

现代 中小型同步发电机 励磁系统的 分析与设计

何友观主编



机械工业出版社

1.13

现代中小型同步发电机励磁系统的 分析与设计

何友观
梅 崑 潘瑞征 杨 铮 编 著



机械工业出版社

前 言

随着国民经济的迅速发展,无论对移动电站还是小型交流电力系统,都提出了很高的技术要求,除了要求发电站发出的电压能够准确地维持在50Hz以及在并联运行时能使负载稳定均衡运行外,还对它的调压精度、动态性能提出了很高要求。传统生产的那种带有励磁机的同步发电机,不仅材料费、工艺复杂,而且性能也远远达不到上面所提出的要求,为了解决这些矛盾,迫切需要发展某种新型励磁系统的同步发电机,以满足日益提高的技术要求。

近年来,由于对电机内部电磁理论研究的日益深化,以及电子技术的日益发展,电子器件的可靠性大为提高,因而就有可能借助电子技术来完善电机的励磁系统,以提高电机的性能。现代中小型同步发电机励磁系统的研究工作就是在此基础上发展起来的,具有这种励磁方式的同步发电机在我国生产的品种规格不少,并且各具特色,其中主要励磁方式有:相复励励磁方式(其中又有电抗移相式,双绕组电抗分流式,三绕组谐振式)、三次谐波励磁方式、晶闸管直接励磁方式以及采用了交流励磁机结构型式的无刷励磁方式等,由于这些励磁方式所显示出来的优越性,故在近年来已广泛地用于国防、生产、生活的各个方面。

由于到目前为止,对于这种现代中小型同步发电机励磁的原理、设计计算与运行等方面还缺乏系统的介绍,于是我们根据近年来有关杂志所发表的一些资料,以及我们多年来从事这方面教学、科研、生产的一些经验与体会编著了这本《现代中小型同步发电机励磁系统分析与设计》一书,我们编著的起点是:认为读者已经学习过《电机学》、《电子技术基础》等课程,因而有关这些方面的内容原则上不再重述,而把主要着重点放在现代励磁方式的某些特点方面。

本书由江西工业大学何友观副教授负责编著第一、二、三、七章以及附录I、II、III、IV,江西第二电机厂梅 工程师负责编著绪论、第四章以及参与第七章的编著工作,潘瑞征负责编著第五章以及附录V,华东交通大学杨铮工程师负责编著第六章。全书由何友观副教授统稿。在这里我们还要感谢江西工业大学诸孝文同志在使用本书稿进行教学中对本书某些内容提出了有益的修改意见。

本书于1984年10月经原机械工业部电机专业教材编审组评审,并推荐出版。可作为高等工业学校选修课教材,是中小型电机厂从事此项工作的电机设计、制造、调试人员的参考资料,也可作为中小型发电站从事维修、运行工作的人员的有实用价值的参考书。

编 著 者

目 录

绪论

§ 0-1 概述	1
§ 0-2 自励恒压同步发电机励磁系统的作用	2
§ 0-3 对现代同步发电机励磁系统的要求	3
§ 0-4 励磁方式发展简史	5

第一章 电抗移相式励磁方式

§ 1-1 电抗移相 (无变压器) 励磁方式	13
§ 1-2 利用辅助绕组供电的电抗移相式线路	23
§ 1-3 谐振式励磁方式	24
复习思考题	25

第二章 双绕组电抗分流式励磁方式

§ 2-1 工作原理	26
§ 2-2 运行分析	26
§ 2-3 励磁参数的选择	31
复习思考题	37

第三章 谐波励磁方式

§ 3-1 概述	38
§ 3-2 谐波励磁绕组	38
§ 3-3 谐波励磁发电机的自动电压调整	41
§ 3-4 谐波绕组匝数计算	42
§ 3-5 谐波绕组匝数的试验调整	46
§ 3-6 隐极谐波励磁发电机的设计特点	50
§ 3-7 加工工艺对谐波励磁发电机的影响	53
复习思考题	54

第四章 交流同步发电机的无刷励磁

§ 4-1 概述	55
§ 4-2 无刷励磁的基本原理	55
§ 4-3 无刷励磁同步发电机的励磁方式	57
§ 4-4 无刷励磁发电机的设计特点	62
§ 4-5 无刷励磁发电机的典型结构形式及旋转整流装置的设计	64
§ 4-6 无刷交流励磁机的计算基础	67
§ 4-7 无刷交流励磁机的设计程序和计算举例	76
复习思考题	86

第五章 电压调节器

§ 5-1 概述	90
§ 5-2 典型单元线路	91
§ 5-3 典型系统线路	109
§ 5-4 发电机和电压调节器的系统数学模型	125

IV

§ 5-5	系统的稳定判据和获得稳定的方法	142
§ 5-6	调节系统的温漂补偿	151
§ 5-7	电压调节器的可靠性设计与计算	158
	复习思考题	165
第六章	相复励发电机的并联运行	166
§ 6-1	概述	166
§ 6-2	并联运行中的故障分析	166
§ 6-3	提高并联运行稳定性的措施	168
	小节	173
	复习思考题	173
第七章	谐波励磁发电机的并联运行	174
§ 7-1	中线三次谐波电流的分析	174
§ 7-2	中线三次谐波电流的去磁效应与波动现象对并联运行影响的分析	178
§ 7-3	中线电流对并联运行影响的抑制	179
§ 7-4	谐波励磁发电机并联运行中的几个应注意的问题	181
	复习思考题	182
附录		183
附录 I	自励恒压小型凸极同步发电机气隙计算	183
附录 II	改变磁极形状提高谐波励磁发电机励磁容量的分析	185
附录 III	考虑饱和状态的凸极同步发电机气隙 磁场	189
附录 IV	单双层绕组的组成及其最佳匝数配合	193
附录 V	典型电压调节器线路收集和分析	201

