

338211

船舶电站同步发电机的 自动励磁装置

张汝均 编著



国防工业出版社

前 言

船舶电站自动励磁装置是船舶电站的重要组成部分。它对电站的正常运行和保证良好的供电质量起到十分重要的作用。在国内已经出版的有关船舶电站的教材中,虽然都涉及到励磁装置,但由于篇幅的限制,对许多重要问题不可能进行深入地分析。本书的目的是想在讨论常用励磁装置的一般工作原理的基础上,对几个重要问题进行比较深入地研究,希望能对从事这方面工作的研究设计人员及大专院校有关专业的高年级学生和研究生有所帮助。

相复励装置是目前船舶电站励磁装置中应用最广泛的一种。对于它的一般工作原理,许多书上都已作了介绍。但在设计计算方面,一般都采用以经验数据为依据的工程实用方法。本书第二章介绍的相复励装置计算方法,从电路的实际物理过程出发,推导了比较精确的计算公式,并阐明了一些主要参数的相互联系和选择原则。这是本书的一个重点内容。

励磁装置不仅要有良好的静态特性,而且要有良好的动态特性。为此,必须建立励磁系统的合理的数学模型,应用理论分析或计算机仿真的方法,综合静态和动态性能指标的要求,并在设计中满足这些要求。为此,本书的第五章专门讨论励磁系统各组成部分的数学模型,各类励磁系统的系统结构图。这是本书的另一个重点内容。

并联同步发电机间无功电流的分配与稳定,是励磁装置的一个共同性问题。本书第六章较深入地分析了各种类型的环流补偿线路,包括工作原理、矢量图和参数计算等。这是本书的又一个重点内容。

本书由张盖凡教授审稿。

IV

由于作者水平有限，书中可能有错误或不妥之处，请读者批评指正。

作 者

目 录

绪论	1
第一章 可控硅自动励磁装置	10
第一节 概述	10
第二节 测量比较电路	12
第三节 移相触发电路	31
第四节 主电路	40
第二章 相复励装置	50
第一节 概述	50
第二节 相复励装置的基本工作原理	52
第三节 凸极和饱和的影响·有曲折绕组的相复励线路	62
第四节 其它扰动量的补偿·有谐振电容的相复励线路	71
第五节 其它相复励线路	80
第六节 相复励装置的设计计算	87
第七节 可控相复励装置	122
第三章 三谐波励磁装置	128
第一节 三谐波电势的获得和发电机的自励	128
第二节 三谐波励磁的固有复励作用	135
第三节 三谐波励磁的几个问题	138
第四章 无刷励磁装置	143
第一节 概述	143
第二节 旋转二极管无刷励磁装置	146
第三节 旋转可控硅无刷励磁装置	152
第五章 励磁系统的动态分析	158
第一节 概述	158
第二节 同步发电机的数学模型	162
第三节 负荷的数学模型	179
第四节 相复励系统的动态分析	183

第五节	可控硅励磁系统的动态分析	196
第六节	励磁机的动态分析	206
第七节	交流无刷励磁系统的动态分析	209
第八节	励磁控制方法	212
第六章	并联同步发电机无功电流的分配与稳定	220
第一节	无功电流分配的基本原理	220
第二节	均压连接	225
第三节	调差线路	228
第四节	差动环流补偿电路 (DCC)	241
第七章	励磁装置线路举例	266
第一节	可控硅励磁装置	266
第二节	可控相复励装置	279
第三节	无刷励磁装置	288
附录		299
附录一	单结晶体管	299
附录二	非对称三相桥式整流电路的计算	303
参考文献		305

