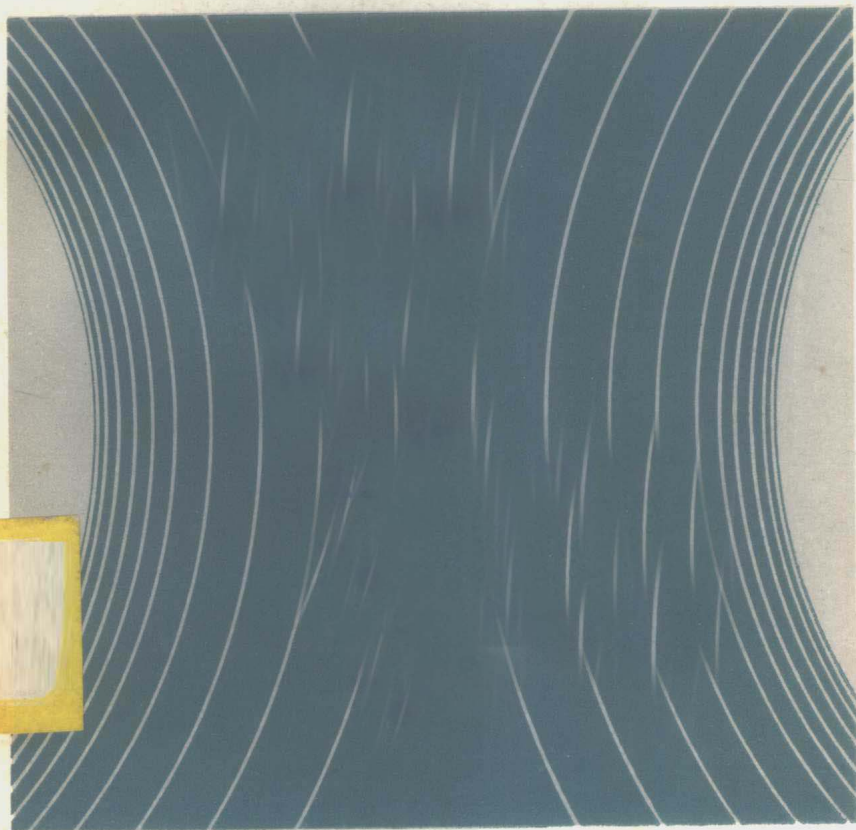


同步发电机可控硅励磁

陈思芬编写



同步发电机可控硅励磁

陈思芬编写

湖南科学技术出版社

同步发电机可控硅励磁

陈思芬 编写

责任编辑：夏可军

*

湖南科学技术出版社出版

(长沙市展览馆路14号)

湖南省新华书店发行 湖南省新华印刷二厂印刷

*

1984年2月第1版第1次印刷

开本：787×1092毫米 1/32 印张：4.625 字数：101,000

印数：1—3,300

统一书号：15204·115 定价：0.56元

前 言

励磁系统是同步发电机的主要组成部分。近几年来,国内外普遍采用半导体可控硅技术取代励磁机,在节约原材料、能源、克服励磁机的固有弊端、提高工作效益、稳定电力系统等方面收效甚大,为发展水、火力发电事业开辟了一条新的途径,引起了有关部门的广泛重视。

笔者长期工作在水力发电站,对同步发电机可控硅励磁系统的运行、管理和维护,积累了较为丰富的资料;对“单变”可控硅励磁系统用于中、小型同步发电机上,克服机端短路故障等问题进行了探索,取得了一些经验。这些资料曾整理成文,并在有关学术交流会议上宣读过,得到好评。在领导及同行的鼓励和支持下,遂编成此书。

本书共分五章。第一章为总论,讨论了可控硅励磁系统中的几个理论问题;第二章详细地介绍了同步发电机可控硅励磁系统的基本结构和工作原理;第三章叙述了起励、限励和灭磁的问题;第四章介绍了可控硅励磁系统的常见故障及处理方法;第五章以单变可控硅励磁系统为例进行了全面的分析和总结。全书对可控硅励磁系统稳定电力系统和机端电压,提高输送功率,抑制低频振荡以及强励强减励的能力等问题进行了深入的讨论。