绪 论

§ 0 - 1 概 述

从现代的观点来看,励磁系统已成为交流同步发电机中最核心、最主要的组成部分之一,也是经典的同步发电机中最有发展前途的部分之一。

随着科学技术的不断发展、生产的不断现代化,国民经济各部门都往高速化、自动化方向发展,对发电机供电质量的要求也越来越高。因此,近年来,发电机的改进颇为国内外关注,而研制的中心是不断改善发电机的励磁方式,从而提高发电机的技术指标,以适应对发电机系统不断提出的高要求。

励磁系统性能的好坏和运行的可靠性,直接影响同步发电机系统的供电质量及其运行的可靠性和稳定性。因此各国学者几十年来均致力于励磁系统的研究和改进。伴随着半导体工业的迅速发展,目前国外已出现了名目繁多的各种自励恒压励磁系统。例如:相复励励磁系统,晶闸管励磁系统,旋转相复励无刷励磁系统,旋转硅整流器无刷励磁系统及旋转晶闸管无刷励磁系统等等。

近十几年来,我国有关工厂、研究所和高等院校通力合作,对自励恒压系统的研究,做出了不少成绩,且有独到之处。如成功地研制了谐波励磁系统,可控相复励励磁系统及谐波无刷励磁系统等技术经济指标较高的多种新颖的自励恒压励磁系统。近几年来,我国电机工作者在中小型同步发电机励磁系统的某些专题研究中又做出了新的成绩,获得了新的成果。例如:成功地解决了谐波励磁发电机的并联运行问题;研究了稳态调压率达 $\pm 3\%$ 的不控相复励励磁系统;研究了柴油交流发电机组并联运行的稳定性问题及用电机系统的数学模型法设计电压调节器等等。

同步发电机的励磁系统包含两个内容:励磁功率的产生方式和励磁的自动调节方式。同步发电机的励磁功率,通过外部电源获得的称为他励式励磁系统;由发电机内部功率获得的称为自励式励磁方式。若自励式励磁系统能自动地使发电机在任何负载下及各种工作环境下,其端电压均能稳定在一定的水平上,这就是自励恒压式励磁系统。现代的中小型同步发电机基本上均为自励恒压式励磁系统或称为自励恒压式同步发电机。

要使同步发电机能恒压,励磁系统还必须具备自动调节的功能。励磁的自动调节方式种类繁多,到目前为止,各种不同的励磁自动调节线路已多达数万种。但按其自动调节原理来分,则不外乎下述三种:

1. 按负反馈原理构成。
2. 按扰动调节原理构成。
3. 按复式调节原理构成。

同步发电机按负反馈原理构成励磁自动调节系统时,静态调压指标高,调压特性曲线线性度好,但动态特性差。按扰动调节原理构成时,动态特性好,但调压特性曲线线性度差。

而按复式调节原理构成时，兼有上述两种调节原理的优点。

需要指出的是，现代同步发电机与电子技术是紧密联系在一起的。我们必须以电子、电机综合体系的观点来研究现代中小型同步发电机的励磁系统，以便利用电子、电机技术的各自特点来创造出最佳的励磁系统，研制出最优秀的现代同步发电机。

§ 0-2. 自励恒压同步发电机励磁系统的作用

一、维持同步发电机端电压为一定水平

因为发电机在正常工作情况下，负载总是在不断地变化着。而不同容量的负载，以及负荷的不同功率因数，对同步发电机励磁磁场的电枢反应作用是不同的，对同步发电机的内部阻抗压降也是不一样的。要维持同步发电机端电压为一定水平，就必须根据负载的大小及负载的性质随时调节同步发电机的励磁。显然，这一调节过程只有通过电压的自动调节装置才能实现。

有或无自动调节装置的同步发电机外特性曲线示于图 0-1。图中曲线 1 为无自动励磁调节装置的外特性，曲线 2 为有自动励磁调节装置的外特性。

二、提高电力系统的静态稳定性

现代电力系统的发展趋势是增大输送距离和提高输送功率。这需要解决许多技术问题。而其中最重要的和最基本的困难之一是同步发电机只具有较小的静态稳定性。但由于自动励磁的调节装置的出现，使这一问题得到了圆满的解决。

