机灭磁开关
JL 交流励磁机	LMK 直流励磁机灭磁开关
JFL 交流副励磁机	QLC 强励接触器
L 直流励磁机	ZLT 自动励磁调节器
LL 直流副励磁机	LT 励磁调节器
B 变压器	Z 整流桥
LB 励磁变压器	GZ 硅整流桥
TB 同步变压器	KZ 可控整流桥
CB 测量变压器	J 继电器
MB 脉冲变压器	SJ 时间继电器
XB 旋转变压器	ZJ 中间继电器
YH 电压互感器	XD 信号灯
LH 电流互感器	AN 按钮
GLH 功率电流互感器(励磁变流器)	YM 压敏电阻
CF 磁放大器	KRD 快速熔断器
Q 线圈	W 电位器
DL 断路器	WY 稳压管
K 开关	DJT 单结晶体管
DK 刀开关(或电抗线圈)	D 二极管
ZK 自动开关	T 晶体三极管
HK 转换开关	SCR 可控硅(晶闸管)
MK 灭磁开关	BOD 转折二极管
FMK 发电机灭磁开关	XE 限压二极管

二、文字下角符号

sr 输入	fk 反馈
sc 输出	cj 冲击
fz 负载	dz 等值
xt 系统	bh 饱和
xl 续流	gd 关断
jx 极限	g 给定, 触发
lj 临界	zd 整定
xz 限制	AV 平均值
fl 复励	w 稳定(或稳压、外等)

c 测量 (或与电容有关的量等)

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

max 最大

min 最小

m 正弦量幅值

d 纵轴

q 横轴

φ 角度

三、常用文字和下角符号

U_d 整流器直流侧平均电压

I_d 整流器直流侧平均电流

α 可控硅控制角

$\theta(\beta)$ 可控硅导通角

β 可控硅逆变角 (或导通比)

γ 硅元件换流角

U_v 硅元件换流压降

U_c 控制电压

u_r 同步信号电压

U_l 三相交流线电压

I_l 三相交流线电流

X_s 发电机定子绕组漏抗

$X_{\prime\prime}$ 发电机励磁绕组漏抗

X_{Σ} 发电机出口至短路点的短路外电抗

E_s 励磁电势

E_q' 暂态电势

目 录

第二版说明

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 (1)	
1-2 半导体励磁系统的发展	5
1-3 半导体励磁系统的分类	6
1-4 各种半导体励磁方式的构成	8
一、他励系统 (8) 二、自励系统 (10) 三、用于直流励磁机的可控硅励磁方式 (12)	
1-5 半导体励磁调节器概述	12
一、励磁控制系统 (13) 二、对励磁调节器的要求 (13) 三、励磁调节器的构成 (13)	
第二章 整流电路的原理及分析	16
2-1 单相半波整流电路	16
一、单相半波不可控整流电路 (16) 二、单相半波可控整流电路 (18) 三、带电感负载的单相半波可控整流电路 (20) 四、具有续流管的单相半波可控整流电路 (22)	
2-2 三相半波整流电路	24
一、三相半波不可控整流电路 (24) 二、三相半波可控整流电路 (25) 三、带电感负载的三相半波可控整流电路 (27)	
2-3 三相桥式不可控整流电路	28
一、电压源供电的三相桥式整流电路 (28) 二、电流源供电的三相桥式整流电路 (30)	
2-4 三相桥式半控整流电路	32
2-5 三相桥式全控整流电路	36
一、整流工作状态 (37) 二、逆变工作状态 (39)	
2-6 整流电路的换流压降及外特性	42
2-7 异常情况下的波形分析	45
一、桥臂断开或其脉冲丢失 (46) 二、三相半控桥的续流不良 (48) 三、逆变过程的换相失败 (50)	
第三章 励磁系统主回路计算	51
3-1 主回路电压、电流及控制角的计算	51
一、交流侧线电压计算 (51) 二、计算控制角 α (52) 三、交流侧线电流计算 (52) 四、交流电源功率计算 (53)	
3-2 整流桥负载的功率因数计算	53
一、基波功率因数 (54) 二、总功率因数 (55)	
3-3 三相整流桥短路电流的计算	56
一、三相硅整流桥直流侧短路的计算 (56) 二、三相桥式整流电路一臂击穿时短路电流计算 (58)	