本书的编写,曾得到水利电力部农电司白林工程师、江西工学院电子技术教研室方双霖老师、湖南省湘西土家族苗族自治州水电学会副理事长徐昌剑工程师的帮助和指导,许多兄弟

单位也提供了有关的资料，特此表示谢意。由于作者水平有限，书中错误和缺点在所难免，敬请读者批评指正。

作 者

一九八三年四月

内 容 提 要

全书共分五章。第一章总论，介绍了可控硅励磁系统的分类及其对电力系统的稳定作用，无功分配，有差调节及有关的基本概念等；第二章至第四章介绍了可控硅励磁系统的基本结构和工作原理，讨论了起励、限励，灭磁的问题，以及系统的调试、常见故障的处理；第五章给出一个完整的实例，对全书作了总结，并就“单变”可控硅励磁系统用于中、小型同步发电机上，克服机端短路故障等问题进行了讨论，是作者的经验之谈。

本书适合从事水力发电工作的工程技术人员阅读，亦可作为电力技术工人的培训教材。

目 录

第一章 总论	(1)
一、概述.....	(1)
二、可控硅励磁系统的分类.....	(2)
三、可控硅励磁系统对电力系统的稳定作用.....	(5)
四、对自动调节励磁装置的要求.....	(7)
五、并列运行的无功分配及有差调节.....	(7)
六、同步的原理及其应用.....	(10)
第二章 可控硅励磁系统的结构	(18)
一、主回路.....	(18)
二、测量回路.....	(27)
三、触发回路.....	(41)
四、调差回路.....	(53)
五、监测回路.....	(59)
六、保护回路.....	(65)
第三章 起励、限励、灭磁	(77)
一、起励.....	(77)
二、限励.....	(82)
三、灭磁.....	(96)
第四章 可控硅励磁系统的调试及故障处理	(101)
一、调试.....	(101)
二、常见故障处理.....	(116)
三、低频振荡的抑制.....	(121)
第五章 实例	(124)

第一章 总 论

一、概 述

可控硅用于同步发电机励磁系统，取代原有的励磁机或相复励磁调节器，称之为同步发电机可控硅励磁系统。该系统采用静止元件，具有轻巧、优质，通用化、寿命长等优点。

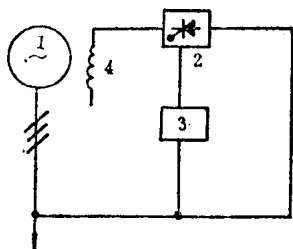
可控硅励磁系统具有强励和强减的能力，能使同步发电机端电压在一定精度范围内保持恒定，起到稳定电力系统的作用，近几年已被广泛应用到中小型同步发电机上作为励磁调节器，通过多年运行，证明其效果良好。现在，在大型的同步发电机上也在被采用。

同步发电机可控硅励磁系统由主回路、自动调节器以及保护回路等环节组成。该系统提供由交流电源转换的直流电压和电流，作为发电机励磁能源。可控硅励磁系统能随负载的变动自动地改变励磁电压和电流，以维持发电机的电压恒定。当电网负载突然卸去或过载等事故发生时，可控硅装置能迅速给予响应，提供相应的最大或最小的励磁功率，保护电路免遭损害。

可控硅励磁系统是建立在负反馈理论上的自动调节系统。系统中的调节对象是同步发电机，端电压是被调量，其调节系统原理如图1—1和方框图1—2所示。

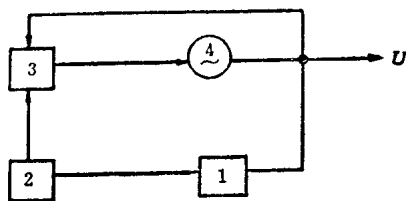
可控硅励磁系统从调节的角度来看，分为有电流复励系统

和无电流复励系统两种。有电流复励系统是按照负载电流和电压偏差 ΔV 进行复式调节，它的特点是动态反应快。无电流复励系统也可以得到良好的动态性能，所以中、小型同步发电机一般都采用无电流复励环节的可控硅励磁系统。



1. 同步发电机
2. 整流主回路
3. 自动电压调节器
4. 发电机转子励磁绕组

图1—1 可控硅励磁基本原理示意图



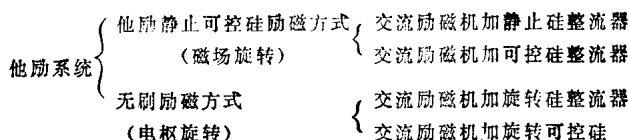
1. 测量比较环节
2. 移相脉冲环节。
3. 可控硅整流器，
4. 同步发电机。

图1—2 可控硅励磁系统基本框图

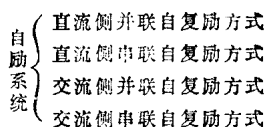
二、可控硅励磁系统的分类

可控硅励磁系统分类方法有多种，按可控硅主回路分，可分为单相和三相可控整流电路等；按整流变压器方式分，可分为单变和双变可控励磁系统。这里，我们按交流励磁电源的种类来分，可分为：