通常，同步发电机输送到系统的功率为：

$$P = \frac{E_0 U}{X_{d\Sigma}} \sin \theta \quad (0-1)$$

式中 E_0 —— 发电机在某励磁电流时的电势；

U —— 系统母线工作电压；

$X_{d\Sigma}$ —— 发电机的同步电抗和至工作母线为止的线路总电抗之和；

θ —— 功率角。

当 $E_0 = C$ 时，因发电机稳定运行的极限功率角为 90° ，相应的最大输出功率为：

$$P_{\max} = \frac{E_0 U}{X_{d\Sigma}} \quad (0-2)$$

显然，对于某一特定的同步发电机供电系统，母线电压 U 和线路总电抗 $X_{d\Sigma}$ 不变时，增加同步发电机的励磁，即可提高发电机电势 E_0 与增大极限功率角 θ ，因而增加输送功率。而当输送功率为一定时，允许电力系统总电抗 $X_{d\Sigma}$ 有所增加，即可以增大输送距离。

图 0-2 为同步发电机的功角特性。

在 $\frac{U}{X_{d\Sigma}} = \text{const}$ 及 $E_0 = \text{const}$ 下，由式 (0-1) 知

$$P \propto \sin \theta \quad (0-3)$$

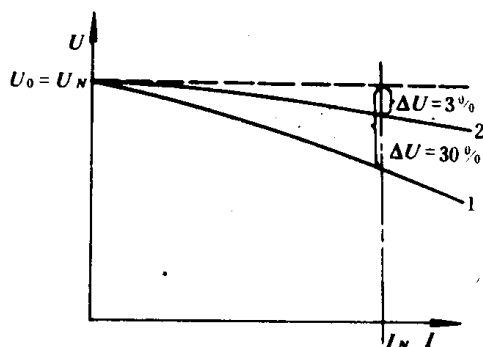


图 0-1 同步发电机的外特性

1 — 无自动励磁调节装置的外特性

2 — 有自动励磁调节装置的外特性

得曲线1, 它表示无自动励磁调节装置的功角特性。

在 $\frac{U}{X_d \Sigma} = \text{const}$ 下

$$P \propto E_0 \sin \theta \quad (0 - 4)$$

得曲线2, 表示有自动励磁调节装置的功角特性。

但是 E_0 应按曲线2与曲线1的差值规律变化。由于采用了自动励磁调节装置, 其强励作用增大了 θ 角的极限值, 因在 θ 大于 90° 以后, 仍可使 $\sin \theta \cdot E_0$ 的乘积随 θ 的增加而增加, 使发电机能稳定运行在比 90° 大的人工稳定区域内。

三、提高电力系统动态稳定性

当电力系统的负荷发生突变、线路结构参数改变、以及电力系统遭受短时突然短路等故障干扰时, 电力系统能否继续稳定运行, 也是同步发电机的重要性能之一。增大励磁自动调节系统强励能力, 降低励磁调节系统的时间常数, 也是提高电力系统动态稳定性的有效措施。

四、提高继电保护装置动作的准确性

当电力系统发生短路时, 由于励磁自动调节系统的作用, 短路电流大大增加, 从而提高了继电保护装置动作的准确性。

五、保证并联运行系统的正常工作

励磁系统的无功分配单元可保证参加并联运行的各发电机的输出无功功率获得均衡分配, 增加了稳定环节的无功分配单元是保证强励能力大的并联运行系统能正常稳定工作的重要条件之一。

§ 0 - 3 对现代同步发电机励磁系统的要求

由于励磁方式对同步发电机的性能有着极为重要的影响, 所以现代同步发电机对励磁系统也提出了许多必备的要求。

随着国民经济各部门都向电子化、高速化、自动化方向发展, 对发电机供电质量的要求也愈来愈高。对现代同步发电机提出了许多新的、更高的技术要求。例如, 对保证供电质量的二个基本指标——静态调压率和动态调压率就作出了比T 2系列技术条件(1977年版)更高的技术要求。标准中对静态指标规定为: “发电机的稳态电压调整率 (δu) 分为 $\pm 1\%$ 及 $\pm 2.5\%$ 两种。发电机从空载到额定负载的所有负载, 电压应能保持在 $(1 \pm \delta u) U_H$ 范围内。

稳态电压调整率按下列公式计算:

$$\delta u = \frac{U_1 - U}{U} \times 100\%$$

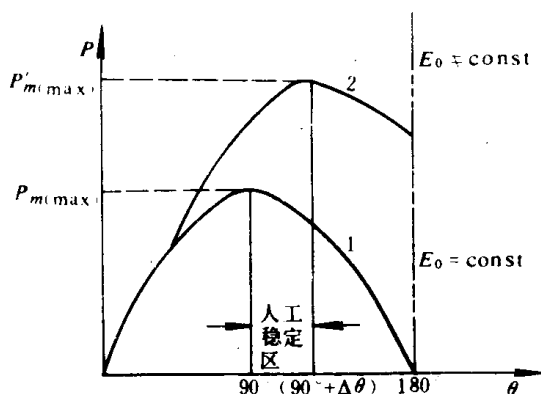


图 0 - 2 同步发电机的功角特性

a) 突加负载波形图 b) 突卸负载波形图

电压变化 $B_1 \leq 15\%$, 电压变化 $B_2 \leq 20\%$,

反应时间 $t \leq 1\text{ s}$

式中 U —— 额定电压或95%额定电压 (V) ;

