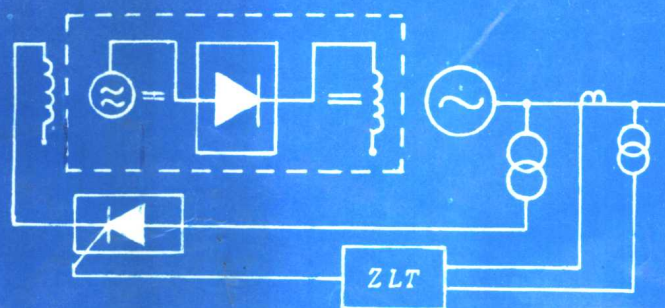


同步电机 现代励磁系统及其控制

黄耀群 李兴源 编著



成都科技大学出版社

同步电机

现代励磁系统及其控制

黄耀群 李兴源 编著

成都科技大学出版社

(川)新登字 015 号

责任编辑：韩 果

封面设计：张 俊

同步电机现代励磁系统及其控制

黄耀群 李兴源 编著

成都科技大学出版社出版发行

四川省新华书店经销

射洪县教学印刷厂印刷

开本：787×1092 1/16 印张：21.875

1993年12月第一版 1993年12月第一次印刷

印数：1—3000 字数：500千字

ISBN7—5616—2703—3/TM·20

定价：18.00元

内 容 提 要

本书系统地阐述了同步电机(发电机和电动机)现代励磁系统的基本工作原理、线路特征、励磁调节规律、运行特性及其参数计算、装置的监测与保护等。同时介绍了近代同步发电机励磁系统和励磁调节器的改进和新的发展趋势。对于同步电机的微机励磁控制和监测系统,亦介绍了其工作原理及应用实例。对同步电机的无刷励磁方式及同步电动机励磁系统亦作了较详细地叙述。

本书按照专业教学要求进行编写,论述深入浅出,各章均附有思考题和练习题,便于自学。取材注重实际应用,详细地列举了各种同步电机的励磁系统原理接线图和运行特性分析。本书可作为电力类专业大学本科和大专生教材,亦可作为研究生参考书,对从事有关电力专业方面的研究、设计、制造和运行以及管理人员亦可参考。

前 言

电力系统中的同步发电机为其重要组成部分,励磁系统则是保证同步发电机良好运行性能的核心。随着电力工业的发展,大容量、超高压、远距离输电系统日愈增多,如何保证电力系统的稳定运行,显得更加重要。国内外电力科学工作者都十分重视同步电机励磁控制系统的研究。六十年代以来,电力电子技术在励磁系统中得到广泛应用,采用半导体励磁方式取代原有的直流励磁机励磁方式,已较为普遍。近年来,微机励磁控制及现代控制理论已逐渐应用于同步电机励磁控制系统,今后必将成为同步电机现代励磁系统发展的一个重要方面。

全书共十三章计 50 余万字。前十章论述半导体励磁系统的基本原理、调节规律以及装置运行时的监测与保护等。后三章介绍了现代励磁控制系统的改进和新的发展趋势以及微机励磁与监控系统。书中还分析了同步电机无刷励磁及同步电动机励磁系统。编写时考虑到了课程间的衔接,避免内容重复。教材叙述深入浅出,并注重实际应用。书中还附有思考题及练习题,便于自学。

本书系作者收集了有关同步电机励磁系统及其控制方面的专著和论文,并结合科研和教学实践编著而成的。该书适用于有关专业大学本科及大专教材,亦可作为研究生参考书,并可供有关方面的工程技术和管理人员参考。

在编写过程中,作者针对电力系统有关专业教学要求,本着学习先进经验,博采众家之长,取其精粹为宗旨。既考虑了专业课程教学需要,又兼顾到自学者的基础,并注重联系生产实际。

本书在编写过程中,得到同行专家的支持,东方电机厂总设计师马国农高工和成都科技大学何开杰教授对初稿进行了悉心的审订;成都科技大学电力系和电气技术教研室的领导和同志对本书的出版给予了大力支持和帮助;许多同志为本书的编辑、排印和校对等付出了辛勤的劳动。为此,谨表示衷心的感谢!同时,本书在编写时,参阅和引用了大量参考文献,在此一并向有关作者致以谢意!

限于编著者的水平和时间,书中难免有疏漏、甚至错误之处,敬请读者不吝赐教!