(1) 他励系统：采用与主机同轴的交流发电机作为交流励磁电源、经硅整流器或可控硅整流供给励磁能源。他励系统又可细分如下：



(2) 自励系统：采用变压器作为交流励磁电源，励磁变压器接在发电机输出端或厂用电母线上。励磁电源取自发电机自身或发电机所在的电力系统。



(3) 谐波励磁系统：一种介于他励和自励两类励磁系统之间的系统，适用于小容量发电机。

(4) 直流励磁机的可控硅励磁：可控硅装置只控制直流励磁机的励磁电流，起励磁调节器的作用。

目前，在中、小型水电站中，常被采用的可控硅励磁系统有下列几种：

(1) 机端变压器系统：又叫自并激系统或叫“单变”系统。即发电机端安装一变压器供给励磁能量。这种系统系统简单，节省有色金属，安装方便。与同轴励磁系统比较，它缩短了机组高度（对立式机组可以降低厂房高度），可以采用逆变灭磁，从而取消了灭磁开关。单变系统具有强励和强减能力，是一种很有前途的励磁系统，已被广泛采用。

(2) 自复激系统：也叫双变系统，它的励磁能源由两部分组成，即由机端变压器和复励变压器联合提供。机端变压器提供正常运行时的励磁电流，复励变压器提供发电机短路时强励电流。

自复激系统在电流和电压组合上，又可以分为下面三种：

①直流侧并联相加：即复励变压器经硅整流器整流与并联变压器经可控硅整流，在直流侧并联，接入发电机转子回路。国内自复激大多采用这一种。这种方式的主要问题是复励变压器的二次回路，必须具有很好的防止过电压的措施，以防止复励变压器在短路电流流过时，由于饱和而引起的过电压损坏励磁设备。

为了简化接线，可控部分一般采用半控桥方式，这样就必须在励磁回路增设灭磁开关，同时限制水轮发电机组的过电压能力，就不如全控桥采用逆变的效果好。此种方式在可控硅励磁刚问世时被大量采用，而目前正逐步被自并激方式所代替。

②交流侧串联相加：即复励变压器和并联变压器二次侧交流串联相加后，再经可控硅装置接入转子回路。这种方式可以克服上述接线的缺点。复励变压器具有空气隙，这就有效的防止了过电压，可以采用全控整流桥逆变灭磁。为简化励磁系统，取消灭磁开关，限制水轮发电机过电压创造了条件，但这种接线的主要问题是水轮发电机自同期时，电压建立速度很慢，虽然对水轮发电机冲击电流的大小没有影响，但拉长了自同期电压恢复时间。这种方式在小水电站一般不采用。

③直流侧串联相加：即复励变压器经整流桥与并联变压器经可控硅整流在直流侧串联相加。这种接线，克服了上面两种接线中存在的问题，可以采用全控桥逆变灭磁，不影响自同期建压速度。但整流装置的硅元件的运行条件恶化，要求可控硅元件有较高的耐压能力和较大的过流能力。

(3) 谐波励磁系统：在发电机定子上附加一个独立的谐波绕组，将贮存于气隙磁场中原先未加利用的谐波功率引出来，经硅整流装置整流后供给本机组励磁电流。

谐波励磁系统有一个重要特性——自调节作用，谐波绕组

电压随发电机负荷增高而自动增加。在发电机短路时，谐波电压急剧增加，有利于电机强行励磁。所以，谐波励磁系统反应速度快，制造简单，消耗材料少，使用及维护都比较方便。

目前对谐波电压的准确计算还比较困难，谐波励磁系统启动比其他类型的可控硅励磁系统麻烦，所以目前还处于试验阶段，在500千瓦以下的水轮发电机组中采用较多。

作为可控硅的励磁能源，国内还有采用同轴的交流励磁方案；直流励磁机加交流辅助发电机方案；加中频机的方案；加单相机端变压器的方案；等等。

三、可控硅励磁系统对电力系统的稳定作用

(1) 维持电力系统电压在一定水平上。当电网负载增加时，发电机的端电压下降，使可控硅控制角减小，导通角增大，励磁电流增大，励磁电压增大，将发电机端电压提升到原来额定值。反之亦然。所以发电机端电压维持在一定水平上，保证了供电电压恒定。

(2) 提高输出功率。

发电机的输出功率是发电机空载电势 E_d ，发电机端电压 U_f 以及这两者之间的相位差 δ 角的一个函数。

E_d 为常数的情况下，发电机的最大输出功率在 $\delta = 90^\circ$ 的点上，但发电机在此点运行是不稳的，若系统稍有扰动，发电机将失去同步。 $\delta > 90^\circ$ 时，发电机的输出功率随着 δ 的增加而减小，而输出功率的减小，原动机输给发电机功率不变，又使 δ 角增大，导致发电机从电网上解列。通常发电机总是在 $\delta < 90^\circ$ 的某点上运行。为了提高发电机的输出功率，可以适当增大励磁电流。

当负载突然增大时，自调励磁装置增加励磁电流，使发电机在同样的 δ 角下工作在额定输出点。因此，励磁的增大，提高了输出功率，发电机能够抗拒更大的干扰，从而也就提高了发电机运行的稳定性。

(3) 提高继电保护装置的可靠性。当系统中发生短路事故时，因为有自动调节励磁装置和强行励磁装置，从而使短路电流衰减很慢，有的甚至不衰减。这就保证短路电流超过继电保护装置的整定值时，继电保护装置仍能可靠动作。

(4) 水轮发电机突然卸载时限制电压上升。

发电机电压与转速成正比，且由励磁的方式决定。当某种原因使水轮发电机突然卸去大量负载时，转速将在一个短时间内迅速上升。若不能迅速降低励磁电流，则可能使电压上升，以至烧坏电机，自动励磁装置和强行减磁装置在电压升高到某一数值后即迅速减小励磁电流，限制发电机的最高电压，防止卸载时的电压上升。

(5) 改善系统的工作条件。如系统中有多台装有自动调节励磁装置的同步发电机并列运行，且当其中一台发电机因事故失去励磁时，这台发电机对系统是一个相当大的感性负载，自调励磁装置能满足其所需的电感性无功功率平衡，系统电压不致因一台发电机失励而大大降低。当异步运行的发电机在自同期并列运行时，自动调节励磁装置能快速增加励磁，加速拉入同步，缩短并列过程。

(6) 加速短路消除后系统电压的恢复，改善异步电动机自启动条件。

四、对自动调节励磁装置的要求

(1) 在各种负荷情况下，调节装置能够根据要求维持发电机电电压在一定水平上。

(2) 为了在机组间合理分配无功功率，调节装置必须有适当的调节特性，在多台发电机机端母线并列运行的情况下，发电机为向下倾斜的正调差的特性；而多台发电机——变压器组并列于高压母线的情况下则为向上倾斜的负调差特性，一般不采用无差调节特性。这些特性绘于图1—3。对调差特性的这种要求在下一节还要进一步分析。

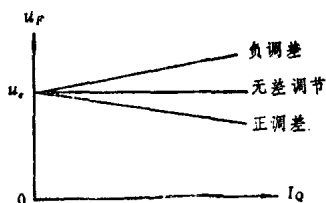


图1—3 具有自动励磁调整装置的发电机外特性

(3) 自动调节励磁装置反应灵敏，动作迅速，当电压有微小偏差时即能够迅速进行调节，而且当电压显著下降时，调整装置能作用于励磁电源，使励磁达到顶值，施行强行励磁。

(4) 自动调节励磁装置在人工稳定工作的调节过程中应保证整个系统的稳定。调节过程中不论是调节装置本身还是励磁电源，被调量不是一次到达新的稳定值，而是经过一个振荡过程才达到这个稳定值的。

五、并列运行的无功分配及有差调节

同步发电机并列运行时，励磁电流的大小并不能影响各机组间有功功率的大小（有功功率的分配决定于各机组水轮机主

轴上输出的有功功率的大小),但是励磁电流的大小直接影响到各机组间无功功率的分配。我们分几种情况讨论如下:

(1) 两台和两台以上无调差特性的同步发电机不能并列运行。这个道理是容易理解的,因为两台无差调节的发电机特性不能调节得完全一样,总有一台的电压高一些,另一台的电压要低一些。并列于同一母线上运行时,电压低的发电机的励磁调节装置因母线电压超过其给定值,必将该电机电压调到更低,其结果是由电压高的发电机担负所有负载的无功功率。且电压低的发电机还要担负电压高的电机吸收的无功功率。这是极不合理的。此外,如果在理想情况下,两台机组调节特性完全一致,则无功功率分配不固定,而可能成为任意一种比例关系,这是一种不稳定的运行关系。所以无调差特性发电机不能并列运行。