U_1 —— 从空载到额定负载的稳定电压 (V) , 取负载变化时各点电压中的最大 (或最小) 值。按三相平均值计算。

稳态电压调整率是在下列条件下确定的:

1) 负载功率从空载到额定负载, 并三相电流平衡;

2) 运行状态从冷态到热态;

3) 功率因数从0.8 (滞后) 到1.0 ;

4) 原动机的转速变化率规定为5% (即空载时为105%额定转速, 满载时为额定转速)

如原动机的转速变化率小于5%而另有规定时, 则按规定的转速变化率。

对动态指标规定为:

“当发电机为空载、转速与电压均为额定值时, 突加一负载电流相当于60%额定电流的三相对称负载 (功率因数不超过0.4 滞后); 在电压达到稳定后, 再突甩此负载。在突加、突甩的整个过程中, 发电机电压的变化应在85~120%额定电压范围内, 而突加或突甩瞬时到发电机电压恢复至 $(1 \pm 3\%) U_N$ 所需的时间应不超过1s”

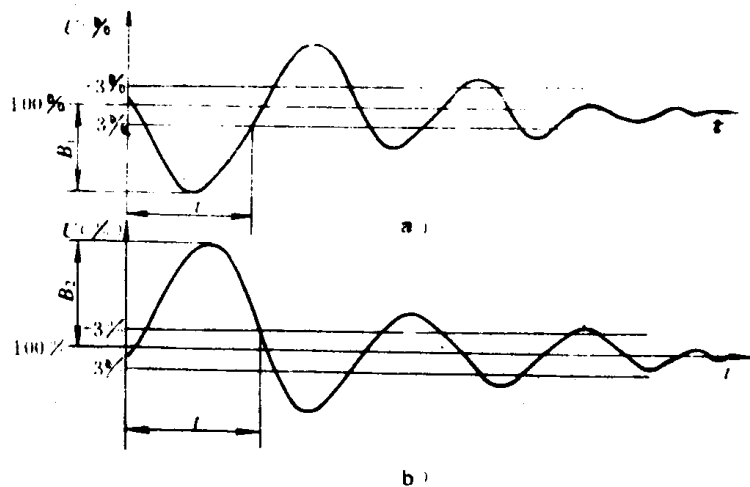


图 0-3 动态特性波形图

另外, 与T2系列技术条件比较, JB3320-83小型无刷三相同步发电机技术条件中还增加了如下一些新的技术要求:

1. 发电机应能稳定并联运行。作并联运行的各台发电机, 其最大功率与最小功率之比应不超过3:1。在负载的总功率为并联运行电机总功率的20~100%范围内时, 各发电机实际承担的无功功率与按额定无功功率比例分配值之差, 应不大于各台电机中最大额定无功功率的 $\pm 10\%$ 及最小额定无功功率的 $\pm 25\%$ 。

2. 发电机的线电压波形正弦性畸变率应不超过5%。对300kVA以上的发电机其线电压的电压谐波因数 (THF) 应不超过5%。

3. 发电机在规定的最低环境空气温度下运行 (-15°C 或 -25°C 或 -10°C) 时, 其电压调整率应符合JB3320-83第2.7条的规定。

4. 发电机在空载额定电压下运行而三相突然短路, 此时短路电流的峰值应不超过额定电流峰值的15倍, 或有效值的21倍。短路电流峰值的容差为保证值的 $\pm 30\%$ 。

5. 当保护系统有要求时, 在稳定短路情况下, 带励磁系统的发电机应能维持不少于3倍额定电枢电流值, 历时2s。

为了满足上面对现代同步发电机提出来的许多高标准的新要求，现代励磁系统应具备如下一些性能：

1. 励磁系统应保证同步发电机系统在静态时有高的稳态电压精确度，即励磁系统的输出特性与发电机本身的调节特性应力求一致，使在任意负载下端电压稳定在一定水平上；
2. 励磁系统应具有足够的强励能力并快速动作，以保证发电机系统有优良的动态性能及良好的并联运行特性；
3. 不允许励磁系统使发电机的输出电压波形畸变和出现低频调制现象；
4. 励磁系统应保证发电机运转后能自励；
5. 在短路时，能自动调节励磁电流，从而使发电机在过载或短路时具有一定的稳定性，使保护装置能够可靠动作；
6. 励磁系统应能保证几台发电机并联工作；
7. 励磁系统在长期使用条件下应稳定、可靠、失灵区小；
8. 励磁装置还应体积小，重量轻，使用维护方便。

§ 0 - 4 励磁方式发展简史

由电机学知道，同步电机为了建立空载电压需要有一个空载励磁电流；而在负载时，为了补偿负载电枢反应的去磁作用及内阻抗压降，以保证发电机端电压保持不变，就需要补充一个负载励磁电流分量。在他励式发电机中，这些要求是由专门的直流发电机（即励磁机）及手动调节的磁场变阻器来保证的。当发电机带负载后发生电压下降时，则由操作人员根据电压的降落情况手动调节磁场变阻器，补充供给一个负载励磁电流分量，使电压保持不变。