3-4 三相整流桥硅元件选择	61
一、硅元件额定电流的选择(61) 二、可控硅额定电压的选择(63) 三、硅元件的冷却(63)	
3-5 暂态过程有关计算	63
一、同步发电机电磁暂态方程(64) 二、不调节励磁情况下同步发电机三相短路的暂态过程(65)	
三、强行励磁对同步发电机三相短路电磁暂态过程的影响(66) 四、暂态过程中转子电流的计算(69) 五、固有强励倍数 K_e 的计算(71)	
3-6 励磁电压响应比	72
3-7 同步发电机的灭磁及其计算	74
一、单独励磁机灭磁(75) 二、利用放电电阻灭磁(76) 三、利用非线性电阻灭磁(78)	
四、采用灭弧栅灭磁(81) 五、利用可控硅桥逆变灭磁(83)	
第四章 自并励半导体励磁系统	85
4-1 自并励励磁系统接线方式	85
4-2 起励问题	86
一、他励起励(86) 二、残压起励(87)	
4-3 自并励发电机的稳定运行	89
4-4 自并励发电机短路电流计算	91
一、自并励发电机短路电流的特点(91) 二、三相短路各电量之间的关系(92) 三、三相短路的暂态过程(93) 四、临界外电抗(95) 五、试验曲线(96) 六、不对称短路(97)	
4-5 自并励发电机对继电保护的影响	98
4-6 自并励励磁系统与电力系统稳定	100
一、静态稳定(100) 二、暂态稳定(101)	
4-7 自并励可控硅励磁系统的优缺点和应用范围	102
第五章 直流侧叠加自复励半导体励磁系统	104
5-1 直流侧并联自复励半导体励磁系统的工作原理	104
5-2 励磁变流器参数选择	106
一、在对可控硅桥最不利的工况下保证其正常工作(106) 二、在机端发生三相短路时应使机组不致失励(107)	
5-3 励磁变压器参数选择	108
一、可控硅桥应具有一定的强励能力(108) 二、可控硅桥应满足正常运行工况(109) 三、可控硅桥应适应特殊运行工况(110)	
5-4 励磁变流器副方过电压问题	110
5-5 并联自复励半导体励磁系统的运行	112
一、起励及空载运行(112) 二、并列时无功上窜现象(112) 三、运行方式(113) 四、自励磁问题(114)	
5-6 直流侧串联自复励半导体励磁系统的工作原理	114
5-7 串联自复励系统的参数选择	116
一、励磁变压器参数选择(116) 二、励磁变流器参数选择(117)	
5-8 串联自复励发电机短路电流变化规律	118
一、近端三相短路(119) 二、远方三相短路(121) 三、短路过程中的动态性能(122)	
第六章 交流侧叠加自复励半导体励磁系统	123
6-1 概述	123