(2) 一台无差特性发电机与一台有差特性发电机并列运行,如图 1—4 所示。这样两台发电机可以并列运行工作在共同电压 U_1 下的 a 点,这时第二台发电机的无功电流为 I'_{Q2} ,如果负载无功电流增加,就只能由第一台无差调节的发电机负担,这也是不合理的。如欲使有差调节的发电机负担一部分增加了的无功负荷,则需人工调节第二台发电机的调差特性至 U'_2 ,使特性曲线交于 a' 一点,这时第二台发电机的无功电流为 I'_{Q2} ,这种无功电流的分配方式虽然在理论上可行,但在工程实践上却不合理。因为负载的无功功率是随时变化

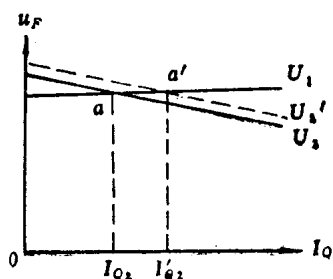


图 1—4 一台无差和一台有差调节特性发电机并列运行

的，而无功电流的分配则不能自动调节，因此在实际上也不采用。

(3) 多台有差特性的发电机并列运行是通常采用的方式。如图1—5所示两台调差特性不同的发电机，第一台调差小，第二台调差大，但是两者可工作在共同的母线电压 U_F 上，这时两台发电机分别负担之无功电流为 I_{Q1} 及 I_{Q2} ，如果负载的无功功率增加，两台电机经过自调励磁装置的调节，母线电压重新工作在 U'_F 上，则两台发电机都增加了无功电流，而且不论 U_F 或 U'_F 的电压如何，它们的无功电流的分配是固定的，因而工作是稳定的，可以看出调差小的发电机当无功负荷增加时分配给它的无功电流增量 ΔI_{Q1} 比调差大的发电机无功电流增量 ΔI_{Q2} 大，这样的分配是合理的，即大容量发电机的调差小，故应多分配一定的无功负荷，小容量发电机的调差大，无功负荷增量也应少些，如果两台发电机容量相同，则在选择和调节自动调节励磁装置时，使其调差曲线尽量相同，这样，无功电流的分配及其增量也是相等的，其工作状况是合理的。

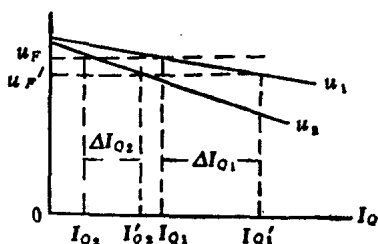


图1—5 两台有差调节特性的发电机并列运行

以上所讨论的是将发电机端电压直接并接于同一母线上的情况，如果发电机经变压器并接于高压侧母线时，情况又不同了，因变压器有较大的电抗，这时如果发电机采用无差调节，经过变压器的电抗压降到高压母线，其电压也成为有差特性的了，如果变压器的电抗较大，为了使母线上电压调差不至太大，也可采用负调差特性的发电机自动调节励磁装置作补偿。

综上所述，我们可以得到如下几点结论：

(1) 在单机运行的孤立系统中,为了保证用户的电压质量,可以采用无差调节,甚至采用负的调差特性。

(2) 在多台机并联运行的小型水电站中,没有与大电网连接,则各台机的调差率可以按无功分配稳定的原则来整定,数值上尽可能小一些,一般可整定为 $2\sim 3\%$ 。

(3) 与大电网并联运行的小型水轮发电机组,一般只带固定无功负荷,调差率可以尽可能整定大些,但整定值过大,在甩负荷后,稳定电压数值偏高,在整定时应根据上述两个方面综合考虑选取一个适当的数值,一般可以为 $5\sim 10\%$ 。

六、同步的原理及其应用

所谓同步,就是指使作用信号(如同步电压)与系统电信号的振荡频率相等。对于同步发电机可控硅励磁系统,就是指使从同步变压器与触发电路取得的同步电源的振荡频率与主回路可控硅的阳极电压的振荡频率相等。也就是说,当主回路输入电压按一定频率变化时,触发电路应保证在主回路电压的每一周期中都在同一相角时发出脉冲。即保证可控硅在每个周期中都有固定的导通角。因为主回路接的是交流电源,可控硅得到的第一个触发脉冲的时刻都应相同。电源电压每次经过零点时,必须把电容上的电荷都放掉,然后再从零开始重新充电,这样才能保证每次在正半周时发出第一个脉冲的时间都相同,这就是触发脉冲与电源电压的同步。也就是说,当可控硅加上正向阳极电压时,就输给可控硅控制极正向触发脉冲,阳极电压过零变负后,触发脉冲已不起作用。

如图1—6所示,同步电压器 B 的交流电压与可控硅的主回路的交流电压同步。当同步电压 U_B 过零时,单结晶体管的峰点