在这里，励磁机、磁场变阻器和操作人员组成了一个最简单的励磁系统，这就是最古老的手动式励磁方式。它属于负反馈原理的偏差调节方式。由于这种励磁方式极不方便，操作人员的劳动强度也很大；而且精度低，性能差，根本满足不了科学技术日益发展的需要，因此在同步发电机中早已淘汰了这种励磁方式，而往自动调节方向发展。

同步发电机最初采用的自动励磁调节器是由直流励磁机加机电式励磁自动调节器组成。最早的机电式励磁调节器是在大约1900年前后问世的所谓振动脉冲调节器。

注：T 2 系列小型三相同步发电机技术条件规定（摘录）：

2.7 发电机的稳态电压调整率（ δu ）分为 $\pm 5\%$ 、 $\pm 3\%$ 及 $\pm 1\%$ 三种。发电机从空载到额定负载的所有负载，电压应能保持在 $(1 \pm \delta u) U$ 范围内。

稳态电压调整率按下式计算：

$$\delta u = \frac{U_1 - U}{U} \times 100\%$$

式中 U —— 额定电压或95%额定电压（V）；

U_1 —— 从空载到额定负载的稳定电压，取负载变化时各点电压中的最大（或最小）值。按三相平均值计算（V）。

稳态电压调整率是在下列条件下确定的：

- 1) 负载功率从空载到额定负载，并三相电流平衡；
- 2) 功率因数为0.8（滞后）到1.0；
- 3) 原动机的转速变化率规定为5%（即空载时为105%额定转速，满载时为额定转速）。

2.8 ……发电机在额定功率时从冷态到热态的电压变化，对采用可控励磁装置的发电机应不超过 $\pm 2\%$ 额定电压；对采用不可控励磁装置的发电机应不超过 $\pm 5\%$ 额定电压。

振荡脉冲式自动励磁调节装置应用不多。1920年前后又出现了变阻原理的炭阻式自动励磁调节装置，其线路原理如图0-4所示。

炭阻调压器由三个主要部分所组成：（1）控制测量元件的电磁铁及磁铁上由发电机供电的励磁线圈；（2）接在发电机励磁线圈回路内的炭阻变阻器；（3）建立反作用力的弹簧。

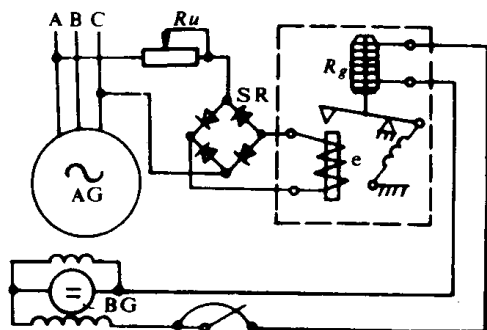


图0-4 炭阻式励磁调节器

AG—交流发电机 R_f —可变炭阻 BG—直流励磁机

R_u —变阻器 SR—硅整流器 e—电磁铁

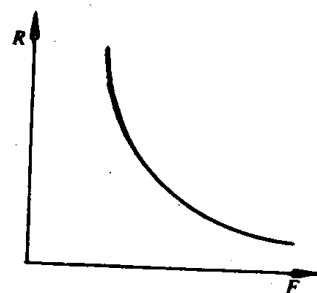


图0-5 炭柱电阻与作用在炭柱上压力关系曲线

R —炭柱电阻 F —炭柱上压力

炭阻变阻器是由炭柱组成，其电阻随施加在该炭柱上的压力而能连续平滑地变化。炭柱电阻与压力的关系如图0-5所示。其作用原理是通过电磁铁产生的压力变化，改变炭柱上的压力，使炭柱电阻值改变，达到调节励磁电流的目的。但由于这种励磁方式强励能力小，动态性能差，起动异步机困难，特别是常因励磁机及炭阻调压器的故障较多而使工作不可靠，维护麻烦，所以直流励磁机加机电式自动励磁调节装置的励磁方式，已逐渐为其他励磁方式取代。

1930年前后，电子离子式励磁调节装置获得成功。这种电子离子式励磁调节装置的整流部分、测量环节、放大环节均采用电子管或闸流管，利用其栅极进行自动控制和调节。这种励磁装置曾在较大容量的同步发电机上作为其励磁机励磁的调节装置而获得一定的应用。但由于这种装置要外电源供电，受外电源工作可靠性的影响较大，同时装置中的电子管、闸流管等元件寿命低、易损坏，所以也未能得到大规模推广应用。

随着电子、电机技术的不断发展和完善，人们对同步发电机的励磁系统又有了新的认识，出现了许多新的励磁方式。电机工作者通过对励磁方式和同步发电机的不断深入研究发现，如果励磁系统的输出特性和发电机的调节特性一致，那么发电机就能变成一个理想的自励恒压发电机。

1935年德国西门子公司根据这一原则研制成功了一种相复励励磁方式，一般称为“西门子方案”。其线路原理见图0-6。

“西门子方案”的相复励励磁方式由半导体整流器、三绕组变压器、电抗器及电容器四部分组成。这是最早的相复励励磁方式。现代的各种相复励励磁方式都是在这个

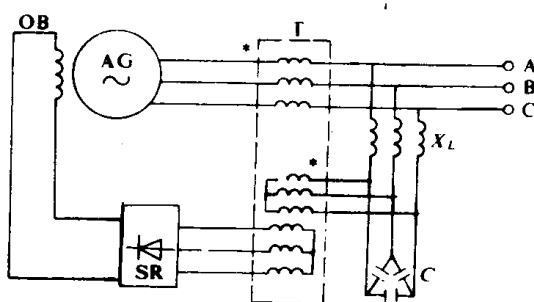


图0-6 “西门子方案”