6-2 可控电抗器相复励半导体励磁系统	125
一、工作原理(125) 二、参数计算(125)	
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	130
一、工作原理(130) 二、主回路参数选择(131) 三、同步电压模拟装置(133)	
6-4 交流侧串联自复励半导体励磁系统的设计计算步骤	134
6-5 一种新型结构的相补偿自复励半导体励磁系统	137
第七章 他励半导体励磁系统	139
7-1 交流励磁机带整流负载的外特性	139
一、交流励磁机带三相整流桥负载的三种工作状态(139) 二、三种工作状态的外特性(140)	
7-2 交流励磁机有关的几个问题	141
一、交流励磁机定子电流的谐波分析(141) 二、交流励磁机稳态计算(144) 三、交流励磁机的功率(145)	
7-3 他励静止硅整流器励磁方式	146
7-4 他励静止可控硅励磁方式	149
一、原理简述(149) 二、起励及升压(150) 三、交流励磁机电压畸变带来的问题(150)	
7-5 他励旋转硅整流器励磁方式	151
一、工作原理(151) 二、灭磁方式(153) 三、关于检测(155)	
7-6 他励旋转可控硅励磁方式	155
第八章 半导体励磁系统的保护	157
8-1 过电压的来源及保护方式	157
一、过电压的来源(158) 二、过电压保护方式(159)	
8-2 阻容吸收保护	160
一、交流侧阻容保护(161) 二、直流侧阻容保护(163) 三、关断过电压保护(163)	
8-3 硒堆及压敏电阻浪涌吸收器	164
一、硒堆吸收装置(164) 二、压敏电阻浪涌吸收器(166)	
8-4 转子过电压保护	169
一、转子过电压保护方式(169) 二、可控硅跨接器(170) 三、非线性压敏电阻方式(172)	
四、反并负向整流桥方式(173)	
8-5 过电流保护	174
一、快速熔断器(175) 二、快速过电流继电器(176)	
8-6 电压上升率的抑制	178
8-7 电流上升率的抑制	181
一、本臂并联RC的放电(182) 二、交流侧RC的放电(183) 三、桥臂RC环节的放电(184)	
四、对直流侧RC环节的充电(184) 五、交替电流上升率(184)	
8-8 串并联支路的均流、均压	185
一、并联支路间的均流(185) 二、串联元件间的均压(186)	
第九章 半导体励磁调节器的测量比较单元	188
9-1 测量整流电路	188
一、六相桥式整流(188) 二、十二相桥式整流(190) 三、测量变压器的计算(192)	
9-2 滤波电路	192
一、 Π 型、 Γ 型滤波器(192) 二、桥式滤波器(193)	

9-3 正序电压滤波器	195
一、工作原理 (195) 二、参数选择 (197)	
9-4 比较整定电路	198
一、桥式比较整定电路 (198) 二、桥式比较整定电路的几个问题 (201) 三、集成元件比较整定电路 (203)	
9-5 调差电路	203
一、调差特性与机组间无功功率的分配 (204) 二、调差电路的原理及接线方式 (205)	
第十章 综合放大单元	208
10-1 综合放大单元的任务和要求	208
10-2 直流运算放大器	209
一、运算放大器的原理和特点 (209) 二、用于励磁调节器的运算放大电路实例 (210) 三、运算放大电路实现励磁调节规律 (211)	
10-3 运算放大器构成的综合放大单元实例	214
10-4 磁放大器	216
一、磁放大器的工作原理 (217) 二、双拍磁放大器 (219) 三、中频电源 (220)	
第十一章 移相触发单元	223
11-1 概述	223
一、移相触发电路的种类 (223) 二、对移相触发单元的基本要求 (223) 三、同步电压 (224)	
11-2 单结晶体管移相触发电路	225
一、单结晶体管振荡电路 (225) 二、单结晶体管移相触发电路 (227)	
11-3 锯齿波移相触发电路	230
一、锯齿波的形成 (230) 二、移相控制方式 (231) 三、锯齿波移相触发电路举例 (232)	
11-4 余弦波移相触发电路	234
一、余弦波移相原理 (234) 二、控制角限制 (235) 三、余弦波移相触发电路实例 (236)	
11-5 单稳态移相触发电路	237
一、同步信号环节 (238) 二、移相控制环节 (239) 三、脉冲输出环节 (240) 四、单稳态移相触发电路实例 (240)	
11-6 脉冲变压器	241
一、脉冲变压器的功用和结构 (241) 二、脉冲变压器的等效电路 (242) 三、脉冲顶部失真 (243) 四、脉冲前沿上升时间 (245) 五、脉冲变压器的计算 (245)	
第十二章 半导体励磁调节装置的特性和运行	248
12-1 半导体励磁调节装置的静态调节特性	248
一、励磁调节装置的静态调节特性 (248) 二、励磁调节系统的静特性 (251)	
12-2 半导体励磁调节器的镇定环节	251
一、励磁装置稳定器 (251) 二、电力系统稳定器 (252)	
12-3 励磁调节器的运行方式	256
一、自动、手动运行方式及其切换 (256) 二、两套调节器互为备用的运行方式 (257)	
12-4 励磁调节器中的直流供电电源	259
一、励磁调节器中的直流供电电源的特点 (259) 二、直流供电电源的运行方式 (259)	
第十三章 励磁限制及运行监测	261
13-1 空载励磁限制及励磁过载延时限制	261