绪 论

在 50 年代以前，船舶电网主要采用直流电制，主发电机用的是直流复激发电机。当发电机负载电流的大小发生变化时，其端电压会因电枢反应和电枢电阻等压降的影响而发生波动。设计时，适当选择串激磁场的强度，可使负载波动时端电压基本不变。除了某些要求电压稳定度特别高的负载外，一般直流船舶电站可以不用自动励磁调节器。但是，直流电制存在的问题较多，所以从 50 年代末期开始，国内外都先后进行了电制改革，用交流电制代替直流电制，用交流同步发电机代替直流发电机。交流同步发电机的采用，使得自动励磁装置成为交流电站中的一个不可缺少的组成部分。这是因为当负载电流的大小或负载功率因数发生变化时，由于电枢反应引起的同步发电机的端电压波动比直流发电机的要严重得多。例如，若励磁电压保持恒定，则同步发电机从空载到满载（额定功率因数）时，其端电压可降为额定空载电压的 60~70%，使大多数负载无法正常工作。此外，同步发电机在并联运行中，除了有功功率应按机组容量成比例分配外，还要求无功功率也按机组容量成比例分配。这后一个问题在直流发电机中是不存在的。事实上，同步发电机的自动励磁装置还要完成其它一些重要任务。大致地可以这样认为：原动机和同步发电机保证提供足够功率的电能，而自动调速装置和自动励磁装置则是保证电能的质量能满足负载的要求（频率稳定度、电压稳定度等）。没有高质量的自动调速装置和自动励磁装置，就没有高质量的电能。正因为如此，无论是大电力系统或是小功率的车、船移动电站，自动励磁装置都是最重要的组成部分之一。自动励磁装置的研制工作，也逐渐地从同步发电机的研制中相对地独立出来，形成了一个专门分科。三十多年来，国内外研制出了

许多种船舶电站励磁装置，有的已形成了系列，由专门的制造厂生产，作为和船用同步发电机配套使用。

一、自动励磁装置的功能

为保证提供高质量的电能，自动励磁装置应具有下列一些主要功能：

1. 在发电机组起动后，转速接近额定转速时，自动励磁装置应保证发电机可靠起励，建立额定空载电压。对于有励磁机的他励系统来说，靠励磁机自励建立电压；对于无励磁机的自励系统来说，应要求励磁装置能确保发电机能自励建立电压。由于交流同步发电机的剩磁比直流发电机的剩磁小，而磁场回路的总电阻又比较大，还存在炭刷-滑环接触电阻和整流元件正向电阻这样的非线性电阻，所以交流同步发电机的自励比直流发电机的自励要困难一些。

2. 当负载大小或负载功率因数发生变化时，自动励磁装置应保证发电机端电压的波动在允许范围之内。发电机在负载缓慢变化时的端电压波动，用静态电压变化率 $\Delta U, \%$ 来表示：

$$\Delta U, \% = \frac{U - U_n}{U_n} \times 100 \%$$

式中 U_n ——发电机的额定电压 (V)；

U ——发电机在规定的负载变化范围内端电压的最大值 U_{max} 或最小值 U_{min} ，取偏离 U_n 的绝对值较大的值 (V)。

我国《钢质海船建造规范》规定：发电机从空载到满载，功率因数保持为额定值，主发电机的静态电压变化率应在 $\pm 2.5\%$ 以内，应急发电机的静态电压变化率应在 $\pm 3.5\%$ 以内。

发电机的调压特性，也就是有自动励磁调节时的发电机的外特性，多数情况下不是一条直线，而是一条曲线。而且由于铁心材料磁滞回线的影响，在负载增加过程中得出的特性曲线与负载减小过程中得出的特性曲线是不重合的，如图 0-1 所示。在确定电压变化率的时候， U_{max} 或 U_{min} 应取整个负载变化中曲线的

最高点或最低点。在通常的情况下, $U_{\max}$ 往往出现在空载时, $U_{\min}$ 往往出现在满载时。

3. 当投入或切除大容量的感应电动机时, 自动励磁装置应能保证发电机的瞬时电压波动和恢复至稳定值的时间在允许范围之内。发电机的瞬时电压波动用动态电压变化率 $\Delta U_d\%$ 表示;

$$\Delta U_d\% = \frac{U_d - U_n}{U_n} \%$$

式中 U_d ——发电机在突加负载或突减负载时的最低电压或最高电压。

电压恢复时间 t_r 指的是从负载突变开始到电压恢复至相应负载下稳态电压的 $\pm 3\%$ 范围内所需的时间。

图 0-2 表示发电机在大容量负载投入时的端电压变化过程。在 t_0 瞬间投入一个大容量

负载, 电压出现较大幅度的下降, 动态最低电压为 $U_{d\min}$, 由 $U_{d\min}$ 和 U_n 可计算动态电压变化率 $\Delta U_d\%$ 。电压下降至最低值的时刻用 t_1 表示。在新负载下发电机电压的稳态值为 U (因为是加负载, 通常有 $U < U_n$), 电压变化曲线进入 $U \pm 3\% U$ 范围内 (此后一直保持在这个范围内) 的时刻为 t_2 , 则电压恢复时间为,