AG—同步发电机 T—三绕组变压器 OB—励磁绕组

X_L —线性电抗器 C—谐振电容器 SR—硅整流元件

方案的基础上演变和发展起来的。

根据电流源和电压源的不同组合，相复励在原理上可分为三种不同的接线方式。

(1) 电势复合方式，原理线路见图 0-7。

目前，在中小型水轮发电机中运用最多的双绕组电抗分流式励磁方式就是这种电势复合的相复励系统。

(2) 电流复合方式，原理线路见图 0-8。

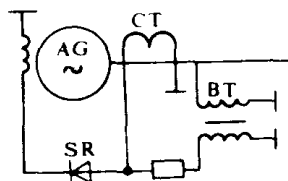


图 0-7 电势复合方式

AG—交流发电机 BT—电压互感器
CT—电流互感器 SR—硅整流元件

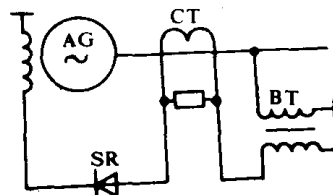


图 0-8 电流复合方式

AG—交流发电机 BT—电压互感器
CT—电流互感器 SR—硅整流元件

这种励磁方式的应用实例就是目前 T 2 系列中所采用的，也是目前国内中小型陆用、船用发电机所广泛使用的电抗移相、电流复合的相复励励磁系统。

(3) 电磁复合方式，其原理线路见图 0-9。

这种励磁方式的应用实例就是著名的“西门子方案”，又称为谐振式三绕组变压器式相复励系统。

由电机学知道，要自励并建立起发电机的空载电压，励磁电流中必须含有与发电机的端电压成比例的励磁分量（称为电压分量或空载分量）。在发电机带有负载时，为了补偿电枢反应作用和抵消电枢内阻抗压降的影响，励磁电流还要具有与负载电流成比例的电流分量（或称为负载分量）。同时，从同步发电机的调整特性（ $I_f = f(I)$ ， $U = \text{const}$ ， $\cos \varphi = \text{const}$ ）来看，若要保持端电压不变，当负载电流的大小相同时，励磁电流还与负载的功率因数有关。如图 0-10 所示。因此，励磁电流还与其空载分量和负载分量之间的向量关系有关。综合起来，发电机的励磁系统交流侧必须由两个在相位上有一定关系的分量合成，如图 0-11 所示。

相复励励磁系统就是根据这一原则构成的。这种交流侧电流由两个在相位上具有一定关系的分量复合的励磁系统称为相复励励磁系统。即具有相位补偿和电复合的励磁系统称为相复励励磁系统。

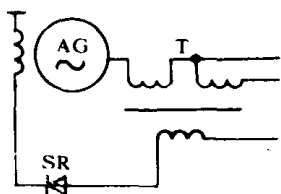


图 0-9 电磁复合方式

AG—交流发电机 SR—硅整流元件
T—三绕组变压器

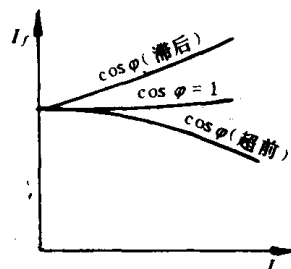


图 0-10 同步发电机调节特性

电机励磁上, 出现了采用晶闸管整流器直接励磁的励磁方式。

图 0-14 所示的线路原理图即为小型同步发电机中常用的原理线路。由于这种励磁方式是按偏差进行调节的, 晶闸管又是一种电子式元件。所以调压精度高, 反应速度快, 温度、频率变化补偿能力强, 体积小, 重量轻。但其强励能力及起动异步机能力较差, 无稳态短路电流维持能力; 特别是在晶闸管导通时与续流二极管有一个换向角存在, 使发电机电压波形产生一个几乎过零的缺口。影响了发电机的波形, 且会产生很强的无线电干扰。所以这种励磁方式没有经过多久时间就被淘汰, 使用很少。

60 年代初期, 国外还发展了一种新型的励磁方式——谐波励磁方式。美国 60 年代在大型汽轮发电机上应用了谐波励磁系统, 据报道, 连续运行了一年多没有发生故障。苏联在 70 年代开始有了 100 kW 以下的谐波励磁发电机系列产品。

60 年代中期, 我国电机工作者在汽轮发电机上进行了采用谐波励磁的研究工作。70 年代已有数合数万千瓦的大型谐波励磁发电机在电网上运行。60 年代末期江西的电机工作者又在小型凸极同步发电机上进行了谐波励磁的试验, 并从 T2 系列小型同步发电机中派生出了 T2S 系列谐波励磁同步发电机。由于凸极谐波励磁同步发电机结构简单、动态特性好, 具有与相复励类似的幅-相复励特性。因此, 引起了国内广大电机工作者的注意, 纷纷进行研究, 推动了谐波励磁系统的进一步发展。目前国内许多中小型同步发电机厂都在生产谐波励磁发电机。