一、空载励磁限制及励磁过载定时限制(262)	二、具有反时限特性的励磁过载限制(263)	
三、低频过励限制(264)		
13-2 最大励磁电流限制(瞬时过励限制)		265
13-3 欠励限制(低励限制)		267
一、欠励时静稳限制条件(267)	二、模拟功率圆图的欠励限制接线(270)	三、模拟相角差 δ 的欠励限制接线(272)
四、按直线方程的欠励限制接线(273)		
13-4 运行检测		275
一、可控硅元件控制角 α 的测定(275)	二、无刷励磁系统中励磁电流的测量问题(276)	
13-5 运行监视		277
一、桥臂电流消失的监视(277)	二、串、并联时支路元件的监视(278)	三、无刷励磁系统中交流励磁机两相运行的监视问题(279)
四、脉冲消失的监测(280)		
13-6 励磁系统的信号		281
第十四章 用于直流励磁机的可控硅励磁调节器		283
14-1 可控硅开关式调节器总体工作原理		283
14-2 开关式调节器主回路的工作原理及特性		285
一、调节励磁的基本原理(285)	二、开关调节方式(286)	三、续流方式及调节特性(287)
14-3 开关式调节器关断回路的工作原理		291
一、关断过程(291)	二、开关回路的主要波形(293)	三、带附加可控硅的关断回路(294)
四、由励磁机供电的关断回路(295)		
14-4 可控硅连续式调节器		297
一、总体工作原理(297)	二、移相回路(298)	三、触发回路(299)
四、功率输出回路(300)		
14-5 励磁变压器供电的可控硅调节器		301
第十五章 微机型励磁调节器		302
15-1 概述		302
一、微机励磁调节器的基本配置和基本工作原理(302)	二、微机励磁调节器的调节规律(304)	
三、微机励磁调节器的优点(305)		
15-2 测量部分		305
一、模拟式电量变送器(305)	二、交流接口(306)	三、转速测量(307)
15-3 计算及综合部分		308
一、PID调节算法(308)	二、最优控制算法(309)	三、用软件实现励磁调节器的多种功能(310)
15-4 数字移相触发器		312
一、同步电压整形电路(312)	二、数字移相及脉冲形成(313)	三、脉冲功率放大(315)
参考文献		316

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，自动调节励磁功率单元输出的励磁电流的大小，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。

励磁系统及其调节对象（同步发电机）共同组成的反馈控制系统，称为励磁控制系统。通常用它来分析励磁系统的性能。

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，都需要调节同步发电机的励磁电流。励磁调节应执行下列两项任务。

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，伴随着励磁调节，系统可能恢复到它原来的运行状态，或者由一种平衡状态过渡到另一种新的平衡状态。这种情况，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。

如果系统受到某种微小的扰动，例如负荷随机地发生小的变化，同步发电机在小扰动下的稳定问题，习惯上称为静态稳定。

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，称为暂态稳定。

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。由多台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，母线电压 $\dot{U}$ 的大小认为是恒定不变的，并以 $\dot{U}$ 为电压参考相量。系统的等值网络如图1-1(b)，相量图如图1-1(c)。

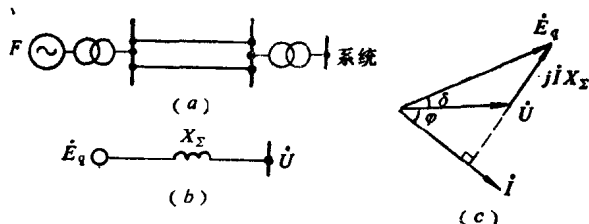


图 1-1 电力系统接线图

(a)系统接线图；(b)等值网络图；(c)相量图

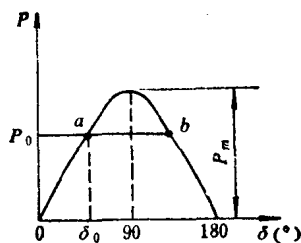


图 1-2 隐极机的功率特性

当不考虑凸极效应和定子电阻时，发电机送出的有功功率 P ，可用下式表示：

$$P = \frac{E_q U}{X_z} \sin \delta \quad (1-1)$$

式中 E_q ——发电机的励磁电势；

X_z ——系统总电抗，为发电机、变压器、线路电抗之和；

δ ——电势 $\dot{E}_q$ 与电压 $\dot{U}$ 之间的相位角，称为功率角。

当发电机的励磁电势 E_q 恒定（即励磁不调节）时，传输功率 P 是 δ 角的正弦函数，其曲线如图1-2所示。 P 的大小取决于 δ 角，故称 δ 为功率角。图1-2的曲线称为同步发电机的功率特性（或称功角特性）。

众所周知，当 δ 在 90° 之前，即在功率特性的上升段运行时（例如图1-2中 a 点），是静态稳定的，在特性曲线的下降段运行（例如 b 点）则是不稳定的。因此，在励磁不调节的情况下，从静态稳定看，功率角极限为 $\delta = 90^\circ$ ，理想的传输功率极限为 $P_m = \frac{E_q U}{X_z}$ 。实际上，为了运行可靠起见，应留有一定的裕度，运行点取得要比功率极限低些。设 P_0 为实际输

送的功率,通常将比值

$$K_p = \frac{P_m - P_0}{P_0} \times 100\%$$

称为该运行工况下的静稳定储备系数。其值的选择,不同的电力系统有不同的规定。例如我国某电力系统规定:在正常工况下 K_p 应不低于15%,在事故后的非常状态下不小于5%^[6]。

图1-2为励磁不调节(E_0 恒定)的功率特性,称为内功率特性曲线。如果励磁系统具有按电压偏差调节的励磁调节器,并设发电机起始在内功率特性曲线的 a 点运行,当角度 δ 增加,由图1-1(c)相量图可以看出,发电机端电压要减小一些。这时励磁调节器将增加发电机的励磁,于是 E_0 增大,运行点将过渡到波幅较高的另一条内功率特性曲线上。同理,当角度 δ 再增加,励磁调节器又增加发电机的励磁,运行点又将过渡到波幅更高的一条内功率特性曲线上。这样一来,具有自动励磁调节时,由波幅连续增高的一族内功率特性曲线上的各运行点构成了一条新的功率特性曲线。图1-3中绘出了几条有代表性的功率特性,其中曲线1代表不调节励磁的功率特性;曲线2代表具有比较灵敏、快速的励磁调节器,能保持 E_0 恒定的功率特性;曲线3代表具有理想灵敏度和快速性的励磁调节,能保持发电机端电压恒定的功率特性。它是一条理想的波幅最高的功率特性,实际上只能作到接近这条曲线运行。

图1-3表明,采用自动调节励磁以后,如果仍按功率 P_0 运行,则提高了静稳定储备;如果按规定的静稳定储备系数运行,则可增大输送功率。

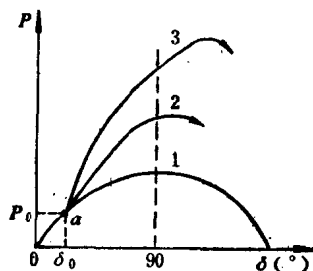


图 1-3 调节励磁对功率特性的影响

由此可见,质量优良的励磁系统,改变了实际运行的功率特性,提高了功率极限,而且还可以扩大稳定区,使同步发电机能在 $\delta > 90^\circ$ 的所谓人工稳定区稳定地运行。

从另一方面讲,灵敏快速的励磁调节,相当于部分或全部补偿了发电机的内电抗,所以功率特性如图1-3中的曲线2或3所示。现代电力系统中,发电机组的单机容量越来越大。对于大容量发电机,由于采用内冷、气隙减小、转子直径受机械强度限制等原因,机组的标么电抗值有所增大,而转子的惯性常数有所减小,这对稳定是不利的。但是,快速的励磁调节,能够补偿发电机内电抗,提高机组运行的稳定性,这一点是很重要的。

必须指出,对于长距离输电的发电机组,在重负荷运行的某些情况下,按电压偏差调节的比例式快速励磁调节系统,会降低系统的阻尼作用,导致发电机组产生低频振荡。国内外解决这一问题的方法,是在这种励磁调节器上附加一个补偿环节,称为电力系统稳定器(PSS)。另外,近几年来研究表明,采用线性最优励磁控制的半导体励磁系统,能有效地抑制各种频率的低频振荡。

综上所述,发电机的励磁调节,特别是采用性能优良的励磁系统,例如半导体励磁系统,对提高静态稳定,效果是显著的,而且是最经济和最有效的措施。

2. 励磁对暂态稳定的影响

当发电机受到大的扰动时,能否继续保持同步运行,这属于暂态稳定研究的问题。总的来说,调节励磁对暂态稳定的影响没有对静态稳定那样显著。励磁系统对提高暂态稳定而言,表现在快速励磁和强行励磁的作用上。以图1-1单机对无穷大系统的情况为例,当高压网络中发生短路,在短路未切除的一个短暂时间内,同步发电机的端电压和传输的功率都将显著降低,而原动机的调速器在暂态期间(例如1s以内)尚来不及动作。这就要求励磁系统快速地动作,并强行励磁到顶值,使 E_d 增大,使传输功率不致过分降低,并使发电机的功率特性曲线的加速面积减小,制动面积增大,以阻止发电机摇摆角 δ 过度增大,以利于提高暂态稳定。但由于发电机励磁回路时间常数的影响,即使是快速响应和高顶值电压(或称高顶值倍数)的励磁系统,对振荡的第一个周期,摇摆角度通常只能降低几度,或者说只能使发电机的暂态稳定功率极限略有提高。

然而,新型的半导体励磁系统在下列两个方面是有效的,即减小第一个摇摆的振幅和使后继的摇摆都小于第一个摇摆,特别是抑制第二个周期的角度摇摆。在短路切除后,转子摇摆到最大角度,受制动力矩作用又摆到最小角度,在这个阶段往往容易失步。如果励磁系统在这个阶段发挥作用,当转子加速,向最大角度摆动时,继续进行强励以增加制动作用;当角度开始向回摆动时,励磁系统进行减磁,使励磁电流及制动作用急剧减小,这样便减小了最初几个周期的摆幅。如果再引入附加控制信号和镇定环节,提供合适的阻尼转矩,使振荡迅速平息下来,并过渡到较高的事故后的功率特性曲线上运行,这就提高了暂态稳定。

在现代大容量互联系统中,也可能遇到这样的情况,第一个摇摆之后,在后继的摇摆中,由于各种振荡方式的互相增强,加上系统本身固有阻尼的微弱,可能使系统在第一个摇摆以后产生暂态不稳定现象。但新型励磁系统使用适当的补偿,是能够改善这种情况的。

另一方面,在系统发生短路期间,具有高顶值电压的快速励磁系统,能使发电机及时向系统提供大量的无功功率,使系统电压得到一定程度的提高,这就改善了在系统中的电动机的运行条件。

由上述可知,新型励磁系统改善暂态稳定,依靠的是快速响应和高的顶值电压。图1-4表示励磁系统时间常数 T_L 与暂态稳定临界电抗的关系^①。所谓临界电抗就是事故切除后临界功率特性(制动面积等于加速面积)相应的 E 、 U 间的电抗。由图可见, T_L 在0.3s以下效果显著。旧式的直流励磁机系统,时间常数 T_L 为1s左右,交流励磁机带硅整流励磁方式, T_L 稍小一些,但一般大于0.3s,故对改善暂态稳定效果不显著。对于可控硅整流直接供给转子励磁的方式, T_L 可忽略,故效果最好。图1-5表示励磁系统顶值电压与暂态稳定临界电抗的关系。顶值电压是励磁系统所能提供的最高励磁电压。图中以发电机空载额定电压时的励磁电压为基值。由图1-5可见,顶值电压高可改善暂态稳定,但顶值电压标么值高到7以上,效果就小了^[43]。另外,如果励磁系统的时间常数 T_L 较大(例如图中 $T_L=0.85s$),则提高顶值电压效果并不明显。只有快速响应的励磁系统,又具有较高的

① 图1-4及图1-5取自参考文献[43]。

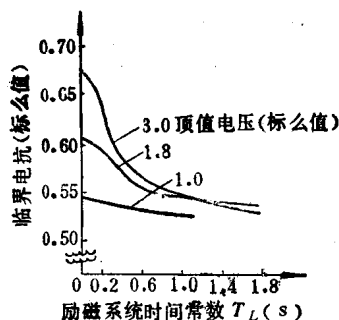


图 1-4 励磁系统时间常数与暂态稳定临界电抗的关系

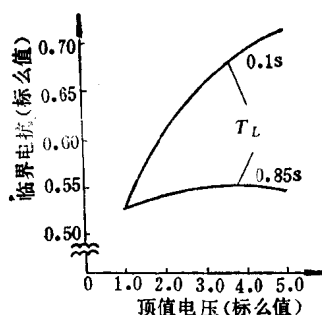


图 1-5 励磁系统顶值电压与暂态稳定临界电抗的关系

顶值电压，对于改善暂态稳定才有较显著的作用。

1-2 半导体励磁系统的发展

同步发电机传统的励磁方式是采用同轴的直流发电机作为励磁机，提供发电机励磁绕组的励磁电流。通过励磁调节器改变励磁机的励磁，来改变供到转子的励磁电压，从而调节了转子的励磁电流。直流励磁机方式存在下列问题，一是直流励磁机受制造容量限制；二是整流器和炭刷维护较麻烦；三是励磁调节一般较慢。这些问题使得直流励磁机方式无法适应电力系统发展的需要，半导体励磁系统就是在解决这些矛盾的情况下发展起来的。所谓半导体励磁就是采用大功率硅整流器或可控硅组成整流装置，把交流励磁电源变换为直流励磁电源。这样便取消了传统的直流励磁机这个环节。

大型水轮发电机，通常需要高压远距离输电。电力系统稳定是个突出问题，要求其励磁系统具有较高的励磁电压顶值和较快的励磁电压上升速度。直流励磁机要满足这些要求是有困难的，因此必须采用新的励磁方式。50年代和60年代初，在大型水轮发电机组上，曾经采用离子整流器的励磁系统，把交流电源经大功率离子整流器（汞弧整流器、引燃管等）整流后，供给转子电流。励磁电压可在离子管的栅极上进行控制。这种励磁方式称为离子励磁，技术指标较好，能满足对大型水轮发电机励磁的要求。但是占地面积较大，控制线路较复杂，运行和维护比较麻烦，没有得到普遍推广。60年代以来，随着大功率可控硅（可控硅又称硅晶体闸流管，简称硅晶闸管）制造技术和应用技术的发展及其可靠性的提高，大型水轮发电机便趋向采用半导体励磁方式了。

对于移动式发电站、小型孤立电站和农村小型水电站的发电机组，因为直流励磁机既增加了发电设备的重量和成本，又给发电设备增加了复杂性，而且直流励磁机的整流器和炭刷容易产生火花和磨损，增加了维护工作，降低了发电机运行的可靠性。因此，对这类小容量发电机，从1940年以后开始研究采用固体整流器励磁方式。那时用氧化铜整流器、硒整流器、硅整流器等构成励磁系统，其特点是，使用维护简单、体积小、工作寿命长。但不能直接控制其输出励磁电压，发电机的电压调整能力差。自从可控硅技术发展以来，这类小型发电机也逐步采用了可控硅励磁方式。

新型的半导体励磁系统，特别是可控硅励磁，60年代初国外才开始在中型发电机上采用。但发展很快，到60年代末和70年代初，已得到普遍的应用。在大容量同步发电机的励磁装置方面，用半导体励磁代替传统的直流励磁机，根据许多实际运行的结果，证明其优越性是肯定的。

我国在1958年开始了水轮发电机自复励整流器励磁系统的试验研究工作（当时利用水银整流器作整流元件）。60年代中期开始在小机组上进行半导体励磁方面的研究试验工作，不久就逐步用到中型和大型机组上。由于进行试验研究的单位较多，发展较快，国外半导体励磁的各种类型，现在国内基本上都有了。我国新建的单机10万kW以上的汽轮发电机几乎都采用半导体励磁方式。小型发电机采用半导体励磁也较普遍。只是2.5万kW及5万kW一类中型汽轮发电机还保留或采用直流励磁机方式。已运行的大型水电站，一部分机组仍是直流励磁机方式，但具有可控硅励磁调节器。新建的水电站都优先考虑了半导体励磁方式。

1-3 半导体励磁系统的分类

半导体励磁是把交流励磁电源经半导体整流装置变为直流后进行励磁的。根据交流励磁电源的种类不同，同步发电机的半导体励磁可分为两大类。

第一类是采用与主机同轴的交流发电机作为交流励磁电源，经硅整流器（即硅二极管）或可控硅进行整流，供给励磁。这类励磁系统由于交流励磁电源来自主机之外的其他独立电源，故称为他励整流器励磁系统（包括他励硅整流器励磁系统和他励可控硅整流器励磁系统），简称他励系统。同轴的用作励磁电源的交流发电机称为交流励磁机（也称同轴辅助发电机）。

这类励磁系统，按整流器是静止或是旋转、以及交流励磁机是磁场旋转或电枢旋转的不同，又可分为下列四种励磁方式：

- （1）交流励磁机（磁场旋转式）加静止硅整流器；
- （2）交流励磁机（磁场旋转式）加静止可控硅；
- （3）交流励磁机（电枢旋转式）加旋转硅整流器；
- （4）交流励磁机（电枢旋转式）加旋转可控硅。

上面（3）、（4）两种方式，硅整流元件和交流励磁机电枢与主轴一同旋转，直接给主机转子励磁绕组供励磁电流，不需要经过转子滑环及炭刷引入，故称为无刷励磁方式，或称为旋转半导体励磁方式。相对于旋转半导体而言，（1）、（2）两种方式的半导体整流元件是处于静止状态的，故称为他励静止半导体励磁方式。

第二类是采用变压器作为交流励磁电源，励磁变压器接在发电机出口或厂用电母线上。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整流器励磁系统，简称自励系统。在他励系统中，交流励磁机是旋转机械，而自励系统中，励磁变压器、整流器等都是静止元件，故自励系统又称为全静态励磁系统。

自励系统也有几种不同的励磁方式。如果只用一台励磁变压器并联在机端，则称为自