编著者笔

1993 年

2022/11/15

目 录

前 言

第一章 同步电机现代励磁控制系统概述	(1)
1-1 同步电机励磁调节的作用与要求	(1)
1-2 半导体励磁系统的发展简介	(2)
1-3 半导体励磁系统的分类	(4)
1-4 各种半导体励磁系统的组成和特点	(5)
1-5 同步电机现代励磁调节器 ZLT 简介	(12)
思考题及练习题	(14)
第二章 同步电机励磁控制系统主回路的分析与计算	(15)
2-1 主整流电路的换流压降及外特性	(15)
2-2 交流励磁机带不控整流桥时, 整流工作状态的分析和换相电抗的计算	(17)
2-3 三相桥式整流电路的故障分析	(27)
2-4 励磁系统主电路的参数计算	(33)
思考题及练习题	(35)
第三章 同步电机灭磁及转子过电压	(37)
3-1 同步电机灭磁及其计算	(37)
3-2 单独对励磁机灭磁	(38)
3-3 对常值电阻放电灭磁	(39)
3-4 对非线性电阻放电灭磁	(41)
3-5 采用灭弧栅灭磁	(43)
3-6 利用全控桥逆变灭磁	(45)
3-7 同步电机带半导体整流励磁时, 转子绕组的过电压	(47)
思考题及练习题	(52)
第四章 自并励励磁系统	(53)
4-1 概述	(53)
4-2 自并励励磁系统主电路的接线方式	(53)
4-3 自并励励磁发电机的起励	(55)
4-4 自并励发电机空载建压过程的分析	(58)
4-5 自并励发电机短路过程的分析及短路电流计算	(60)
4-6 自并励励磁系统运行性能的分析	(67)
思考题及练习题	(70)
第五章 自复励励磁系统	(71)
5-1 概述	(71)
5-2 直流侧并联自复励励磁系统	(71)
5-3 直流侧并联自复励发电机运行中几个问题的分析	(77)
5-4 交流侧复合相复励主电路的分析	(80)

5-5	交流侧串联自复励励磁系统	(86)
5-6	交流侧串联自复励励磁系统中几个问题的探讨	(89)
5-7	交流侧磁耦合自复励励磁系统	(90)
	思考题及练习题	(96)
第六章	他励半导体励磁系统——无刷励磁同步电机	(98)
6-1	他励静止硅整流器励磁系统	(98)
6-2	他励静止可控硅励磁系统	(100)
6-3	无刷励磁同步电机的结构原理	(101)
6-4	无刷励磁同步电机运行参数的监测	(108)
6-5	无刷励磁同步电机旋转整流器的故障监测、报警与保护	(112)
6-6	微型计算机在无刷励磁同步电机监测系统中的应用	(117)
6-7	无刷励磁同步电机的灭磁与制动	(121)
	思考题及练习题	(123)
第七章	同步发电机的自动励磁调节器	(124)
7-1	概述	(124)
7-2	测量、比较单元	(130)
7-3	综合放大单元	(151)
7-4	移相触发单元	(155)
	思考题及练习题	(157)
第八章	同步发电机励磁控制系统中的辅助电路	(159)
8-1	励磁校正(或补偿)电路	(159)
8-2	励磁限制电路	(161)
8-3	励磁稳定电路	(172)
8-4	励磁系统监视与过电压保护电路	(174)
8-5	励磁起励电路	(180)
8-6	手动——自动切换电路	(181)
	思考题及练习题	(183)
第九章	励磁控制系统的数学模型及其动态性能分析	(184)
9-1	概述	(184)
9-2	调节励磁对同步发电机稳定性的影响	(186)
9-3	同步电机在 d、q、o 坐标系统中的基本方程式	(190)
9-4	同步电机的电磁暂态方程	(194)
9-5	同步发电机强行励磁时, 电磁暂态过程的分析	(199)
9-6	励磁控制系统动态性能的分析与计算	(202)
9-7	励磁控制系统数学模型的建立	(206)
9-8	开环放大倍数与静态电压调节精度的分析、计算	(212)
	思考题及练习题	(216)
第十章	同步电动机的励磁系统及其控制	(218)
10-1	概述	(218)
10-2	同步电动机励磁调节的理论分析	(221)

10-3	同步电动机励磁调节方式	(223)
10-4	同步电动机起动、投励及同步化过程	(228)
10-5	同步电动机励磁调节器的测量、比较电路	(236)
10-6	同步电动机励磁调节器的移相、触发电路	(238)
10-7	同步电动机的自动投励电路	(240)
10-8	同步电动机的全压投切电路	(243)
10-9	同步电动机的无功补偿电路	(244)
10-10	同步电动机励磁系统的辅助电路	(246)
	思考题及练习题	(249)
第十一章	同步电机励磁调节器的改进和发展——新型励磁调节器	(250)
11-1	概述	(250)
11-2	强力式励磁调节器	(250)
11-3	电力系统稳定器 (PSS)	(253)
11-4	最佳励磁控制器	(263)
11-5	励磁调节的综合控制	(270)
11-6	自适应励磁控制器	(275)
11-7	静止励磁系统的正向和负向励磁电流调节	(282)
	思考题及练习题	(285)
第十二章	同步电机励磁结构的改进和发展——新型励磁系统	(287)
12-1	概述	(287)
12-2	分裂绕组转子 (d、w、r) 同步发电机的励磁系统	(288)
12-3	异步化同步发电机 (a、s、m) 的励磁系统	(293)
12-4	交流励磁同步电机 (as、e、s) 的励磁系统	(300)
12-5	GENERREX 励磁系统	(307)
	思考题及练习题	(312)
第十三章	同步电机的微机励磁控制系统	(314)
13-1	概述	(314)
13-2	同步发电机微机励磁控制系统的工作原理	(314)
13-3	同步发电机微机励磁控制系统的硬件组成	(316)
13-4	同步发电机微机励磁控制系统的软件概貌	(318)
13-5	微机励磁控制的分辨率	(323)
13-6	微机励磁控制系统的电磁干扰与防止	(323)
13-7	同步电动机微机励磁控制的基本原理	(324)
13-8	矢量控制在同步电动机励磁调节中的应用	(326)
13-9	同步电动机微机励磁控制系统设计	(328)
13-10	应用单片微机控制同步发电机的励磁	(334)
	参考文献	(339)
	附：同步发电机及同步电动机的励磁装置电气原理图四幅	