$$t_r = t_2 - t_0$$

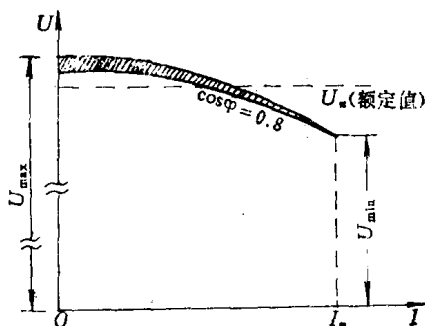


图0-1 静态调压特性

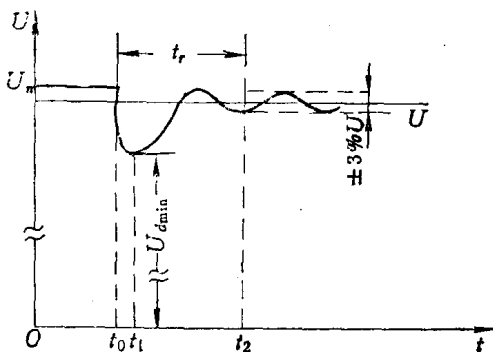


图0-2 动态调压特性

我国《钢质海船建造规范》规定，在突加或突减 50% 额定电流及功率因数不超过 0.4（滞后）的对称负载下，动态电压变化率应在 $\pm 15\%$ 以内，电压恢复时间不超过 1.5 s。

4. 当电力系统出现突然短路时，自动励磁装置应该有足够的强励能力，以产生一定数值的短路电流，使选择性保护装置准确动作，并在短路故障电路被切除以后，使发电机的端电压迅速回升。为此，励磁装置必须要有足够的强行励磁电压顶值和较高的励磁电压上升速度。

按照国际电工委员会（IEC）第十八技术委员会（TC-18）的规定，船用自动励磁装置在发电机出现短路时应提供足够的强励电流，使发电机的短路电流等于或大于三倍发电机额定电流，持续时间应大于 2 s。

短路故障被切除以后系统电压的变化曲线如图 0-3 所示。曲线 1 对应于有强励作用的励磁系统，曲线 2 对应于无强励作用的励磁系统。显然，前者电压恢复速度要比后者快。电压恢复速度愈快，短路故障切除后系统中感应电动机发生堵转的可能性就愈小。

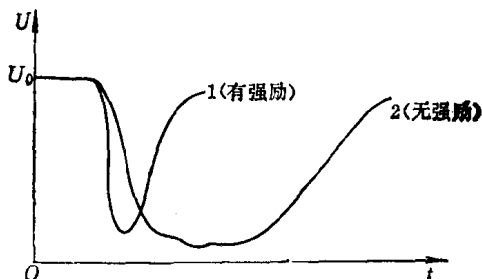


图0-3 电压恢复过程

5. 当两台或两台以上的同步发电机并联运行时，自动励磁装置应保证无功功率按发电机容量成比例分配，以防止个别机组电流过载，并使总的效率有所提高。

并联机组间无功电流不按比例分配的原因在于并联的发电机和励磁系统的标么值参数不一致。其中尤以励磁系统的标么参数不一致为多见。因此励磁装置应有无功电流分配和稳定功能，以克服由于这种参数不一致而引起的发电机电枢电路中的无功环流。

我国《钢质海船建造规范》规定，并联运行的交流同步发电

机组，当负载在额定功率的 20~100% 范围内变化时，各发电机实际承担的无功功率与按发电机额定功率成比例分配的计算值之差应不超过最大发电机额定无功功率的 $\pm 10\%$ 。

自动励磁装置的前三项功能归结为调节励磁电流，使发电机的端电压维持恒定。从这个意义上说，自动励磁装置常常简称为调压器。如果考虑到后面两项功能，还是用自动励磁装置这个名称更为确切。为了叙述的明确，今后我们把励磁调节器、励磁能源（通常指交、直流励磁机）和发电机励磁绕组三者的组合称为同步发电机的自动励磁系统，把励磁调节器和励磁能源两者的组合称为自动励磁装置。

