

高等学校教材

同步电机可控硅励磁系统

华北水利水电学院 刘忠源 主编



知 识
PDG

TM 341
L77

361611

高等学校教材

同步电机可控硅励磁系统

华北水利水电学院 刘忠源 主编



水利电力出版社

(京)新登字115号

内 容 提 要

本书系统地阐述了同步发电机、同步电动机各类型可控硅励磁系统和半导体励磁调节器的构成、工作原理及应用。全书共分五章，主要内容包括：同步发电机、同步电动机可控硅励磁系统的分类、构成、工作原理、主要特性和应用，可控硅励磁系统功率输出部分的工作原理和应用，同步发电机、同步电动机半导体励磁调节器各单元的工作原理以及可控硅励磁系统的保护等。

本书主要作为高等学校“水利水电动力工程”和“机电排灌工程”专业的教材，亦可作为有关专业的教材或教学参考书，同时可供从事水电站、火电厂及机电排灌站工作的工程技术人员参考。

高等学校教材

同步电机可控硅励磁系统

华北水利水电学院 刘忠源 主编

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

水利电力出版社印刷厂印刷

787×1092毫米 16开本 9.75印张 218千字 1插页

1992年11月第一版 1992年11月北京第一次印刷

印数0001—4490册

ISBN 7-120-01597-4/TV·584

定价2.60元

前 言

本书是根据高等学校水利水电类专业教学委员会电类课程教学组1988年10月制定的电类课程1990~1992年教材编审出版规划编写的,作为“水利水电动力工程”和“机电排灌工程”专业《同步电机可控硅励磁系统》课程的教材,亦可作为有关专业的教材或教学参考书,同时可供从事水电站、火电厂和机电排灌站等工作的工程技术人员参考。

本书系统地阐述了同步发电机、同步电动机各类型可控硅励磁系统和半导体励磁调节器的构成、工作原理和应用。取材以目前国内常用的几种可控硅励磁系统为主,力求做到面向生产,联系实际。

本书主要根据使用专业的要求和特点编写。限于篇幅,又要兼顾不同专业的需要,故只能包括教学要求的基本内容。各院校在使用本教材时,可根据各自专业的特点和要求适当增删内容。

本书由华北水利水电学院刘忠源主编。参加编写的有:刘忠源(编写第一、三章);河海大学黄宝南(编写第二、五章);江苏农学院袁家博(编写第四章及第一章第四节)。

全书由陕西机械学院张成乾主审。

在本书编写过程中,得到华北水利水电学院、河海大学和江苏农学院有关教研室和各方面有关同志的大力帮助,在此表示深切的感谢。

对于书中的缺点和错误,敬请读者批评指正。

编 者

1990年12月

目 录

前 言

第一章 同步电机可控硅励磁系统概述	1
第一节 同步发电机励磁系统的发展	1
第二节 同步发电机可控硅励磁系统的分类	2
第三节 同步发电机可控硅励磁系统的构成	4
第四节 同步电动机可控硅励磁系统概述	14
第二章 可控硅励磁系统的功率输出部分	17
第一节 三相桥式不可控整流电路	17
第二节 三相桥式半控整流电路	20
第三节 三相桥式全控整流电路	24
第四节 整流电路的换流压降及外特性	36
第五节 异常情况下的三相整流桥	40
第三章 同步发电机可控硅励磁系统的控制部分	48
第一节 概述	48
第二节 调差单元	49
第三节 测量比较单元	54
第四节 综合放大单元	63
第五节 移相触发单元	67
第六节 半导体励磁调节装置的静态调节特性	82
第七节 同步发电机可控硅励磁系统全图	85
第四章 同步电动机可控硅励磁系统的控制部分	94
第一节 概述	94
第二节 灭磁单元	96
第三节 移相触发单元	100
第四节 移相给定和电压负反馈单元	105
第五节 投励(及全电压)单元	110
第六节 有源逆变单元	116
第七节 无功补偿单元	119
第八节 同步电动机可控硅励磁系统全图	124
第五章 可控硅励磁系统的保护	133
第一节 过电压保护	133
第二节 过电流保护	139
第三节 转子过电压保护	142
第四节 电压及电流上升率的限制	143
第五节 串、并联支路的均压、均流	148
参考文献	150

第一章 同步电机可控硅励磁系统概述

第一节 同步发电机励磁系统的发展

同步发电机的励磁系统一般由两部分组成。一部分用于向发电机的磁场绕组提供直流电流，以建立直流磁场，通常称为励磁功率输出部分（或称为功率单元）。另一部分用于在正常运行或发生事故时调节励磁电流，以满足运行的需要。这一部分包括励磁调节器、强行励磁、强行减磁和自动灭磁等，一般称为励磁控制部分（或称控制单元，或统称为励磁调节器）。

励磁系统是同步发电机的重要组成部分，对发电机的运行可靠性、经济性及其它特性有直接的影响。它的主要作用有：

（1）正常运行时供给发电机励磁电流，并根据发电机负载的变化作相应调整，以维持发电机端电压或电网中某一点电压在给定水平上。当发电机突然甩负荷时，实行强行减磁以限制其端电压，使其不会过度升高。此外，当几台发电机并联运行时，通过励磁系统的作用可使无功功率在机组间得到稳定和合理的分配。

（2）通过灵敏而又快速的励磁调节，提高电力系统运行的静态稳定和输电线路的传输能力。当电力系统发生短路或因其它原因使系统电压严重下降时，对发电机实行强行励磁，以提高电力系统的动态稳定。如果发电机内部发生短路故障，则对发电机实行自动灭磁，以降低故障的损坏程度。

为了完成上述任务，特别是第（2）点，要求励磁系统应具有较高的励磁电压顶值和较快的励磁电压上升速度。

1960年以前，同步发电机励磁系统的励磁功率单元，一般均采用同轴的直流发电机，称为直流励磁机。励磁控制单元则采用机电型或电磁型调节器。随着电力系统的发展和单机容量的增大，这种励磁系统已不能适应现代电力系统和大容量机组的需要，其主要问题是：

（1）励磁功率不能满足要求。随着机组容量的增大，所需的励磁功率也越来越大，而同轴直流发电机由于存在整流子和炭刷，其容量受机械强度（如转速所决定的周边速度）和电气参数（如换向电压）等因素的限制。与汽轮发电机同轴的直流励磁机，其极限功率一般可用下式确定：

$$P = 1.8 \times 10^4 / n \quad (1-1)$$

式中 P ——直流励磁机的极限功率，kW；

n ——直流励磁机的转速，r/min。

当 $n = 3000 \text{ r/min}$ （其励磁机整流子的周边速度接近于 45 m/s ）时，相应的直流励磁机极限功率为 600 kW ，约为 150 MW 汽轮发电机所需的励磁功率。换言之，当汽轮发电机

单机容量大于150MW时,将难于用直流励磁机作为励磁系统的功率单元。水轮发电机虽然转速低,机械整流不显得特别困难,但极限容量受到励磁机体积和尺寸的限制。如果励磁机体积太大,机组长度太长,则会使水电站厂房高度大大增加,在经济上显得很不合理。因此,单机容量大于150MW的水轮发电机,一般也不采用同轴的直流励磁机。

(2) 励磁电压顶值和上升速度不能满足要求。随着电力系统的发展和单机容量的增大,对励磁系统的这两个方面提出了更高的要求。尤其是对于大型水电站而言,由于输电距离较远,电力系统稳定问题更加突出,情况就更是如此。此时,上述励磁系统已难于满足这些要求。

1960年以来,随着电子技术的发展,大功率硅整流器和大功率可控硅(又称硅晶体闸流管,简称硅晶闸管)在制造技术、应用技术及其可靠性方面都得到了不断的提高。在这种情况下,以大功率硅整流装置或可控硅整流装置及其相应的交流电源为励磁功率单元(取消直流励磁机),以半导体励磁调节器为励磁控制单元而组成的励磁系统,即可控硅(半导体)励磁系统,便在适应电力系统发展和单机容量增大需要的情况下发展起来。

可控硅励磁系统,国外60年代初才开始在中型发电机上采用,但到70年代初已得到普遍的应用,可见发展是很快的。近十多年来,我国在可控硅励磁系统的研制和使用方面,也有了较快的发展。目前我国新建的单机容量为100MW以上的汽轮发电机,几乎都采用可控硅励磁系统。至于大型水电站,过去兴建的虽然大部分仍采用直流励磁机,但许多机组都配备了可控硅励磁调节器。而最近一些年兴建和将要兴建的水电站,则都优先采用(和即将采用)可控硅励磁系统,如白山水电站、龙羊峡水电站和葛洲坝水电站等。

多年的实际运行经验证明,可控硅励磁系统具有调节速度快、调节范围宽、强励顶值高、制作容易、运行维护简便等优点。同时,还为引进附加控制信号和实现最佳励磁控制创造了条件。

第二节 同步发电机可控硅励磁系统的分类

如前所述,可控硅励磁系统采用硅整流器或可控硅整流器将交流励磁电源转变为直流电源而进行励磁,取消了传统的直流励磁机。这种励磁系统的种类很多,按励磁能源取得方式的不同,可分为两大类。一类的励磁能源取自发电机轴端,另一类的励磁能源取自发电机机端。前者为采用交流励磁机方式,后者则为无励磁机的励磁方式。

一、交流励磁机励磁方式

这类可控硅励磁系统采用与发电机同轴的交流发电机作为交流励磁电源,经硅整流器或可控硅整流器整流后对发电机进行励磁。同轴交流发电机称为交流励磁机,或称为同轴辅助发电机。由于这类系统的交流励磁电源是主机外的独立电源,且采用整流器将交流电源转变为直流电源,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),简称为他励系统。

在他励系统中,按交流励磁机是磁场旋转还是电枢旋转、整流器是静止还是旋转,又可分为如下四种:

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

上述(1)、(2)两种方式由于整流器是静止的, 故又称为他励静止整流器励磁系统, 简称为他励静止励磁系统。在这两种系统中, 经整流器输出的直流电流, 需经过滑环、炭刷引接至发电机的励磁(磁场)绕组。研究表明, 滑环电流的极限值为8000~10000A。也就是说, 在滑环电流不超过极限值的条件下, 交流励磁机可提供任何容量的励磁功率。当滑环电流超过8000~10000A时, 由于炭刷的材料及其压力的不均匀, 以及运行中腐蚀气体影响等因素, 滑环的制造、使用和维修将是困难的。

(3)、(4)两种方式由于整流元件与交流励磁机电枢同主机大轴一起旋转, 可直接给主机励磁, 无须经过滑环及炭刷引接, 故称为无刷励磁系统, 或称为他励旋转整流器励磁系统(简称为他励旋转励磁系统)。

二、无励磁机励磁方式

这类励磁系统的交流励磁电源通过励磁变压器取自发电机出口或厂用电母线。由于励磁电源取自发电机自身或其所在的电力系统, 故称为自励整流器励磁系统, 简称为自励系统。在这个系统中, 由于励磁变压器、整流器都是静止元件, 不象他励系统中交流励磁机是旋转机械, 故又称为全静态励磁系统, 或称为自励静止励磁系统。

自励系统又可分为自并励和自复励两种。自并励只用一台接在机端的励磁变压器(又称并联变压器)提供励磁电流。自复励则除了励磁变压器外, 还采用与发电机定子回路串联的励磁变流器(或串联变压器), 两者结合起来, 共同向发电机提供励磁电流。按励磁变压器与励磁变流器(或串联变压器)结合方式的不同, 自复励又可分为以下四种:

- (1) 直流侧并联的自复励;
- (2) 直流侧串联的自复励;
- (3) 交流侧并联的自复励;
- (4) 交流侧串联的自复励。

表 1-1 可控硅励磁系统分类表

交流励磁机励磁系统 (他励系统)	静止整流器(有刷励磁)	他励静止硅整流器励磁系统
		他励静止可控硅励磁系统
	旋转整流器(无刷励磁)	他励旋转硅整流器励磁系统
		他励旋转可控硅励磁系统
无励磁机励磁系统 (自励系统)	励磁变压器	自并励励磁系统
	励磁变压器和励磁变流器	直流侧并联自复励励磁系统
		交流侧并联自复励励磁系统
	励磁变压器和串联变压器	直流侧串联自复励励磁系统
		交流侧串联自复励励磁系统

以上可控硅励磁系统的分类,可用表1-1加以说明。

此外,还有两种励磁系统需要加以说明。一种是用于直流励磁机的可控硅励磁调节器。这种系统仍采用传统的直流励磁机,可控硅装置只用于控制励磁机的励磁电流。另一种是谐波励磁系统,它利用嵌在发电机定子槽中的附加绕组(即谐波绕组)产生的谐波(通常是三次谐波)电势,作为励磁电源,经可控或不可控整流器整流后供发电机本身励磁。这种励磁系统主要用在一些小容量机组上。

第三节 同步发电机可控硅励磁系统的构成

本节介绍同步发电机各种可控硅励磁系统的构成,同时对它们的特点、使用情况等作一简要说明。

一、他励系统

这类励磁系统的共同特点是用同轴交流励磁机作为励磁电源。由于励磁能源取自发电机主轴,励磁电源独立,不受电力系统和发电机运行情况变化或扰动的影响,且强励顶值与短路点无关,因此工作比较可靠。

(一)他励静止硅整流器励磁系统

图1-1为他励静止硅整流器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 G_1 经硅整流装置 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 G_2 经可控硅整流装置 U_2 (通常为三相半控桥)整流后供给。自动励磁调节器 AVR_1 随发电机运行工况的变化而改变可控硅的控制角,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。

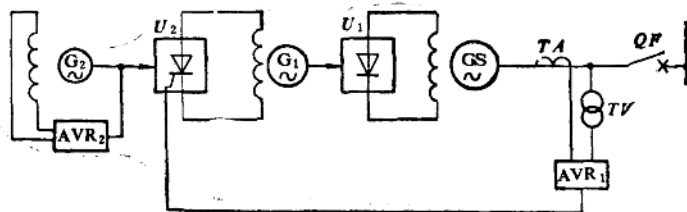


图 1-1 他励静止硅整流器励磁系统原理图

为了减小励磁电流的波纹系数和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,交流副励磁机则采用400~500Hz的中频。交流励磁机和副励磁机除了采用普通交流发电机外,亦可采用感应式交流发电机。这种发电机的电枢和磁场绕组均装在定子槽内,转子只有齿和槽,没有绕组,象个齿轮。感应式交流发电机不需使用滑环,具有结构简单,制造方便,耐高速和工作可靠等优点。缺点是交流电势的谐波分量较大,噪音也较大。

交流副励磁机 G_2 通常采用自励恒压方式,工作时先借外部电源起励,建立起一定电

压后再转为自励，并由自励恒压装置 AVR_1 保持其端电压恒定。 G_1 也可采用永磁发电机，从而简化其结构。永磁发电机的缺点是功率尚不能做得很大，且转速或负载变化时无法调节输出电压。

这种系统的调节速度与慢响应的直流励磁机系统相比稍好一些，但比快响应的他励静止可控硅励磁系统（可控硅接入发电机而不是励磁机的励磁回路）要差些，这是因为调节发电机的励磁电流要通过调节交流励磁机的励磁电流来实现，从而引进了交流励磁机励磁绕组时滞的缘故。

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，故这种励磁系统适于在大型汽轮机上采用。我国在100MW、200MW和300MW汽轮发电机上已普遍采用这种励磁系统。

这种励磁系统为了实现发电机自动灭磁，需在发电机的励磁回路设置灭磁开关。至于交流励磁机和副励磁机，则通常采用续流二极管灭磁。

（二）他励静止可控硅励磁系统

他励静止可控硅励磁系统的特点是在发电机励磁回路采用可控硅（而不是硅二极管）整流装置，如图1-2所示。交流励磁机 G 的输出经可控硅整流装置 U 整流后给发电机 GS 励磁，交流励磁机本身一般采用可控硅自励恒压方式，而不再设置副励磁机。也有采用500Hz中频永磁发电机作为副励磁机的，此时交流励磁机不再设置自励恒压装置（即 AVR_1 ）。自动励磁调节器 AVR_1 根据发电机运行工况的变化直接控制可控整流桥 U 可

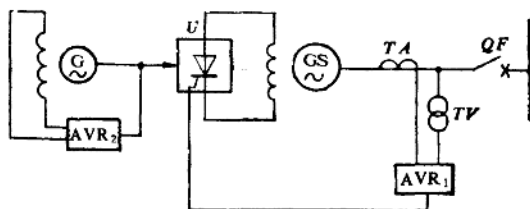


图 1-2 他励静止可控硅励磁系统原理图

控硅的控制角，其时间常数可忽略不计，因此这种系统的励磁响应速度比图1-1所示的系统要快。事实证明，这种励磁系统对电力系统的稳定具有很大好处。

图1-2中 U 一般采用三相全控桥，也可采用三相半控桥。当采用三相全控桥时，若发电机内部或出口发生故障，则通过调节器可使整流桥从整流工作状态转变为逆变状态，从而实现自动灭磁。换言之，这种励磁系统可取消传统的灭磁开关和放电电阻。对已运行机组励磁系统进行改造时，为了利用原有的灭磁开关，简化调节器的触发电路，可采用三相半控桥式整流电路。图中交流励磁机 G 一般采用续流二极管灭磁。

上述励磁系统近年来在国外得到了一定的发展，苏联克拉斯诺雅尔斯克水电站500MW水轮发电机采用的就是这种励磁系统。我国将在新建的200MW水轮发电机上使用这种励磁系统。

（三）他励旋转硅整流器励磁系统

图1-3所示为这种励磁系统的原理图。交流励磁机 G_1 为电枢旋转、磁场固定的同步发电机，硅整流器 U_1 安装在与主轴一起旋转的圆盘上。由于 U_1 、 G_1 的电枢、发电机的磁场绕组与大轴一起旋转（即图中虚线框所示部分），所以不再需要滑环和炭刷。 G_1 一般采

用150Hz频率,其励磁电流由磁极旋转式永磁发电机 G_2 (即副励磁机)供给。调节器AVR根据发电机的运行工况改变 G_2 输出回路可控整流桥 U_2 的控制角,以调节 G_2 的励磁电流,从而间接地调节了发电机的励磁电流。这种励磁系统的运行性能与他励静止硅整流器的系统相似。

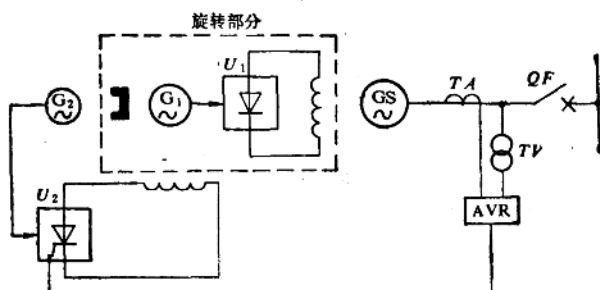


图 1-3 他励旋转硅整流器励磁系统原理图

无刷励磁的设想很早就有,但直到50年代才实现,并于60年代开始用于大型机组。这是一种很有发展前途的励磁系统,其主要优点是:没有滑环、炭刷等薄弱环节,制造、使用和维护简单,工作较可靠;没有炭粉和铜末引起的污染,电机绝缘的寿命较长;不会因滑环和炭刷间的火花造成事故,适用于较恶劣的工作环境等。随着发电机单机容量的增大,这种系统将取代他励静止硅整流器励磁系统。国外已在1356.2MW的汽轮发电机上应用这种系统(励磁功率达5300kW),我国也已在100MW汽轮发电机上应用。水轮发电机的无刷励磁系统,原则上与汽轮发电机相同,国外也已采用。

旋转硅整流器励磁系统对硅元件的质量要求较高,且应能承受强大离心力的作用。这种系统的转子电压、电流及温度等不便于直接监视,须采用间接的特殊测量手段,比较复杂,这些均是需进一步研究解决和完善的问题。

顺便指出,旋转励磁系统不可能采用常规的灭磁方法(即在发电机励磁回路设置灭磁开关和灭磁电阻),当前通用的方法是在交流励磁机的励磁回路设置灭磁开关。当这个开关动作、交流励磁机进行灭磁后,发电机的励磁回路接着进行二极管续流灭磁。续流灭磁的缺点是灭磁时间较长(约需10s左右),不能实现快速灭磁。因此,有必要研究新的快速灭磁方法。

(四)他励旋转可控硅励磁系统

为了提高励磁电压的响应速度,可用可控硅整流桥取代旋转硅整流器,这样便构成了旋转可控硅励磁系统,如图1-4所示。图中交流励磁机 G_1 的励磁由磁极旋转式副励磁机 G_2 提供。对于容量不很大的发电机,亦可采用永磁式交流励磁机(取消交流副励磁机)。此外,亦可由接在发电机出口的相复励装置(由励磁变压器和变流器及整流桥组成)对交流励磁机的磁场供电。

这种励磁系统的工作原理及性能与他励静止可控硅励磁系统相似。由于发电机转子回路采用了可控硅整流桥 U_1 ,故为在无刷励磁系统中实现无触点快速灭磁创造了条件。

这种系统存在的问题与他励旋转硅整流器系统相似。除此之外，如何将反映发电机运行工况的测量信号传递到旋转部分，以控制可控硅的控制角，是这个系统的新问题。图1-4所示为解决这个问题的一个方法。图中 G_2 是一个由多相绕组组成的旋转电枢（称为控制励磁机或触发脉冲发生器），其磁场决定于两个静止且互相垂直的绕组 d 和 q 的合成磁场，调节器AVR控制这两个磁场绕组。发电机运行工况改变时，调节器使合成磁场的空间位置（相对于 G_2 的磁极）改变，从而改变了 G_2 电枢电压与 G_1 电枢电压之间的相位，即改变了可控硅的控制角，最终导致改变发电机的励磁电流。此外，亦可考虑采用旋转变压器来实现控制信号的传递。对于采用光电效应传递信号的办法，也正在进行研究。

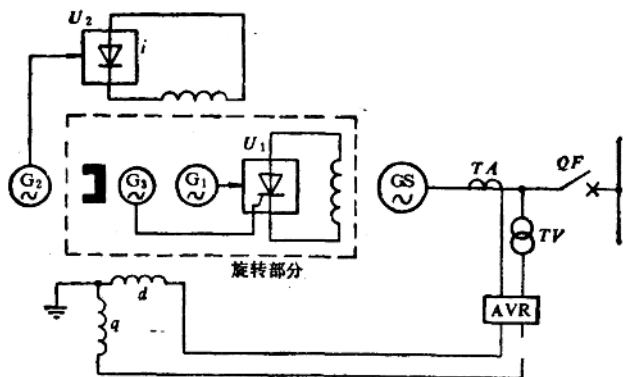


图 1-4 他励旋转可控硅励磁系统原理图

总之，无刷旋转可控硅励磁系统目前尚处在研究试验阶段，有些问题有待于进一步解决。

二、自励系统

自励系统的共同特点是无励磁机，励磁电源取自发电机本身。

（一）自并励系统

自并励系统只用一台励磁变压器，是自励系统中接线最简单，造价最低廉的一种，如图1-5所示。发电机的励磁电流通过可控整流桥 U 和励磁变压器 T 取自机端。调节器AVR随发电机运行工况的变化改变可控硅的控制角，从而调节发电机的励磁电流。

自并励系统的机组起动时，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，调节器的移相触发电路将无法正常工作（因同步电压太低，见第三章第五节），可控硅不开放，发电机得不到建立电压所需的励磁电流。为此，必须采取一定措施，供给发电机初始励磁，使其逐步建立起电压，即所

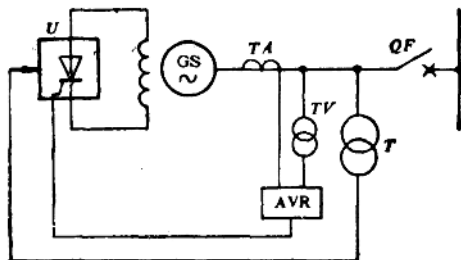


图 1-5 自并励系统原理图

谓起励。起励措施一般有两种：①他励起励，即另设起励电源（取自直流蓄电池组或交流厂用电经过整流）供给初始励磁；②残压起励，即利用残压并采取相应措施使机组起励。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。

自并励系统反应灵敏，调节速度快，有利于提高发电机运行的静态稳定。至于对动态稳定的影响，则与短路地点和类型有关。当三相短路发生在发电机近端时，由于端电压大幅度下降，强励倍数降低，故其对电力系统动态稳定的影响较为不利。此外，近端短路后，自并励发电机供给的短路电流将衰减得较快，并一直衰减到零，而没有一个稳态值。这一点对延时动作继电保护（特别是后备保护）将有影响，需采取相应措施。

自并励系统（包括自复励系统）具有下列优点：不需要同轴励磁机，可缩短机组大轴长度，对水电站而言可减少厂房高度，节省投资；直接通过可控硅控制发电机的转子电压，调节速度快，且有利于抑制水轮发电机甩负荷时引起的过电压；无旋转部件，效率高，检修维护简便，工作可靠等。

自并励系统适用于要求有较高励磁电压反应速度、且采用发电机—变压器单元接线的发电机。为了简化控制回路和励磁开关，抽水蓄能机组也宜于采用这种励磁系统。国外有的资料认为，这种励磁系统可用于大多数水轮发电机，国外的大型汽轮发电机也较多采用。我国近年来已在一些机组上采用了这种励磁系统。

（二）直流侧并联的自复励系统

图1-6为直流侧并联系统的原理图，可控硅整流桥 U_1 由接在机端的励磁变压器 T_1 供电（即电压源），硅整流桥 U_2 则由接在发电机中性点侧的励磁变流器（又称功率变流器） T_2 供电（即电流源）。发电机空载时，所需励磁电流由 U_1 单独供给。发电机带负载以后，则由 U_1 和 U_2 共同供给励磁电流。后者供给的励磁电流随发电机定子电流变化而改变，称为复励电流；前者则决定于可控硅的控制角（由调节器 AVR 根据发电机电压进行控制），称为自励电流。发电机在额定工况下运行时，复励电流约占 60%~70%，自励电流约占 40%~30%。发电机负载增大时，要求增加励磁电流，此时复励电流自动增加，不足部分则由自励部分补充。发电机出口发生三相短路时， T_1 将提供全部强励电流； T_2 的电压则降为零，即可控硅整流桥被封锁而不提供电流。远方短路时，发电机端电压下降，励磁电流由 T_1 和 T_2 共同提供，此时，复励电流增加不大，要求 U_1 提供一定的强励电流。

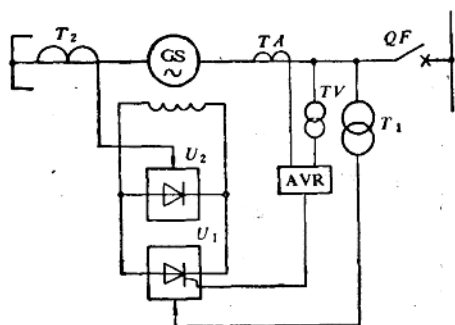


图 1-6 直流侧并联自复励系统原理图

在这种系统中，必须适当选择 T_2 的电流变比 $\left(k = \frac{I_f}{I_2}\right)$ 。 k 值过小，复励作用过强，可能使自励部分失去调节作用。反之，则将增加 U_1 的负担，且影响强励能力，并可能引起很高的尖峰过电压。

图1-6中 T_1 是按电流互感器方式工作的,副边绕组一侧不允许开路。此外,如前所述,在近端短路时, U_1 将被封锁。由于此时电流很大,铁芯高度饱和,磁通的变化曲线变为平顶波,故输出电压波形将发生畸变,出现尖峰波形。若 T_1 的变比选择不当,强励电流小于此时转子绕组中的暂态电流,强励电流被堵塞而送不出去,则将产生很高的尖峰过电压,影响整流桥及转子绕组的安全。为此,可在 T_1 副边绕组的中性点装设放电间隙;亦可在 T_1 副边绕组的出口并接饱和电抗器,或装设非线性电阻等。

在这种系统中, T_1 亦可接在发电机的出线侧。串接在中性点侧的好处是:发电机出口发生单相接地时, T_1 的相对地电压最高等于发电机相电压,比装在出口侧所要求的绝缘耐压水平低;由于系统容量一般皆大于发电机容量,装在中性点侧承受的短路冲击电流小,故机械强度要求较低。基于上述理由,在安装条件允许的情况下, T_1 以装在中性点侧为宜。

这种励磁系统较早在我国一些中、小型发电机上使用,有一定运行经验。由于自励和复励部分不易很好地配合工作,且励磁变流器副边过电压问题较严重,故在大型机组上很少采用。

(三) 直流侧串联的自复励系统

直流侧串联的自复励系统的构成原理,如图1-7所示。与直流侧并联的自复励系统一样,这种系统不具有相补偿作用,而且也采用由 T_1 供电的 U_1 和由 T_2 供电的 U_2 。但应注意,这两种系统有着本质的区别,主要表现在:

(1) 并联系统内由电压源和电流源分担励磁电流,在并联点电流线性相加,两个电源供给的电流大小不一定相同。在并联系统中,不可能采用两个电压源并联。否则,必然有一个整流桥(电压稍低的)被封锁,另一个整流桥带全部负载,

即两个电源不能分担负荷。正因为如此,所以在并联系统中励磁变流器是按电流互感器方式工作的。

(2) 串联系统中的励磁变流器是按电流——电压变换器原理工作的,即将电流转换成电压,可视为一个电压源。两个电压源串联,整流桥不会被封锁,且两组整流桥易配合工作。在此系统中,励磁电压等于两组整流桥输出电压之和,两个电源的电流是相同的。

为了实现按电压分配负荷,励磁变流器的铁芯是具有空气隙的,又称为串联变压器。由于铁芯磁路的磁阻决定于空气隙磁阻,励磁阻抗小,故可看作是一个等值电压源。正常运行时, T_1 接近于空载状态;同时,副边绕组开路时也不会产生过电压。

机组起动升压时,与自并励和直流侧并联自复励系统一样,须先经过起励步骤,再由自并励部分逐渐建立起电压。机组近端发生三相短路时, U_1 失去供电电源,但 U_2 的输出电压很高,最后导通的可控硅元件将保持导通状态,继续流过复励部分供给的强励电流,从

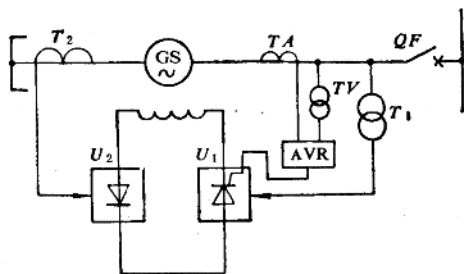


图 1-7 直流侧串联自复励系统原理图

而起到强励作用。远方短路时, 整流桥 U_1 和 U_2 互相配合, 共同进行强励。

这种励磁系统有较好的强励能力, 有利于电力系统稳定和继电保护的正确动作, 同时不存在自励和复励不易配合工作和堵塞问题, 不会出现很高的过电压。与自并励系统相比, 这种系统使用的设备较多, 占地面积较大, 且带空气隙的串联变压器造价也较高。这种系统的应用比直流侧并联的自复励系统来得广泛, 且多用于中型发电机上。

(四) 交流侧串联的自复励系统

交流侧串联的自复励系统只用一组可控硅整流桥 U 。从 T_1 副边绕组得到与发电机电压 $\dot{U}_g$ 成比例的交流电压 $\dot{U}_a$, 再由带空气隙 T_2 的副边绕组获得与发电机定子电流成比例的另一个交流电压 $\dot{U}_i$, 两个交流电压相量相加后作为整流桥 U 的输入电压, 如图1-8所示。

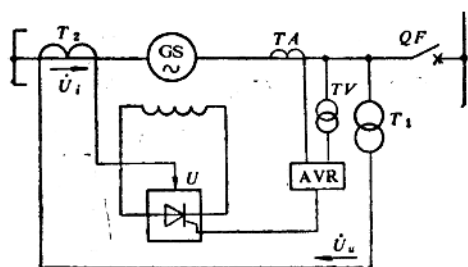


图 1-8 交流侧串联自复励系统原理图

设整流桥的输入电压为 $\dot{U}_{in}$, 则

$$\dot{U}_{in} = \dot{U}_a + \dot{U}_i \quad (1-2)$$

对串联变压器 T_2 而言, 其副边电压可用下式表示:

$$\dot{U}_i = j\dot{I}_g X_{\mu} \quad (1-3)$$

式中 $\dot{I}_g$ ——折算到 T_2 副边的发电机定子电流;

X_{μ} ——折算到副边的 T_2 互感电抗。

上述各量的相量关系, 如图1-9(a)

所示, 其中 φ 为发电机的功率因数角。从

图1-9(a)可得整流桥 U 输入电压的表示式, 即

$$U_{in} = \sqrt{\left(\frac{U_g}{K_1} \cos \varphi\right)^2 + \left(\frac{U_g}{K_2} \sin \varphi + I_g X_{\mu}\right)^2} \quad (1-4)$$

式中 K_1 ——励磁变压器 T_1 的变比。

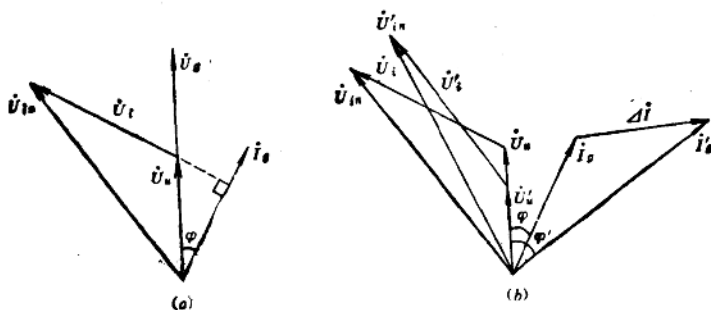


图 1-9 交流侧串联自复励系统相量图

(a) 正常时相量图; (b) 三相短路时相量图

由图1-9(a)及式(1-4)可知, U_{in} 与 U_g 、 I_g 及 φ 有关。当 I_g 增大或 $\cos \varphi$ 减小时, U_{in} 将增大, 即发电机励磁电流增加, 因此这种系统具有相位补偿作用。

图1-9(b)为发生三相短路时的相量图。此时, $\dot{U}_g$ 降低到 $\dot{U}'_g$, $\dot{I}_g$ 增大到 $\dot{I}'_g$, φ 增大到 φ' , $\dot{U}_i$ 则增大到 $\dot{U}'_i$ 并移相。从图可知, 整流桥的输入电压(从 $\dot{U}_{in}$ 变成 $\dot{U}'_{in}$)基本不变。

由此可见, 这种励磁系统基本消除了电力系统扰动带来的不利影响, 具有较好的独立性, 可认为与他励系统等效。

应当指出,在这个系统中,因 T_1 副边绕组具有较大阻抗,使整流桥的换相电抗增大,因而增大了整流桥的换相压降,并将引起阳极电压严重畸变。为了使调节器移相触发电路获得波形较好的同步信号,需采取相应措施(如采用同步电压模拟装置)引取同步电压。

这种励磁系统性能较好,可用于大型机组上。其主要优点有:励磁顶值高,励磁电压增长速度快,励磁电源独立性较好,采用全控桥可实现逆变灭磁等。由于串联变压器制造和布置有一定困难,故目前在大型机组上还较少采用,多用于中、小型发电机上。

(五) 交流侧并联的自复励系统

交流侧并联的自复励磁系统形式较多，一般可分为“电相加”和“磁耦合”两种，还可分为可控和不可控两种。“磁耦合”系统采用三绕组相复励变压器，它的两个一次绕组分别由励磁变压器和励磁变流器供电。在“电相加”可控的一类中，又可分为采用饱和电抗器和采用分流电抗器的两种。图1-10所示为“电相加”可控且采用饱和电抗器的励磁系统原理接线图。图1-10中 L 为饱和电抗器，励磁变流器 T_1 是不带空气隙的，两个电源在交流侧并联后，经整流桥 U ，输出励磁电流。显然，这种励磁系统具有相位补偿作用。

图1-10中调节器AVR根据发电机运行工况的变化改变可控整流桥 U_1 的控制角,以改变 L 的直流控制电流(即改变 L 的电抗值),从而改变 T_1 提供的励磁电流,起到电压校正器的作用。这种系统又称为可控电抗器相复励励磁系统。图1-10中 U_1 的交流电源,由 T_1 的第二个副边绕组提供。

与其它自复励系统一样，这个系统起励时，也应采取相应的起励措施。发电机空载时，由 T_1 供给励磁电流。带上负载以后，由 T_1 和 T_2 共同供给励磁电流。发生短路时， T_1 供给的电流减小甚至降为零，但 T_2 供给的电流增大，从而起到强励作用。

这种系统多用于中型发电机，或用在同步调相机上。

以上讨论了四种自复励系统，其中前两种采用的是直流侧叠加的方式，即电流叠加（直流侧并联）和电压叠加（直流侧串联）两种。这两种系统实质上是由直流励磁机带复式励磁和电压校正器的老式励磁系统演变而来的。当半导体整流元件的功率较少时，复式励磁和电压校正器只能共同供给和控制励磁机的励磁电流，从而间接地控制发电机的励磁电流。随着大功率可控硅和硅整流元件的研制成功和推广应用，使得有可能由复式励磁（即 T_1 与 U_1 ）和电压校正器（即 T_1 、 U_1 与AVR）直接供给和控制发电机的励磁电流。这样既省掉了直流励磁机这个中间环节，减少了运行维护的工作量，又提高了励磁调节的速度。