谐波励磁基本原理是: 在发电机电枢槽中安放一组具有 $\frac{1}{3}$ 基波节距的绕组。气隙磁场在该绕组中产生的电势只含有三次谐波及三的倍数次谐波电势, 如图 0-15 所示。其中 $A_1 - A_2$ 为基波绕组, $H_1 - H_2$ 为谐波绕组, 则各次谐波磁场在谐波组中感应的电矢量合成, 除三次及三的倍数谐波电势外, 均为零。

为了得到具有幅-相复励的特性, 在凸极同步电机中, 转子磁场应取平顶波。发电机带感性负载后, 负载产生的三次谐波分量使谐波绕组中谐波电势加强, 所以凸极同步发电机具有良好的幅-相复励特性。

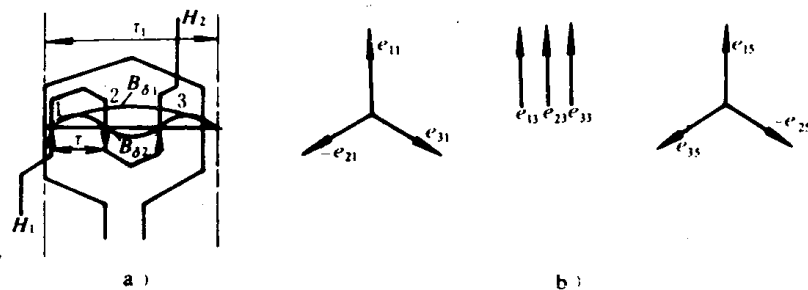


图 0-15 谐波励磁原理图

a) 绕组分布图 b) 矢量图

谐波励磁方式的主要特点:

(1) 仅靠一套谐波绕组, 不加电压校正器, 即能获得与相复励类似的幅-相复励特性。固有电压调整率一般在 $\pm 10\%$ 左右。特别设计的谐波发电机, 固有电压调整率可做到 $\pm 5\%$ 左右。其结构简单, 体积小, 重量轻, 运行可靠。

(2) 强励能力大, 动态特性好: 负载变化时, 电压变化小, 恢复时间短 (一般在 0.06s

以下)。

(3) 励磁增长速度快, 起动异步电动机能力大, 且具有维持一定短路电流倍数的能力。

(4) 附加并联运行装置后, 可以稳定地并联运行, 且并联运行特性好。

(5) 谐波励磁发电机的波形与相复励比, 其畸变率稍大。

(6) 谐波励磁的理论还不十分完善和成熟, 固有调压率受材料及工艺的影响较大。这些均有待于进一步提高和完善。

60年代末、70年代初, 国外又出现了一种更新型的励磁方式——无刷励磁系统。

据有关资料介绍, 无刷励磁原理是1950年由克来伦斯·算恩提出的, 最初用在航空电机上。1960年美国西屋公司首次成功地应用无刷励磁于大型汽轮发电机上。1964年日本富士公司研制小型柴油无刷发电机组获得成功。从60年代到70年代, 十几年时间内, 无刷励磁方式发展很快。在小型同步发电机上, 已占据了绝对优势地位。世界上各工业发达国家, 均纷纷发展了自己的无刷同步发电机系列。近几年来已成为普遍使用的主要系列。无刷励磁是已被公认为最有发展前途的励磁方式。

我国在60年代也开始了小型无刷发电机的研制工作。例如, 当时上海电器科学研究所与江西第二电机厂曾合作研制了一台10 kW 的无刷发电机, 但由于我国电子工业基础薄弱, 无刷发电机所需元件跟不上要求, 无刷励磁方式一直停留在试验研究阶段。近几年来, 许多研究单位和工厂又都在大力开展无刷励磁方式的研究, 并已开始出现了成系列的无刷发电机产品。例如兰州电机厂的T2W2系列无刷发电机, 江西第二电机厂的TWS系列谐波励磁无刷发电机等。最近, 我国又完成了TFW小型无刷发电机的统一设计工作, 试制的样机已通过了全国鉴定。