二、自动励磁装置的分类

船用同步发电机的自动励磁装置的类型很多，分类方法也不一致。通常可按照直流励磁电源的获得方法、励磁调节器的作用原理及励磁装置的组成元件等进行分类。

1. 按照直流励磁电源的获得方法进行分类，可分为直流励磁机他励、静止自励和交流励磁机他励等三种类型。

(1) 直流励磁机他励方式。这是最早采用的一种励磁方式。陆地大电站多采用这种方式。直流励磁机可以由发电机轴传动，也可以用单独的电动机传动。图 0-4(a) 是这种励磁方式的原理线路图。

直流励磁机电磁惯性大，又有换向器这样的薄弱环节，所以不宜在船舶电站中使用。

(2) 静止自励方式。船舶电站同步发电机的容量较小，采用象直流发电机那样的自励方式是比较适宜的。但只有在大功率半导体整流元件大量应用以后，这种用发电机定子交流电流经整流后供给转子励磁的自励方式才有实现的可能。图 0-4(b) 为可控硅自励方式，图 0-4(c) 为相复励自励方式。

静止自励方式简单可靠。因为象变压器、电流互感器、半导体整流器等静止部件，不怕冲击振动和盐雾潮湿，特别适宜于船

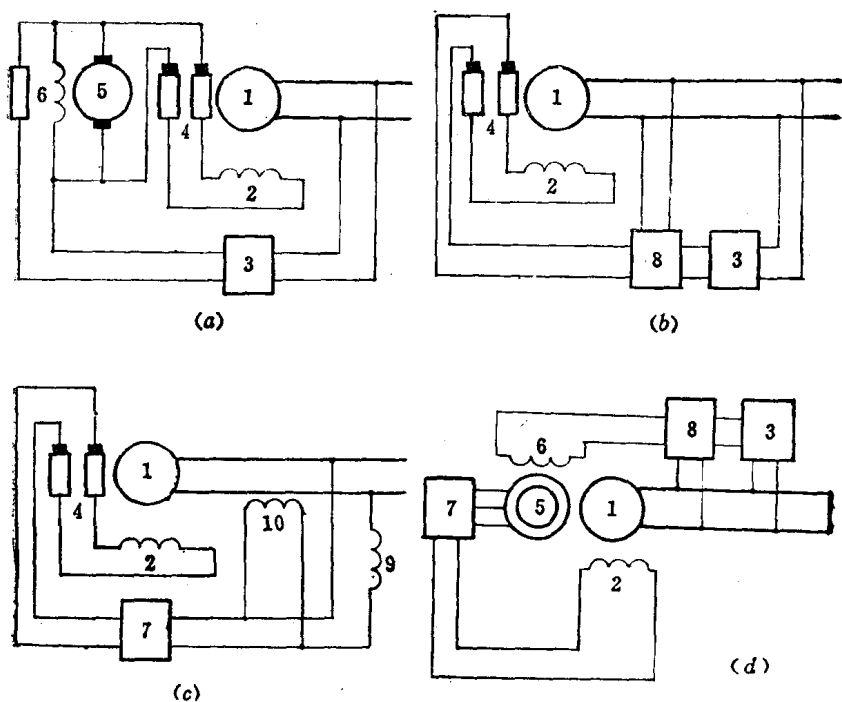


图0-4 励磁装置类型

(a) 直流他励; (b) 可控硅自励; (c) 相复励自励; (d) 交流他励。

1—发电机电枢; 2—发电机励磁绕组; 3—励磁调节器; 4—炭刷滑环;

5—励磁机电枢; 6—励磁机励磁绕组; 7—整流桥; 8—可控整流器;