第一章 同步电机现代励磁控制系统概述

1-1 同步电机励磁调节的作用与要求

励磁控制系统是同步电机（发电机与电动机）的重要组成部分，它的特性好坏直接影响到同步电机运行的可靠性与稳定性。老式励磁系统，多采用直流励磁机及机电型或电磁型调节器。由于这种系统固有的弱点（运行火花，易磨损，维护工作量大，且响应速度慢等），已不能满足日益发展的电力系统的要求。随着大功率半导体元件的广泛应用，必须逐步取代老式的机电型励磁系统。近几十年来，在同步电机励磁系统中推广了各式各样的半导体励磁方式。但无论那种励磁方式，都必须具有如下所述的作用，以满足电力系统的要求：

一、提高电力系统稳定运行的能力

电力系统无论受到任何扰动，通过调节同步电机的励磁，应有助于提高系统稳定运行的能力，如当电力系统受到小的干扰或大的干扰，导致电机转速离开同步出现任何小的或大的变速状态，这时系统的静态稳定性或动态稳定性亦或暂态稳定性将受到不利的影晌。励磁控制的作用要能使这种影响得到抑制或消除，保持其同步稳定性。

二、维持电力系统的电压水平

当电网负载增大时，发电机的端电压下降，如图 1-1 所示。曲线 A 为没有自动调节励磁器的同步发电机外特性，而曲线 B 为有自动励磁器时的外特性。装有自动励磁调节器后，其励磁电流可随负载的增加而增加，使发电机端电压维持在一定的水平上。相反，在电机甩负荷后，自动励磁调节器可以及时减小励磁电流，以限制机端电压不致过份升高。自动调节同步电机的励磁，可以维持供电系统的无功功率或功率因数保持恒定。这些都是保证电力系统电压恒定十分重要的因素，而电压恒定则是供电质量的一个重要标志。

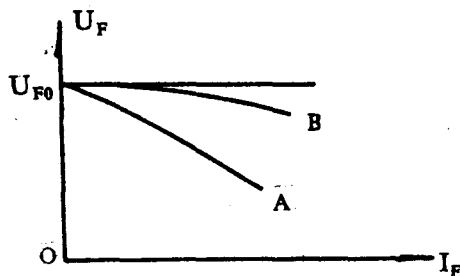


图 1-1 同步发电机外特性

三、提高同步电机功率极限和电力系统传输功率的能力

与电网并联运行的隐极式同步发电机，其输出功率与发电机的空载电势 E_{q0} 、供电系统用户端电压 U_c 、以及供电系统总电抗 X_z 有如下的关系：

$$P = \frac{E_{q0} U_c}{X_z} \sin \delta \quad (1-1)$$

式中 δ 为励磁电势 E_{q0} 与 U_c 之间的夹角（即功率角）， $X_z = X_d + X_r$ 为供电线路、变压器电抗， P 随 δ 变化的特性曲线如图 1-2 所示，由此特性可知，在 E_{q0} 为常数的情况下，系统最大传输功率在 $\delta = \frac{\pi}{2}$ 处，但系统不能运行在这点上，因为它是不稳定点，要使系统稳定运行，则其功率角 δ 一定要小于 90° 。通常发电机总是工作在某一小于 90° 的运行点。如图 1-2 中 δ_0 所示。当负载突然增大时，励磁装置自动增加励磁电流，发电机的电势 E_{q0} 增大，曲线由 1 变为 2，则发电机在同样的

δ_e 角下, 可以输出更多的功率, 即由 P_1 提高到 P_2 。励磁电流的增大, 提高了系统传输功率的能力, 同时也使发电机能抗拒更大的干扰, 提高了发电机传输功率的能力。

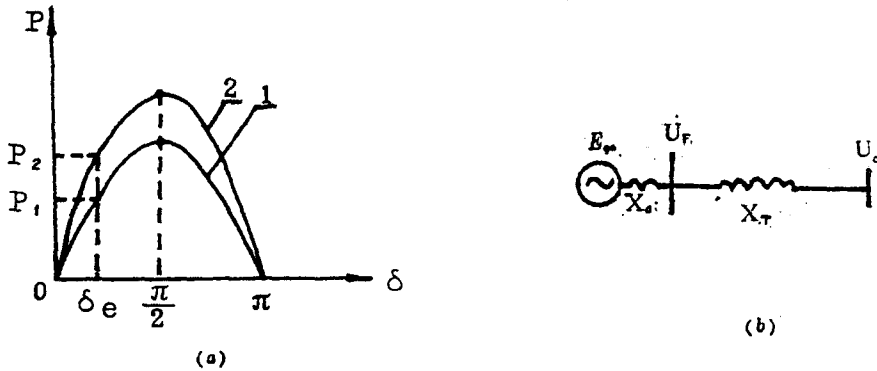


图 1-2 同步机的功角特性

四、改善电力系统及同步电机的运行状态

1. 提高继电保护装置的可靠性

当系统发生短路故障时, 通过自动调节同步电机励磁, 从而使短路电流衰减得很慢, 甚至不衰减, 这就保证了短路电流即使超过继电保护的整定值, 继电保护装置仍能在整定的时间准确可靠地动作。