无刷励磁方式按其励磁机结构不同有三种型式: 带同步交流励磁机的, 带异步交流励磁机的, 带交流串级励磁机的。其原理图分别见图0-16、0-17、0-18所示。

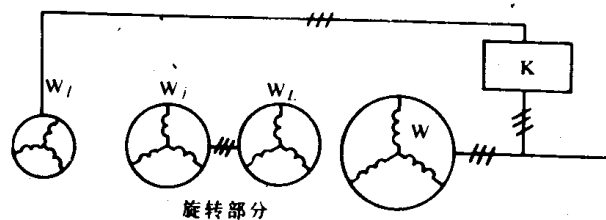


图0-16 带异步交流励磁机结构

K—励磁自动调节器 W_1 —励磁机电枢绕组 W —励磁机主绕组
 W_f —励磁机磁场绕组 W_L —主机励磁绕组

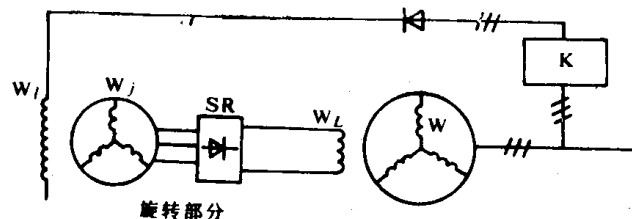


图0-17 带同步交流励磁机结构

K—励磁自动调节器 W_1 —励磁机电枢绕组 W —励磁机主绕组
 W_f —励磁机磁场绕组 W_L —主机励磁绕组 SR—旋转硅元件

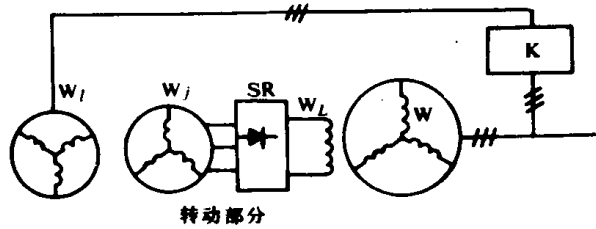


图 0-18 带交流串级励磁机结构

K—励磁自动调节器 SR—旋转硅元件 W—励磁机主绕组
Wj—励磁机电枢绕组 WL—主机磁场绕组 Wl—励磁机磁场绕组

无刷同步发电机一般采用同步励磁机的结构，交流励磁机的励磁功率由发电机输出供给，也可以附加一个永磁发电机，作交流励磁机的励磁电源，如图 0-19 所示。

励磁自动调节方式，对于旋转二极管型的，与自励恒压发电机类似。有采用晶闸管静止励磁系统的，有采用相复励励磁系统的，还有采用谐波励磁系统的。最近，国外又研制成功了一种旋转晶闸管式无刷励磁方式。其原理如图 0-20 所示。

无刷励磁方式的特点：

- (1) 无滑动接触部分，维护简单，可靠性高。可长期连续运行而不要维护保养，特别适用于无人管理的自动化电站中。
- (2) 没有旋转接触的导电部分，不会产生火花。因此也特别适用于有易燃气体及多粉尘等恶劣环境条件下的运行场合。
- (3) 无刷发电机的电压波形好，畸变率小。

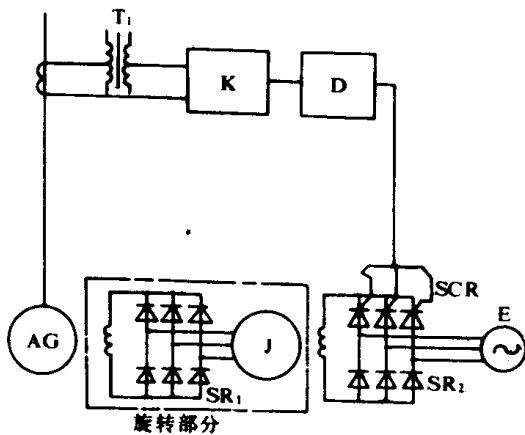


图 0-19 旋转硅无刷励磁方式

T₁—量测变压器 J—交流励磁机
K—励磁自动调节器 E—永磁发电机
AG—交流主发电机 SCR—晶闸管

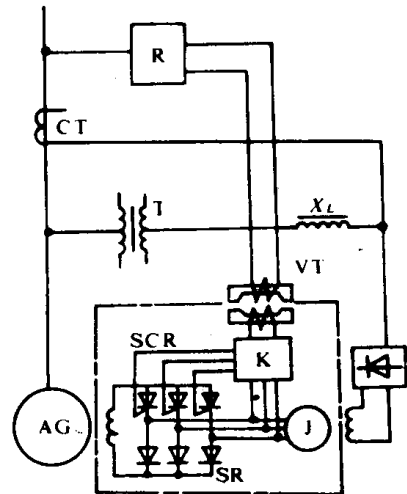


图 0-20 旋转晶闸管式无刷励磁方式

R—电压整定装置 K—励磁自动调节器
CT—电流互感器 J—交流励磁机
T—变压器 AG—主发电机
XL—线性电抗器 SCR—晶闸管
VT—旋转量测变压器 SR—硅整流元件

(4) 因属于他励式发电机, 容易实现并联运行。

(5) 旋转二极管式无刷发电机动态特性较差, 但线路简单, 可靠性好; 旋转晶闸管式无刷发电机动态特性好, 但线路过于复杂, 一般在数百千瓦以上无刷发电机上才采用。

综上所述, 交流同步发电机的励磁方式经历了一个由简单到复杂, 由低级到高级的发展过程。它由最早的手动励磁调节方式发展到自动励磁调节方式, 再由早期的动态特性差的负反馈调节原理发展到后来的动态特性好的扰动调节原理。为了适应现代科学技术发展的需要, 又出现了更为合理的现代励磁方式——复合调节原理的励磁系统。例如可控相复励励磁系统, 晶闸管分流谐波励磁系统及晶闸管谐波无刷励磁系统等。它既可保证发电机系统有高精度的静态性能, 又可使发电机系统具有良好的快速反应的动态性能。

各种励磁方式的原理及其设计计算方法详见后面各个章节的介绍, 此处不再赘述。