9—电抗器。

舶条件下使用。此外，静止自励方式的电磁惯性小，励磁系统有优良的动态性能。特别是相复励装置，由于具有电流复励作用，能够直接起动与发电机容量相近的异步电动机。

(3) 交流励磁机他励方式。普通的交流同步发电机的转子绕组必须通过滑环和炭刷与外部电路保持电的联系。滑环和炭刷仍然是一个薄弱环节。因为滑动接触可能因油垢、灰尘和机械原因而造成接触不良，炭刷磨损下来的炭粉也可能落入绕组，使发电机的绝缘电阻降低。随着现代船舶自动化程度的提高和无人机舱的采用，希望有一种更可靠的交流同步发电机供给船舶电站使

用，于是就出现了以交流励磁机他励的无刷励磁方式。通常的交流同步发电机为转场式，与之相配合的交流励磁机则为转枢式。交流励磁机的电枢经硅整流元件整流后给交流发电机的磁场提供直流励磁电流。硅整流元件与电机转子部分一起旋转（图0-4(d)）。由于整个机组的旋转部分和静止部分之间没有任何滑动电接触，去掉了电刷和滑环，所以称这种励磁方式为无刷励磁方式。交流励磁机不但可靠性比直流励磁机高，而且动态性能也比直流励磁机优良。

2. 按照励磁调节器的作用原理分类，可分为按电压偏差调节，按扰动调节和复合调节等三类。

(1) 按电压偏差调节。按偏差调节的自动励磁调节器的特点是存在由输出到输入的负反馈，形成控制信号传输的闭合回路

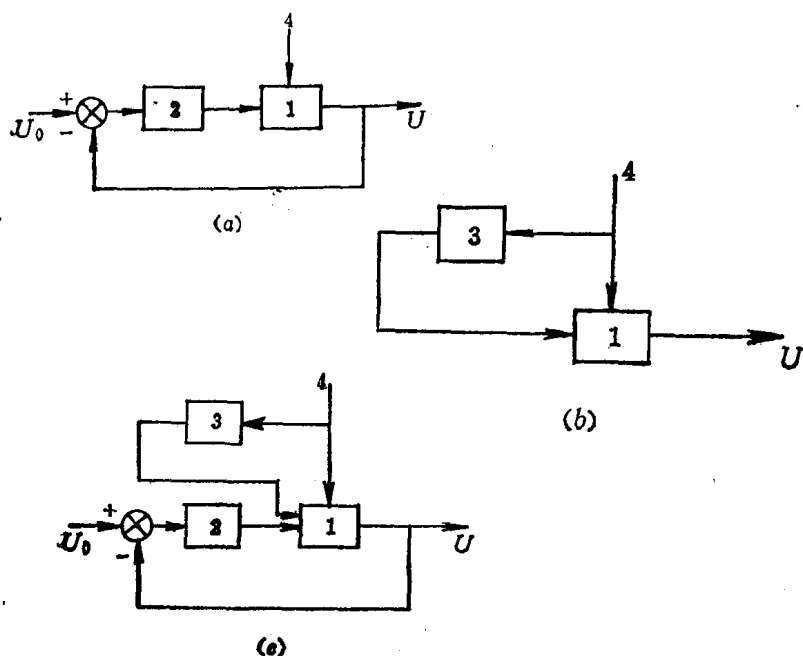


图0-5 三种励磁调节方式

(a) 按电压偏差调节；(b) 按扰动调节；(c) 复合调节。

1—调节对象；2—放大器；3—扰动测量及变换；4—扰动量。

(图 0-5 (a))。扰动不被直接测量, 但扰动效应在电压偏差 ΔU 中反映出来, 根据这个偏差值的大小和方向, 在调节器输出端形成校正信号。按偏差调节的励磁调节器也称为负反馈型励磁调节器, 是一种比较通用和完善的调节器。它能减小被调量的偏差而与引起偏差的原因无关; 不需对扰动进行测量而能克服多个扰动的影 响。选择足够大的增益和采取适当的校正环节, 从理论上说可以使静态和动态电压变化率达到任意规定的数值范围。