2. 平衡并网运行时各台电机之间的无功功率, 使之合理地分担系统所需的无功。

当并网运行的多台发电机, 其中一台因失磁转入异步运行时, 通过调节其他电机的励磁, 以补充系统无功的缺额, 避免系统电压下降。其次, 通过自动调节励磁, 还可以将系统需要的总无功功率合理地分配给各台发电机, 并根据运行需要自动调节其分配比例。

3. 当系统短路故障消除, 自动调节励磁使其加快系统电压恢复, 保证供电的可靠性。

4. 通过控制励磁, 除保持同步发电机的恒压运行外, 还可以使系统作恒无功或恒功率因数运行, 以提高电力系统运行的经济性。

五、对同步电动机的励磁调节器还应满足以下要求:

1. 能适应同步电动机在“起动”、“投励”及“牵入同步”的过程的不同阶段内, 按需要对励磁自动调节。

2. 当同步电动机或调相机对系统作无功补偿运行时, 调节励磁应使电机对系统具有较好的无功补偿效果和一定的进相能力。

3. 根据机械负载性质不同、负载轻重不同, 励磁调节器应具有灵活的运行方式, 确保供电系统的节能效果。

1-2 半导体励磁系统的发展简介

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, 提供发电机的励磁电流。通过励磁调节器改变励磁机的励磁来改变供给转子的励磁电压, 以调节同步发电机的励磁电流。这种励磁方式存在下列问题: 一是, 直流励磁机受制造容量限制; 二是, 整流子和炭刷维护较麻烦; 三是, 励磁调节响应较慢。这些问题使得直流励磁机励磁方式无法适应电力系统发展的需要。半导体励磁就是为适应电力系统发展需要而出现的一种新的励磁方式, 所谓半导体励磁是采用大功

率的硅整流器或可控硅组成整流电路，用电子整流方式将交流转换成直流，以取代直流励磁机用机械整流方式获得直流励磁电源。

随着国民经济建设的需要，电力系统的容量和规模愈来愈大，从提高电力系统运行的稳定性、经济性和可靠性等要求出发，对同步电机的励磁提出了新的研究课题。五十年代以前，电力系统和发电机单机容量一般不大，输电线路距离不很远，同步电动机应用亦不广。因此，以老式直流励磁机和电磁式或机电型自动励磁调节器为主的励磁系统，基本上能满足当时的要求。同时，限于当时的条件也只能发展到那个水平，电力系统和工业用电进一步发展以后，在同步电机励磁方面便出现了下列一些新问题：

一、发电机制造趋势向单机大容量发展。因为采用大容量的发电机可以减少电厂的基建投资，降低厂用电，减少单位千瓦的铜、铁量消耗，机组效率较高，特别是核电站的发电机。另一发展趋势是采用低短路比和高功率因数。这样在同等的有功功率下，可以减少电机有色金属用量，降低电机重量和成本，但却使电机运行的稳定性恶化了。如果仍采用传统的直流励磁机励磁方式，显然是不适宜的。

二、发电机单机容量的增长需要的励磁功率显著增加。现代发电机需要的励磁功率一般为发电机额定功率的 0.4% 左右。例如，额定功率为 24 万千瓦，功率因数 0.9，142 转/分的水轮发电机，励磁功率就需要 2350 千瓦。又如，额定功率为 60 万千瓦，功率因数 0.9，3000 转/分的汽轮发电机，励磁功率为 2650 千瓦。同轴式特别是高速的直流励磁机，容量超过 500 千瓦时就很难采用，若是采取降低直流励磁机转速办法来解决，但电机体积增大且很不经济。

三、最初研制出来的交流励磁与硅整流二极管励磁系统以及静止可控硅励磁系统。取消了机械整流器，解决了直流励磁机制造容量受到限制的问题。但是静止式可控或不可控励磁系统的直流输出电流仍然需要通过滑环送到转子绕组。当通过滑环的电流超过 8000—10000A 时，将受到滑环极限容量的限制，若增加滑环数，对电机外形尺寸和制造成本都会增加。

四、电网的发展趋势是采用超高压、远距离输电。如目前国外正在研究 1000 千伏超高压远距离输电，传输容量很大的系统，而稳定性则是一个重要课题，而传统的励磁系统显然不能满足要求，需要采用高强励倍数、高励磁响应比的现代励磁系统，以便在当系统振荡时能提供足够的正阻尼效应，以提高运行稳定性和可靠性。

五、60 年代以来电力电子技术，计算机以及现代控制理论等新兴科学相继在电力系统中应用并发展，为充分发挥励磁控制的作用，为解决同步电机和电力系统的稳定运行创造了条件。国内外的科技工作者相继研究成功了强力式励磁调节器、电力系统稳定器、最佳励磁控制器以及自适应控制器等，特别是微型计算机在励磁系统中的应用是今后同步电机自动调节励磁的发展方向。

六、早在五十年代就有人提出：“双轴励磁同步电机”，即在 d 、 q 轴上均设置有励磁绕组，分别加直流控制；“异步化同步发电机”，即让同步电机转速偏离同步速运行；“交流励磁同步电机”，即电机转子为多相绕组，外部通入多相超低频交流电流励磁。这些新结构的同步电机前人都作过模型试验，证明从原理和制造上都是可行的。但当年未能推广应用是限于励磁自动调节的技术条件。从目前技术发展的水平看，已具备实现设计、制造这类新型同步电机及其励磁装置的条件。根据资料介绍，苏联研制成功的 200MW 异步化汽轮发电机且并网运行已多年，效果良好。目前正在设计制造 500MW、800MW 的同类发电机。日本研制成功 22MW、85MW 的交流励磁水轮同步发电机已投入运行。400MW 的同步发电机亦将问世。这些新型同步发电机从原理上摆脱了运行稳定性受“功角”的限制，而且可以在四个象限内运行。是大型同步发电机发展的一个重要方面。

以上几点都说明研制适应大型同步电机和超高压远距离输电电网的现代励磁系统是十分迫切

需要的。从当今科学技术的发展水平来看亦是可能的。首先是，电力电子技术的迅猛发展，高电压、大功率半导体元件（如 4KV、10000A 及以上的晶闸管）和其它电子元件、集成电路等相继问世，且性能不断改进，可靠性日益提高，为励磁系统发展提供了重要条件。其次是，微型计算机应用于励磁系统的发展趋势日益加快，16 位的微机处理 CPU 已大量使用，为励磁系统采用新技术提供了条件。再其次是，现代控制理论在工业上的应用已为新型励磁机的推广提供了理论基础。励磁系统中采用多变量输入和多信号反馈控制方式的研究已取得了成效。如最佳励磁控制器、自适应励磁控制器或自校正控制器等都是很有发展前途的新型励磁调节装置。

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。六十年代中期开始在小型机组上进行半导体励磁方面的研究试验，不久就应用于中型和大型机组上。由于进行试验研究的单位较多，发展较快，经过这十多年的努力，国外已有的各类半导体励磁系统，在国内已能生产了，只是元件质量和制造工艺有待于提高。目前我国新造的单机 30 万千瓦以上的汽轮发电机和 32 万千瓦的水轮发电机都采用国产的励磁装置。小型发电机采用半导体励磁也较普遍，只是 2.5 万千瓦及 5 万千瓦一类小型汽轮发电机还少量选用直流励磁机励磁方式。早年投运的中小发电机，虽然大都是直流机励磁方式，但许多机组经改造后都具有可控硅励磁调节功能。目前新造的水、火电站和核电站，其发电机励磁都是采用现代半导体励磁系统。对于具有新型结构同步发电机及其励磁控制装置的设计、制造的研究正在进行，不久亦将进行工业运行试验。

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。

一、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，经硅二极管或可控硅进行整流，供给电机励磁。这类励磁系统的交流励磁电源是来自主机之外的其它独立电源，故称为他励半导体励磁系统（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，其中与发电机同轴旋转的交流发电机称为交流励磁机。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是电枢旋转的不同，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）加静止可控硅整流器；
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）加旋转可控硅整流器。

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，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。

二、第二类是采用变压（流）器作为交流励磁电源，励磁变压（流）器接在发电机出口或厂用电母线上。因励磁电源系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，亦简称自励系统。在他励系统中，交流励磁机是旋转的，而自励系统中，励磁变压（流）器、整流器等都是静止的，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二者结合起来，则

构成所谓自复励方式。将二者有机地组合，又可得到下面四种励磁方式：

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。

除了他励和自励两类主要的半导体励磁系统外，还有一种介乎两者之间的所谓谐波励磁系统。它的主发电机定子槽中嵌有单独的附加绕组，称为谐波绕组。利用发电机气隙磁场中的谐波分量，（通常是利用其中的三次谐波分量），在附加绕组中感应谐波电势，作为励磁电源，经半导体整流后回送给发电机作励磁。谐波励磁方式的特点是，谐波绕组电势随发电机负载变动而改变。当发电机负载增加或功率因数降低时，谐波绕组电势随之升高；反之，当发电机负载减小或功率因数增高时，谐波绕组电势随之降低。因此，这种谐波励磁系统具有正反馈调节作用，与发电机具有复励的作用相似。当电力系统中发生短路时，谐波绕组电势增大，对发电机进行强励。这种励磁方式接线简单、可靠、快速。国内一些制造单位曾用在 2.5 万千瓦及以下的小容量机组上，运行效果尚好。但具有这种励磁方式的发电机并联运行时的无功分配还存在问题，有待进一步研究解决。此外，双绕组电抗分流励磁方式与交流侧串联自复励相似，在小型发电机中用得亦较多。

除上述各种半导体励磁系统外，还有一种用于直流励磁机的可控硅励磁方式。由于当前我国的一些电厂中还装有不少的直流电机励磁机组，故采用直流励磁机带可控硅控制其励磁电流的励磁方式亦不少，主要是用于改造传统的直流机励磁励磁方式。由于可控硅电路只控制直流电机的励磁电流，故同步电机的励磁仍取自直流励磁机。

三、半导体励磁综合分类：综上所述各种励磁方式列于表 1-1。

表 1-1 半导体励磁分类表

带旋转部件的励磁	他励方式	直励磁机	加可控硅电路控制直流电机的励磁电流
		交流励磁机	<ol style="list-style-type: none"> 1. 加静止硅整流器 2. 加静止可控硅整流器 3. 加旋转硅整流器（无刷励磁） 4. 加旋转可控硅整流器（无刷励磁）
	三次谐波绕组		谐波励磁方式（不可控或可控）
全静态励磁	自励方式	励磁变压器	加静止可控硅整流器
		励磁变压器 复励变流器	<ol style="list-style-type: none"> 1. 分别带可控和不可控整流器在直流侧相并联 2. 变压器与变流器在交流侧并联后加可控或不可控整流器
		同上	<ol style="list-style-type: none"> 1. 分别带可控和不可控整流器在直流侧相串联 2. 变压器与变流器在交流侧串联后加可控硅整流器
	相复励变压器（KXB）	电压源与电流源绕组在 KXB 的原边经磁路相复合，由付边输出送至整流源。	
双绕组电抗器		双绕组电抗分流式（不可控或可控）	

1-4 各种半导体励磁系统的组成和特点

无论是同步发电机或电动机，励磁系统都包括两部分：即励磁系统主回路和自动励磁调节器。

此外，还有辅助单元，如：限制器、补偿器、稳定器以及起励单元等。主回路是由励磁电源、主整流器、灭磁电路以及过流过电压保护电路组成。自动励磁调节器（简称 ZLT），包括：测量和比较、综合放大，移相和触发等三部分。现就常用各类励磁系统的组成，分别介绍于下。

一、他励励磁系统

这类系统的共同特点是，用同轴的交流励磁机作为主整流器的电源。励磁电源独立。不受电力系统运行情况变化的影响。

根据所用整流器情况的不同，他励系统的组成又可分为下列几种形式。

1. 交流励磁机带静止硅整流器励磁方式

这种励磁系统属于他励励磁方式，其原理如图 1-3 所示。发电机的励磁电流通常由 100 赫交流励磁机 JL 经硅整流装置 GZ 供给。它是由传统的直流机励磁方式演变而来的。众所周知，直流励磁机电枢产生的是交流电势，经过整流子（又称换相器）的机械整流作用，变成直流电输出，供给发电机励磁。现在把交流励磁机产生的交流电势用静止硅整流器整流，来代替输出直流供给发电机励磁。这样就用静止的半导体整流器代替了转动的机械整流器，国外称之为无整流子励磁方式。这不但解决了整流子和炭刷运行维护问题，而且由于交流励磁机的制造容量可以不受限制，故能适应大型发电机励磁的要求。图 1-3 中交流励磁机的励磁电流是由中频副励磁机 JFL（400 或 500 赫）经可控硅整流装置 KZ 供给的。主发电机的励磁调节器 ZLT 控制该可控硅整流装置。交流副励磁机 JFL 的励磁，通常采用自励恒压方式，由调节器 LT 进行控制。

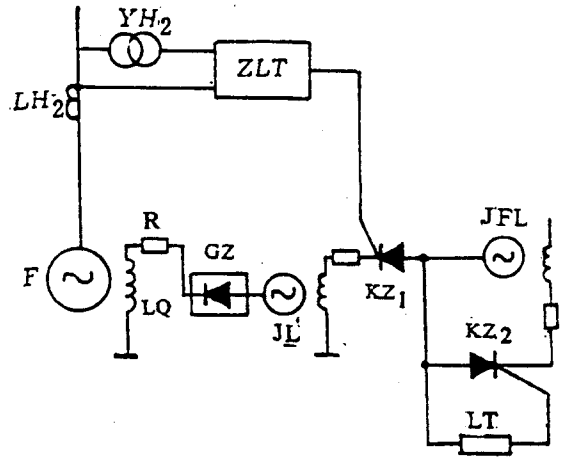


图 1-3 他励静止硅整流器励磁系统原理接线图

LH、YH—电压、电流互感器；JL—交流励磁机；JFL—一副励磁机；GZ—硅整流桥；KZ₁、KZ₂—可控硅整流桥；LT—恒压调节器；R₁、R₂、R₃—分别为相关部分的滑环

2. 交流励磁机带静止可控硅整流器励磁方式

这种励磁系统亦属于他励励磁方式，其原理如图 1-4 所示。发电机的励磁电流由交流励磁机 JL 经可控硅整流装置 KZ 供给。交流励磁机的励磁一般采用可控硅自励恒压方式。发电机的励磁调节器 ZLT₁ 直接控制通向转子绕组的主可控硅整流装置 KZ₁。采用模拟电子电路的励磁调节器及可控硅整流装置，其时间常数是可以忽略不计的，因此这种励磁方式，励磁调节的快速性比图 1-3 的励磁方式好。发电机端电压、电流及其相角如有变化，加到转子的励磁电压便能够迅速响应。

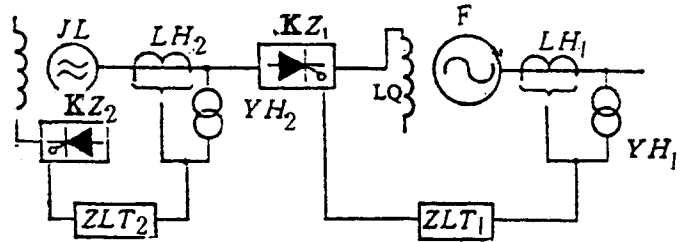


图 1-4 他励静止可控硅励磁系统原理接线图

LH—电流互感器；YH—电压互感器；JL—交流励磁机；ZLT₁—主机自动励磁调节器；ZLT₂—JL 的自动励磁调节器

图 1-3、图 1-4 所示励磁系统，造价昂贵，转动部件多，维护麻烦。但励磁电源独立，可靠

性高，且图 1-4 也是一种高起始响应系统。只是励磁系统的高次谐波电流成分较重，应设置专门的吸收电路来解决，或将交流励磁机设计成双丫六相 30°相带电枢绕组，使整流器输出电压波形的纹波系数尽量小一些。这种励磁方式的优缺点是：

- (1) 励磁系统完全独立，不受电力系统运行状态的影响。
- (2) 用交流励磁机供电，励磁电源可靠，维护工作量较小。
- (3) 励磁调节反应速度较快，强励顶值电压易于满足电力系统稳定性的要求。
- (4) 但交流励磁机不能定型生产。

这种励磁方式在我国一些中、小型的水轮发电机上早已采用。目前国产 32 万千瓦的水轮发电机和 20 及 30 万千瓦的汽轮发电机都采用他励静止可控硅整流器的励磁方式。

3. 无刷励磁方式

无刷励磁是他励系统中
有发展前途的一种励磁方式。无刷励磁的原理并不新，很早就有了这种想法。但是直到硅整流元件发展到能够承受高反压、大电流且机械强度亦较高，有条件制成旋转整流器时，这种方式才得以实现。最早的无刷励磁发电机是在 1950 年问世的，1960 年开始用于大机组。现在普遍采用的仍是旋转硅整流器方式，原理接线如图 1-5 所示。交流励磁机 JL

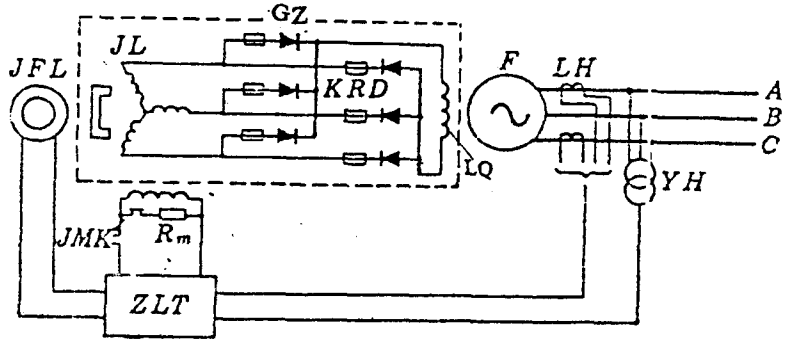


图 1-5 旋转硅整流器无刷励磁方式

LH、YH—电流、电压互感器；GZ—旋转硅整桥；JL—交流励磁机；JFL—交流副励磁机（永磁式）；KRD—快速熔断器；ZLT—励磁调节器；JMK—交流励磁机磁场灭磁开关； R_m —灭磁电阻

采用旋转电枢式三相发电机。硅整流器安装在与主轴一同旋转的圆盘上。这样，交流励磁机电枢产生的交流电势，经过旋转整流器变换为直流以后，直接供给主发电机转子励磁绕组。因为交流励磁机的三相交流绕组、硅整流器以及同步电机转子都装在同一旋转轴上，故不再需要滑环和炭刷。

无刷励磁的主要优点如下：

- (1) 因为没有整流器、无滑环和炭刷，不需要进行这方面的维护工作，也无机械换向事故，运行的可靠性提高了。
- (2) 因为没有炭粉和铜沫引起电机线圈污染，故电枢绕组绝缘的寿命较长。
- (3) 电机运行在易燃、易爆炸的环境条件下，也不会因换向火花造成恶性事故。由于取消了整流器和滑环，在带有腐蚀性气体场所，只要对绝缘采取防护措施，亦可运行。

图 1-3 所示的他励静止硅整流器励磁方式，受到滑环容量的限制。转子滑环一般限制为 8~10 千安。过去滑环制造虽可达 750 伏、7500 安等级，但炭刷的维护是一个很大的负担。随着单机容量的进一步增大，图 1-3 的励磁方式将为图 1-5 的无刷励磁方式所代替。二者励磁调节的性能是相近的。目前国外已在容量达 100 万千瓦级的汽轮发电机上应用于无刷励磁系统（励磁功率达 5300 千瓦），而且愈来愈普遍。水轮发电机的无刷励磁，原则上和汽轮发电机的作法相同，在国外也已采用。此外还用于航空高速发电机、防腐、防爆、防尘的特种同步电机上。如石油、化

造价低；励磁变压器放置自由，缩短了机组长度；励磁调节速度快，是一种高起始响应的励磁系统。当主整流器采用三相全控桥时，可用逆变来灭磁，使灭磁时间短，且省去灭磁装置。自并励系统的发电机电压和转速成一次方关系，对抑制甩负荷后的过电压，要比采用同轴式交流励磁机的他励系统有利。这种励磁方式的缺点是：整流输出的直流顶值电压受发电机端或电力系统短路故障形式（三相、两相或单相短路）和故障点远近等因素的影响。此外，需要起励电源，还存在滑环和碳刷。对这种励磁方式，人们曾有两点顾虑：第一，发电机近端短路时能否满足强励要求，机组是否会失磁；第二，由于短路电流的迅速衰减，带时限的继电保护可能会拒绝动作。国内外的分析研究和试验表明，这些技术问题已相继得到解决，故自并励方式愈来愈受到人们的青睐。国外某些公司甚至把自并励列为大型机组的定型励磁方式。我国近年来已在一些机组上以及引进的大型机组上采用自并励方式，最近我国同日本日立公司联合设计的 600MW 汽轮发电机，其励磁方式就是自并励。自并励的另一种系统是，既可提供正向励磁电流又可提供反向励磁电流的双向自并励系统。图 1-6(b) 为瑞典 ASEA 公司生产的双向自并励系统，已在巴西伊太普水电站使用。

2. 直流侧叠加的自复励方式

在自并励的基础上加一台与发电机定子回路串联的励磁变流器，后者另外供给一套硅整流装置，二者在直流侧叠加，则构成在直流侧叠加的自复励系统，叠加方式可分为电流叠加（直流侧并联）电压叠加（直流侧串联）两种。

(1) 直流侧并联自复励方式：

如图 1-7 所示，发电机 F 的转子励磁电流由硅整流桥 GZ 与可控硅整流桥 KZ 并联供给。硅整流桥由励磁变流器 GLH 供电，可控硅桥由励磁变压器 LB 供电，LB 并接于机端，GLH 串接于发电机出口侧或中性点侧。发电机空载时由可控硅桥单独供给励磁电流，发电机负载时，由可控硅桥与硅整流桥共同供给励磁电流。其中硅整流桥的输出电流与发电机定子电流成正比，可控硅整流桥的输出电压受励磁调节器 ZLT 的控制，起电压校正作用。

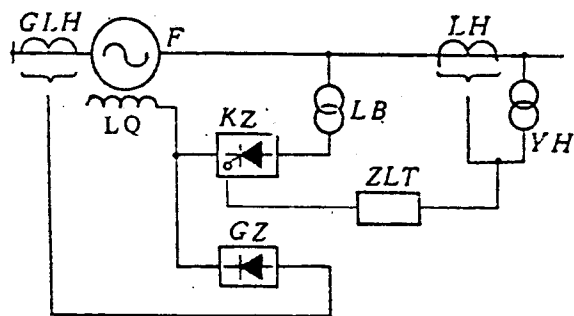


图 1-7 直流侧并联自复励可控硅静止励磁系统原理接线图
LH—电流互感器；YH—电压互感器；LB—励磁变压器；GLH—功率电流变流器；GZ—三相整流桥；KZ—三相可控硅整流桥；ZLT—自动励磁调节器

这种励磁方式是从五十年代流行的直流励磁机带复式励磁和电压调节器的励磁方式演变而来的。当时半导体整流元件的功率不大，所以复式励磁和电压调节器只能共同供给励磁机的励磁电流，以间接地控制发电机的励磁。六十年代以来，大功率硅整流元件和可控硅在制造技术上的发展，使得有可能由复式励磁（GLH 与 GZ）和电压调节器（LB 与 KZ 及 ZLT）直接控制发电机的励磁。由于省掉了直流励磁机这个中间环节，不但减少了运行维护的麻烦，而且提高了励磁调节的快速性，故该系统亦属于高起始响应快速励磁方式，且当并励或复励部分因故障退出工作时，另一部分尚可短时运行，运行方式比较灵活。

由复励桥提供的励磁电流与发电机定子电流成比例，起正反馈作用，占额定励磁电流一半以上。可控桥的作用与自并励相同。

这种励磁方式的主要优、缺点是：

- i) 励磁电流只与主机电压、电流有关，但与电压、电流之间的相角变化无关；
- ii) 发电机或电网短路时，能提供必要的强励倍数；