(2) 按扰动调节。同步发电机按扰动的励磁调节, 通常称为负载复励, 或简称复励。在这种励磁装置中, 用专门设计的电流测量环节对电枢电流这一主要扰动量进行测量, 然后变换为调节信号对调节对象进行调节。该调节信号对调节对象的作用与扰动的作用相反 (图 0-5 (b))。按扰动调节的励磁调节器结构简单, 工作可靠, 强励能力强, 动态响应好。它不是等输出量出现偏差后再进行反馈调节, 而是直接根据扰动量的大小进行前馈调节。这种调节器的不足之处是对一些次要的扰动量, 如温度变化、原动机转速波动等不易进行补偿, 加之铁心饱和和磁滞的影响, 使同一补偿装置在不同负载下的补偿作用不一致, 故静态电压变化率比较大。另外, 由于调压特性的改变比较困难, 并联运行时无功电流的按比例分配和稳定也比较困难。顺便指出, 按扰动补偿的励磁调节器因被测量的量和被调节的量不相同, 所以是一种开环调节器, 不宜称它为自动励磁调节器。

(3) 复合调节。复合调节包括按电压偏差调节和按负载扰动调节两种功能。它既具有调压精度高、无功分配均匀等按偏差调节的主要优点, 又具有强励倍数大、动态性能好等按扰动调节的主要优点, 是一种比较理想的励磁调节器。现代船舶电站的主发电机, 绝大多数采用复合式励磁调节器。如可控相复励、可控谐波励磁等。复合式励磁调节器通常以扰动补偿为主, 以偏差调节为辅, 后者常称为 AVR。复合式励磁调节器的方块图见图 0-5 (c)。

3. 按照励磁装置所使用的元件分类, 通常可分为下列几种,

(1) 炭阻式励磁装置。这种励磁装置多采用直流励磁机。调节器采用铁心、线圈、衔铁、杠杆等机电元件，通过调节发电机励磁回路的电阻或励磁机励磁回路的串联炭片电阻进行励磁调节。由于机电惯性大，工作可靠性差，使用的功率受限制等原因，目前已很少应用。但它是最早的按偏差调节的励磁调节器。

(2) 相复励装置。这种励磁装置采用变压器、电流互感器、电抗器以及半导体整流器等静止元件，电磁惯性较小，可靠性高，因而得到广泛的应用。通常做成可控相复励式。早期采用磁放大器和饱和电抗器做成的 AVR，其电磁惯性较大；如今普遍用半导体元件做成的 AVR，惯性很小，放大倍数很大，体积和重量也相当小。

(3) 三谐波励磁装置。这种励磁装置采用发电机中增设的三谐波绕组产生三谐波电势，经半导体整流器整流后给发电机励磁，结构简单，可靠性高。通常也加上半导体 AVR，做成可控谐波励磁装置。

(4) 可控硅励磁装置。这种励磁装置采用半导体二极管、三极管、可控硅等元件，具有体积小、重量轻、反应快、放大倍数高等特点，是目前使用的按电压偏差调节的励磁装置的主要型式。

第一章 可控硅自动励磁装置

第一节 概 述

按负反馈原理设计的自动励磁调节器，根据所采用元件的不同，曾出现过多种型式。如炭阻式励磁调节器、磁放大器-饱和电抗器式励磁调节器、电子管-闸流管式励磁调节器以及晶体管-可控硅（晶闸管）式励磁调节器等。由于船舶电站的工作环境比较恶劣，船舶电站对励磁装置提出了一些特殊要求，使得前面三种型式的励磁调节器没有得到推广使用。因为电子管和闸流管不耐冲击和振动，磁放大器和饱和电抗器的电磁惯性大，炭阻式调节器既不耐冲击振动，又有很大的机电惯性。比较理想的元件，要数晶体三极管和可控硅这样的固态元件。所以从六十年代开始，随着半导体器件的迅速发展，可控硅式励磁调节器在船舶电站中得到广泛使用，成为船舶电站的主要励磁装置之一。可控硅励磁装置的励磁能源取自发电机的电枢，而无须励磁机，因此属

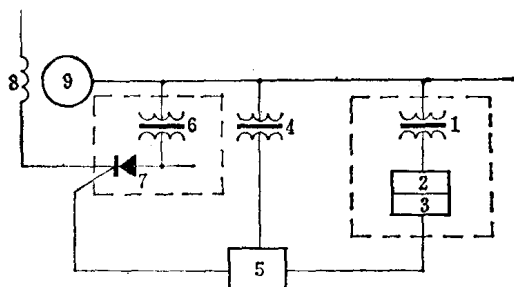


图1-1 可控硅励磁装置

1—测量变压器；2—整流滤波器；3—比较电路；4—同步变压器；5—移相触发电路；6—整流变压器；7—可控硅；8—励磁绕组；9—发电机。

于自励方式；励磁调节器则按电压偏差进行调节，属于负反馈型式。图 1-1 为可控硅励磁装置的单线图。自励部分包括整流变压器和可控硅整流器；调节器部分包括测量变压器、整流滤波器、比较电路、同步变压器和移相触发电路等。

发电机电枢电压经降压、整流、滤波后，转换成与之成正比的平滑直流电压，并与给定电压进行比较，其差值用来控制移相触发电路的触发脉冲相位，从而对可控硅的导通角进行控制。

可控硅励磁装置的主要优点是：

1. 整个励磁系统是一个负反馈闭环调节系统，具有很高的调压精度，很好的调压特性线性度和较高的特性稳定度。
2. 半导体元件的惯性很小，所以整个励磁系统的动态性能较好。
3. 励磁装置的体积小、重量轻、成本低、通用性好、易于系列化。

尽管如此，可控硅励磁装置在船舶电站中使用还是受到限制，主要原因在于：

1. 由于可控硅整流电路的电源直接取自发电机电枢电路，在可控硅触发导通瞬间，发电机端电压波形上会出现相应的凹陷，如图 1-2 所示。这样就会对用电设备产生干扰。电源线引到哪里，这种干扰就会带到哪里。对于一般强电设备来说，这种干扰影响不大，但

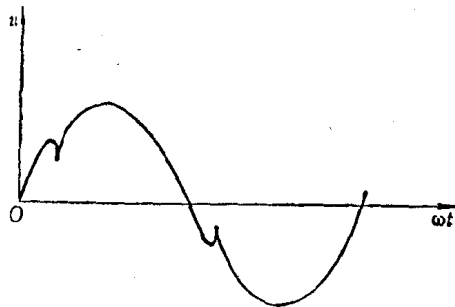


图 1-2 可控硅导通时对电压波形的影响

对于无线电通讯等弱电设备来说，这种干扰会增加它们的误差，严重时甚至会破坏它们的正常工作。因此必须采取一些措施来减弱这种干扰的影响。常用的方法有：

- (1) 采用和发电机主绕组成 90° 电角度的辅助绕组作为可

控整流电路的供电绕组,使触发脉冲的干扰不出现在电枢电路中。

(2) 适当增大整流变压器的短路电抗或加接换向电抗。

(3) 对某些弱电设备的进线电源端上加接低通滤波器, 或对某些重要设备加装电磁屏蔽。

以上措施虽然都有一定的效果, 但都会使设备复杂化, 而且也没有从根本上解决问题。

2. 当电网发生短路(完全短路或不完全短路)、电网电压大幅度跌落时, 可控硅整流变压器的输出电压也大幅度跌落, 励磁装置无法提供必要的励磁电流, 当然更谈不上强励, 也无法满足 IEC 对短路电流必须大于或等于三倍额定电流的要求。改进的办法可以加装电流补偿环节(参看第七章第二节)。但是由于种种原因, 这种线路并没有得到更多的应用。

3. 由于可控硅元件质量不够稳定, 对过电流和过电压比较敏感, 在一定程度上说其可靠性还是比不上电磁元件。对元件进行严格筛选、设计时适当加大安全系数以及采取有效的保护措施, 可以降低故障率, 提高可靠性。

本章主要介绍可控硅励磁装置的线路、工作原理和分析方法。第二节介绍各种形式的测量电路(包括整流电路和滤波电路)和比较电路; 第三节介绍常用的移相触发电路; 第四节介绍主电路, 包括可控整流电路, 起励电路和保护电路。关于一些典型的可控硅励磁装置的原理及线路, 见第七章第一节。

第二节 测量比较电路

船舶同步发电机的自动励磁调节系统, 实质上是正弦波电压(幅值或平均值)的恒值系统。测量电路的输入量, 就是系统的被调量——发电机的电枢电压。测量电路的输出量与给定电压相比较, 其差值经放大后去控制发电机的励磁。所以测量比较电路的性能, 在很大程度上决定了整个励磁系统的动态和静态性能。

对测量比较电路的基本要求是: