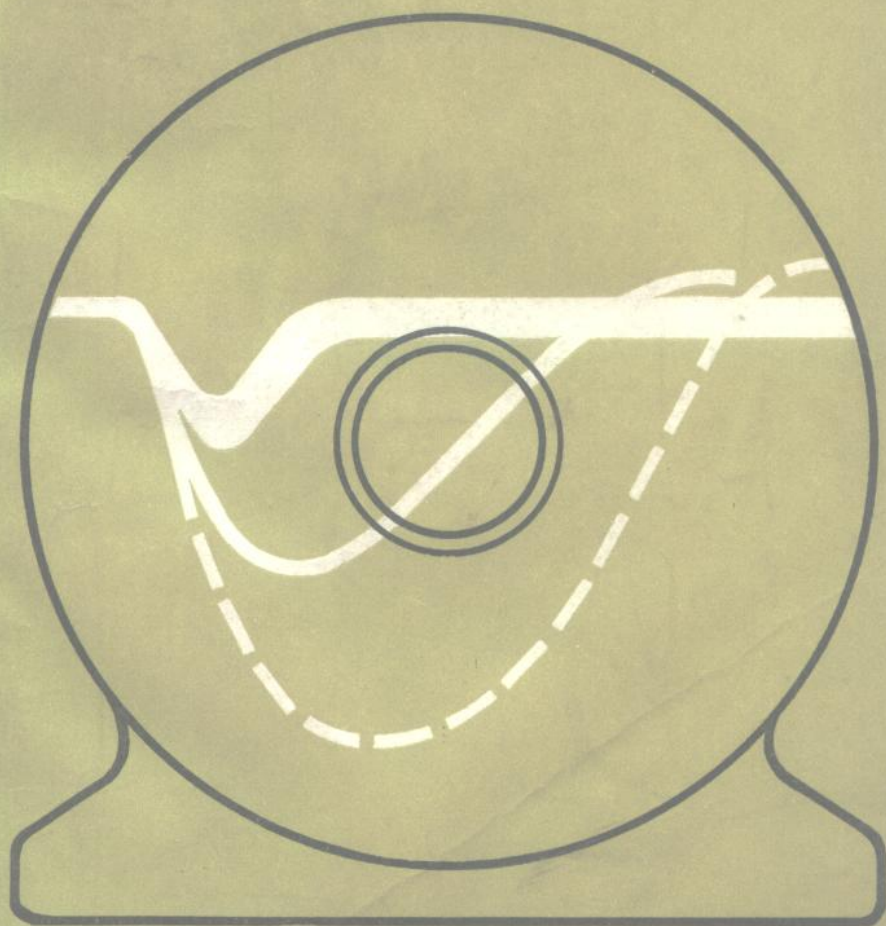


# 船舶同步发电机 自动励磁调节和稳定性

〔苏〕B.П. 柯瓦连科 著

钱瑞麟 译



# 船舶同步发电机 自动励磁调节和稳定性

〔苏〕B. II. 柯瓦连科 著

钱瑞麟 译

国防工业出版社

## 内 容 简 介

本书阐明了船舶同步发电机自动励磁调节系统的两大类型：静止励磁和无接触励磁。从基本概念、理论分析、数学模型及实验试验讨论了船舶同步发电机的动态特性和并联运行静态稳定性。

第一章讨论了船舶同步发电机静止励磁系统的各种调节规律和各种线路的基本原理。第二章讨论了无接触同步发电机的各种变型，重点讨论了无刷同步发电机。第三章讨论了励磁动力学和改善动态特性的可能途径，对过渡过程进行了数学分析，提出了动态特性的实用计算方法，并比较详细地讨论了强力励磁调节问题。第四、五章讨论了船舶同步发电机和大电网并联运行、二台船舶同步发电机并联运行的静态稳定性，提出了在带有自动转速调节器和自动励磁调节器情况下反映船舶同步发电机的各种过程的数学模型，用模拟计算机进行了计算，并给出了不同结构、参数情况下的计算结果。

本书可供大专院校船电专业的师生教学参考，也可供从事船电专业科研、设计的工程技术人员及船舶电机员参考。

## АВТОМАТИЧЕСКОЕ РЕГУЛИРОВАНИЕ ВОЗБУЖДЕНИЯ И УСТОЙЧИВОСТЬ СУДОВЫХ СИНХРОННЫХ ГЕНЕРАТОРОВ

В. П. Коваленко

Издательство «Судостроение» 1976

### 船舶同步发电机自动励磁调节和稳定性

〔苏〕В. П. 柯瓦连科 著

钱 瑞 麟 译

\*

国防工业出版社出版

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

国防工业出版社印刷厂印装

\*

850×1168<sup>1</sup>/<sub>32</sub> 印张 8<sup>1</sup>/<sub>4</sub> 208 千字

1980年6月第一版 1980年6月第一次印刷 印数：0,001—1,750册

统一书号：15034·1986 定价：1.05元

## 译 序

船舶同步发电机静止励磁调节系统、无接触励磁系统、动态特性和并联运行稳定性是船舶电站的四个基本问题。阐明这四个基本问题对船舶电站的发展是很有意义的。

本书对静止励磁调节系统，阐明了其各种励磁调节规律和各种线路的基本原理，并提出了强力励磁调节问题。

关于无接触同步发电机，阐述了其发展过程和各种变型，重点讨论了目前船舶上应用最广的无刷同步发电机。引入了旋转二极管和旋转可控硅二种无刷励磁系统的同步励磁机的主要参数计算方法。

船舶电站动态特性是保证供电质量的重要问题。本书提出了励磁动力学的概念，并进行了动态特性理论分析，特别是分析了突加负载时的瞬时压降和起始压降这两种不同的过程；分析了双轴励磁调节和强力励磁调节对改善动态特性的作用。

关于并联运行稳定性，讨论了稳定性的基本概念和定义。阐明了研究稳定性的方法。从比较简单的一台船舶发电机组和大电网并联运行稳定性研究着手，进一步研究二台船舶发电机组并联运行的稳定性。对带调速器和调压器的复杂系统原始状态稳定性的研究，建立了数学模型，并用模拟计算机进行了计算。具有不同结构、参数的同步发电机组并联运行原始状态稳定性的研究结果，可供船舶同步发电机组设计、研究和选用时参考。

在翻译过程中，对原书中明显错误之处，已作了改正。但由于水平所限，译本难免还存在一些问题，谨请读者批评指正。

## 序言(摘译)

船舶同步发电机是现代船舶电力系统中最重要的设备。它的稳态和动态输出特性，在相当大的程度上取决于所采用的自动励磁调节系统。

船舶同步发电机自动励磁调节系统和励磁系统的发展，总的说来是和半导体技术的巨大进步分不开的。

大约十五年前，带静止励磁系统的自励同步发电机在苏联及许多国家造船工业中得到广泛应用。近几年来，英、美以及其他国家设计制造了无接触励磁同步发电机供造船工业用。这种发电机在所有电路中都没有接触点，因此具有较高的可靠性，并且不需要常规的维护工作。

关于船舶无接触同步发电机励磁调节的各种问题，在苏联文献中还没有作过比较完整的说明，有关这些问题的资料也还没有作过系统的整理。本书的一个任务是阐明这个领域中以前尚未详细讨论过的一系列问题。

为了使若干台船舶同步发电机有效地运行，必须保证其并联运行状态的稳定性。这种稳定性在相当大的程度上取决于自动励磁调节系统的特性。同时，船舶同步发电机的稳定性主要取决于各台机组的电磁参数、电机参数，特别是自动调速系统的参数和特性。随着自动励磁调节系统和调速系统的发展，提出了一系列关于保证并联运行状态稳定性的新课题，其中最重要的是消除自振，在本书中着重注意了这个问题。

关于同步发电机并联运行状态稳定性的问题，不仅考虑了与自动励磁调节系统的关系，而且对各种重要因素进行了专题研究。

# 目 录

|                                    |     |
|------------------------------------|-----|
| 第一章 静止励磁同步发电机的励磁调节 .....           | 1   |
| § 1-1 同步发电机励磁调节系统的类型及其原理 .....     | 2   |
| § 1-2 整流二极管静止自励系统 .....            | 9   |
| 1-2-1 基本方程式 .....                  | 9   |
| 1-2-2 主要参数计算 .....                 | 17  |
| 1-2-3 按偏差调节 .....                  | 20  |
| 1-2-4 起始自励和短路状态 .....              | 22  |
| § 1-3 可控硅静止自励系统 .....              | 27  |
| 1-3-1 可控硅自动励磁调节系统框图 .....          | 28  |
| 1-3-2 可控硅自动励磁调节系统基本元件 .....        | 31  |
| 第二章 无接触同步发电机的励磁调节 .....            | 39  |
| § 2-1 无接触同步发电机的各种变型及其励磁系统的特点 ..... | 40  |
| 2-1-1 径向励磁交流发电机 .....              | 45  |
| 2-1-2 轴向励磁交流发电机 .....              | 56  |
| 2-1-3 径向励磁脉动发电机 .....              | 59  |
| 2-1-4 轴向励磁脉动发电机 .....              | 63  |
| § 2-2 带同步励磁机的无刷同步发电机的励磁调节 .....    | 66  |
| § 2-3 带异步励磁机的无刷同步发电机的励磁调节 .....    | 81  |
| § 2-4 各种类型无接触同步发电机性能比较 .....       | 87  |
| 第三章 同步发电机励磁动力学 .....               | 91  |
| § 3-1 改善动态特性的可能途径 .....            | 92  |
| § 3-2 自励同步发电机的动态特性 .....           | 106 |
| 3-2-1 自励同步发电机按负载电流调节的一般规律 .....    | 106 |
| 3-2-2 实用计算方法 .....                 | 115 |
| § 3-3 强力励磁调节 .....                 | 119 |
| 3-3-1 强力调节作用下的过渡过程持续时间 .....       | 120 |
| 3-3-2 负载动态变化时的发电机电压变化特征 .....      | 125 |
| 3-3-3 采用继电式自动励磁调节系统时的发电机电压波形 ..... | 136 |

|                                            |     |
|--------------------------------------------|-----|
| 第四章 同步发电机和岸电网并联运行稳定性 .....                 | 142 |
| § 4-1 基本概念和定义 .....                        | 143 |
| § 4-2 不可调的同步发电机和岸电网并联运行静态稳定性 .....         | 150 |
| 4-2-1 定子绕组及纵轴阻尼回路中的过渡过程忽略时的稳定性分析 .....     | 151 |
| 4-2-2 定子绕组、纵轴及横轴阻尼回路中的过渡过程忽略时的稳定性分析 .....  | 172 |
| 4-2-3 按派克-戈列夫完全方程组进行稳定性分析 .....            | 175 |
| § 4-3 可调的同步发电机和岸电网并联运行静态稳定性 .....          | 182 |
| 4-3-1 用频率判据进行稳定性分析 .....                   | 182 |
| 4-3-2 用模拟计算机进行稳定性分析 .....                  | 195 |
| 第五章 船舶同步发电机并联运行稳定性 .....                   | 202 |
| § 5-1 不可调的船舶同步发电机并联运行静态稳定性 .....           | 203 |
| 5-1-1 定子绕组及纵轴阻尼回路中的过渡过程忽略时双机稳定性分析 .....    | 203 |
| 5-1-2 定子绕组、纵轴及横轴阻尼回路中的过渡过程忽略时双机稳定性分析 ..... | 220 |
| 5-1-3 按派克-戈列夫完全方程组进行双机稳定性分析 .....          | 222 |
| § 5-2 二台可调的船舶发电机并联运行给总负载供电时的稳定性 .....      | 237 |
| 5-2-1 各种过程的数学描述和起始状态坐标的确定 .....            | 237 |
| 5-2-2 用模拟计算机进行双机稳定性分析 .....                | 245 |
| 结 语 .....                                  | 251 |
| 参考文献 .....                                 | 252 |

# 第一章 静止励磁同步发电机的

## 励磁调节

近二十年来，船舶同步发电机静止励磁系统发展很快。这是由于一般同步发电机带有运行不可靠、维护不方便的部件——直流励磁机，而静止励磁系统的主要部件是把交流变换成直流的静止整流器，特别适用于船用同步发电机。苏联舰船于五十年代末期开始装设带静止励磁系统的同步发电机。

静止励磁系统是利用整流元件的单向导电性能设计的。在该系统的接至发电机定子的交流电路中实现了综合调节。这种调节系统按照发电机电枢电流及其相位的变化以及电压偏差等控制信号，在整流电路之前形成所需要的励磁功率。

按照发电机电流及其相位进行励磁调节，并带校正器时，可以使发电机在负载阻抗变化的情况下保持稳态电压恒定。带有实现这种调节原理的静止励磁系统的船舶同步发电机，通常称为自励同步发电机。

根据自励同步发电机研究积累的经验，下面将介绍具有整流元件的励磁系统一般近似式。由于自励同步发电机中非线性元件计算的复杂性，更精确地表达这些关系是困难的。

轻便、可靠的大功率可控半导体元件的出现，使自励同步发电机可以采用这种高效率、高放大系数和快速动作的元件而更趋完善，既保持按电流（及其相位）大幅度调节的性能，又可以利用可控硅元件进行按电压偏差的补充调节（校正）。

采用可控硅元件作为励磁系统主回路调节元件，原则上是可控整流自动励磁调节系统的新发展。这种线路的方案很多，但没有明确的分类。

一般可控硅自动励磁调节系统包含下列功能部分:测量电路、控制脉冲形成电路、可控整流电路。了解这些部分的工作过程,有助于实际识别各种可控硅自动励磁调节系统的不同形式。

## § 1-1 同步发电机励磁调节系统的 类型及其原理

船舶同步发电机绝大多数采用电磁方式励磁,亦即由通以直流电流的绕组励磁。但也有较少的船舶发电机采用永久磁铁建立磁场,这种电机将在第二章中介绍。本章讨论电磁方式励磁同步发电机。

采用电磁方式励磁必须具备直流电源。一般发电机用直流发电机作为励磁机。

直流励磁机可以由发电机轴传动,也可以由同一船舶电网供电的电动机传动。从同步发电机励磁机的功能来看,它是一个把机械能或交流电能变换成直流电能的换能器。

这种向同步发电机励磁绕组供电的电机换能器,可以根据具体条件,由一台、二台或多台电机(多级励磁机),将原来的能量变换成指定电压的直流能量。

然而,供同步发电机励磁绕组的换能器,不仅可以用电机实现,而且可以用静止的换能装置很有成效地实现。静止换能装置通常包含半导体元件和变压器。

向同步发电机励磁绕组供电的换能器和励磁调节装置组成的总体,通常称为励磁系统。

励磁系统可能具有各种线路,如图 1-1 所示。在这些线路中,省略了使电枢电压恒定的调节元件,也未示出静止励磁系统中的变压器和电机励磁系统中的副励磁机。这种副励磁机通常用来给励磁机磁场及调节装置供电。

按照励磁绕组由外加电源供电或由发电机电枢供电分类,励磁系统可相应地分为他励系统(图 1-1 a ~ e)和自励系统(图

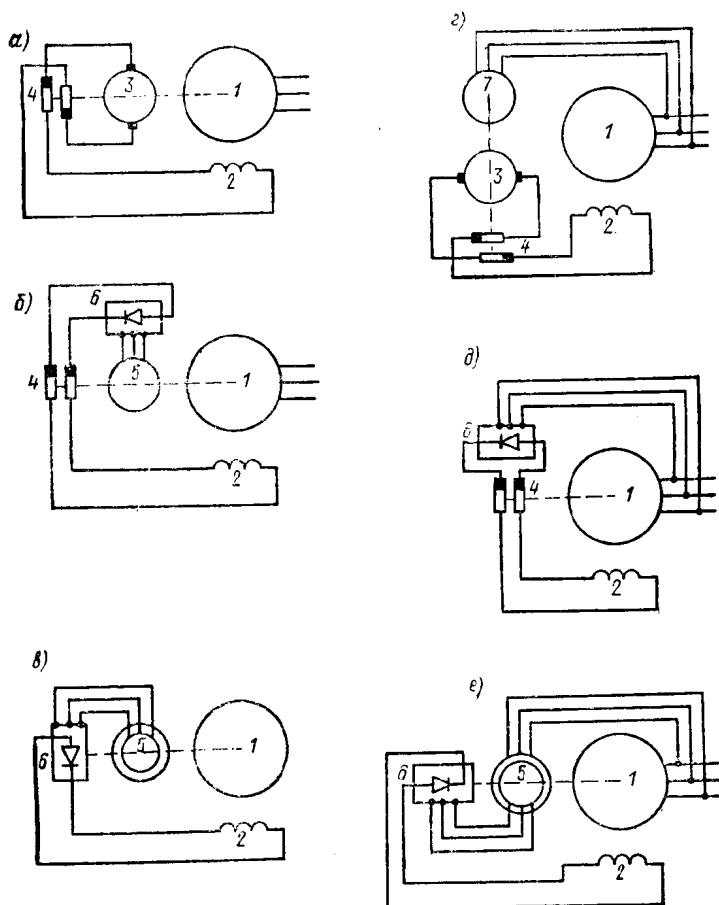


图1-1 同步发电机励磁系统原理线路

1—同步发电机；2—励磁绕组；3—直流励磁机；4—炭刷滑环机构；  
5—交流励磁机；6—整流器；7—交流副励磁机。

1-1  $i \sim e$  )。

从保证动态情况下的电能质量特性来看，自动系统一般不如他励系统。因为自动发电机励磁回路的工作取决于电枢电路的状态，在某些故障情况下，例如短路时，由于电压下降而使保证可靠强励发生困难。

但是,采用静止整流器的自励系统,见图 1-1  $\delta$ ,在船舶中得到广泛应用。这是因为这种系统结构坚固、安装方便,而且由于它没有直流电机所固有的炭刷整流子装置,而使它的性能比直流励磁机系统可靠。

图 1-1  $\epsilon$  所示的自励系统采用比较庞大的变流机组,一般不用于船舶发电机,只是在船舶电力推进系统中有时采用。

图 1-1  $e$  所示的自励系统用于船舶的合理性尚在研究中。

他励系统的优点是同步发电机励磁与电枢电路状态无关,而在过渡状态或故障状态能够得到较佳的动态特性。十五年前的船舶同步发电机主要采用图 1-1  $a$  所示的他励系统。

目前,在船上开始运用无刷他励系统(图 1-1  $\theta$ )。另一种带交流励磁机、静止整流器和炭刷滑环机构的他励系统(图 1-1  $\zeta$ ) 在船上不予采用,而广泛用于工业电站。

按照供同步发电机励磁绕组的电能变换器分类,可分为电机励磁系统(图 1-1  $a$ 、 $\epsilon$ )、静止励磁系统(图 1-1  $\delta$ ) 和混合励磁系统(图 1-1  $\zeta$ 、 $\theta$ 、 $e$ )。

在电机励磁系统中,所有能量的变换均由直流或交流电机实现。直流或交流发电机用来作为励磁机和副励磁机,而直流或交流电动机用来驱动励磁发电机。

在静止励磁系统中,电能的变换只是由静止装置——半导体器件和变压器实现。

在混合励磁系统中,能量的变换,一部分由电机实现,另一部分由静止装置实现(例如,用整流器变换电流种类,用变压器变换交流电压)。

一般同步发电机励磁系统的主要特点是在励磁回路的转动部分和静止部分之间仍然存在滑动接触。

同步发电机的电磁励磁系统中,具有滑动接触作为电气连接的系统称为有接触励磁系统(图 1-1  $a$ 、 $\zeta$ 、 $\epsilon$ 、 $\delta$ );所有电路的电气连接(包括和励磁绕组的连接)均不用滑动接触的系统称

为无刷励磁系统(图 1-1  $\theta$ 、 $e$ )。

无刷励磁系统是船舶同步发电机的有发展前途的励磁系统之一，本书将在第二章中作比较详细地介绍。

船舶同步发电机励磁系统应保证所发出的电能，无论在稳态或者在船舶电力系统故障情况——短路、几组大功率受电设备同时切换等的动态条件下，具有足够高的质量特性。励磁系统还应保证同步发电机并联运行状态的稳定性。为了实现上述功能，励磁系统必须具有快速自动励磁调节作用。

快速自动励磁调节系统的主要指标是强励时的励磁电压上升速度和强励倍数(最大励磁电压与额定励磁电压之比)。

根据对船舶同步发电机的不同要求和实现这些要求的不断发展的技术可能性，决定在自动励磁调节系统中，应用自动调节理论的三个著名的基本调节原理：按偏差调节、按扰动(负载)调节以及按偏差和扰动调节(综合调节原理)。

图 1-2 示出船舶同步发电机的前二种自动励磁调节原理方框图。按偏差调节的自动励磁调节系统的特点是存在由输出到输入的反馈，形成控制信号传输的闭合回路(图 1-2  $a$ )。发电机的扰动作用不被直接测量和感应，但是扰动的效应在偏差值  $u_{ycr} - U$  (调节器基准电压和同步发电机电枢电压之相对差)中反映出来，根据这个偏差在调节器输出端形成校正信号。

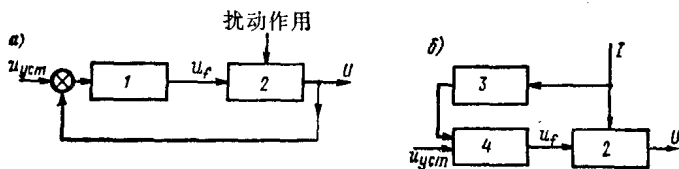


图 1-2 船舶同步发电机自动励磁调节原理方框图

$a$ —按偏差调节； $b$ —按扰动(负载)调节。

1—励磁调节器；2—发电机；3—电枢电流测量环节；4—负载(电流)信号变换和补偿环节； $I$ 、 $U$ —电枢电流和电压； $u_{ycr}$ 、 $u_f$ —基准电压和励磁电压。

同步发电机的按偏差自动励磁调节是一种比较完善和通用的

调节原理。这种调节原理能减小电压偏差而与引起偏差的原因无关，同时能消除任何扰动的影响而无需对扰动进行测量。但是在这种调节情况下，要同时保证高精度特性、快速性、并联运行状态稳定性和继电保护设备动作有效性是很困难的。

同步发电机的按扰动（负载）励磁调节系统，通常称为负载复励系统，或简称复励系统。在这种系统中，用特殊设计的电流测量环节对电枢电流（即扰动本身）进行测量，而不测量  $u_{\text{ver}} - U$  之差。然后，电流信号进入负载信号变换和补偿环节，形成调节装置的输出信号，该输出信号对发电机所产生的作用应与负载电流的作用相反（图1-26）。

为了实现复励调节原理，必须知道在电枢电流（扰动作用）和励磁电流（控制作用）变化的情况下，发电机的特性是怎样变化的。由于电流不仅可以有稳态变化，而且可以有动态变化，所以不仅必须知道在稳态条件下的发电机特性，而且必须知道在过渡状态下的发电机特性。因此设计复励系统比设计按偏差调节系统要求掌握更多的原始资料。

仅仅利用复励原理设计的系统，由于只对扰动作用发生感应，所以是一个开环系统（图1-26）。复励系统不能称为自动调节系统。根据自动励磁调节系统理论<sup>[20]</sup>，自动调节系统必须是一个闭环系统，在该系统中由被控制量的实际值和给定值进行比较产生控制作用。

复励系统的缺点可指出如下：

1. 对发电机电枢电流的作用存在欠补偿或过补偿的情况。这是因为要实现扰动作用和调节作用之间完全符合要求的函数关系是困难的。由于发电机和调节器部件磁路饱和的影响以及其他原因，这种函数关系是复杂的、非单值的，所以只能近似地实现这种关系。

2. 只补偿一个因素——电枢电流对被控制量的影响。在该系统中未经补偿的其他扰动会使被控制量（电压）发生颇大的变化。

同步发电机中这种附加的未经补偿的扰动有诸如：励磁电压振荡、原动机转速振荡、温度变化引起的绕组和炭刷电阻的变化等。

由于上述原因，按复励原理进行励磁调节不能保证同步发电机具有较高的调压精度。但是，按扰动进行励磁调节所固有的系统快速作用在许多情况下具有决定性的意义。

综合按偏差及按扰动二个自动调节原理是很有成效的。综合调节原理具有各个单独作用原理所固有的优点，因而能使分别实现上述原理时所出现的各种缺点的影响消除或大为减轻。

自动励磁调节系统作用于发电机的符合要求的励磁增量  $\Delta u_{f0}$  与电压偏差相对值  $\Delta U$ 、电流  $I$ ，以及它们变换量(微商和积分)之间的函数关系：

$$\Delta u_{f0} = f(\Delta U, \Delta U', \Delta U'', \dots, \int \Delta U dt, \dots, I, I', \dots) \quad (1-1)$$

称为励磁调节器函数，或称励磁调节规律。

按偏差调节原理的函数一般可用下式表示

$$\Delta u_{f0} = f(\Delta U, \Delta U', \Delta U'', \dots, \int \Delta U dt) \quad (1-2)$$

复励调节原理的函数为：

$$\Delta u_{f0} = f(I, I', \dots) \quad (1-3)$$

式(1-1)表示综合调节原理函数。

在发电机（无论是船用或一般工业用）励磁调节系统发展的初始阶段，应用了相当简单的调节函数：

$$\Delta u_{f0} = k \Delta U \quad (1-4)$$

$$\Delta u_{f0} = k_1 (\Delta U, I) \quad (1-5)$$

式中  $k$  和  $k_1$ ——放大系数。

根据函数(1-4)调节称为按电压偏差比例调节，根据函数(1-5)称为按电压偏差和发电机电流的比例调节。

早期使用的励磁调节器具有明显的不灵敏区，因此不能反应较小的电压偏差和电流，并且，它们的放大系数  $k$  和  $k_1$  比较小，快速性也比较差。当然，这样的调节器不能保证电能的高质量，

也不能保证大功率电站工况的静态和动态稳定性。

工业用同步发电机自动励磁调节系统目前发展阶段的特点是广泛采用所谓强力作用调节系统。这种调节称为强力励磁调节。

强力励磁调节一般具有以下特征：

a) 无不灵敏区，高放大系数，用快动作元件和（正、反极性）高强励倍数达到这一点；

6) 强励时励磁电压上升速度快，为了达到这一点，不仅按偏差及扰动，而且按它们的微商进行调节。

强力励磁调节的主要特点是在自动励磁调节器的输出端提供快速变化的强力调节作用信号，该信号高于它在额定负载时的最大值许多倍。

根据强力励磁调节的上述特点，可以认为它能实现函数(1-1)综合调节原理。

对于在调节器输出端可以得到颇大的、实际上无惯性的、高速变化的调节作用，而在调节函数中并不包含电压偏差微商及电流微商的励磁调节，有时也称强力励磁调节。

目前，强力励磁调节应用于船舶同步发电机的合理性尚在研究中。在第三～五章中将对有关强力励磁调节的一些问题进行讨论。

同步发电机自动励磁调节系统，按输入和输出信号之间的联系特征分类，又可分为以下二种类型：

1) 连续作用系统，其中所有元件的输入和输出信号均为连续的时间函数；

2) 间断作用系统，其中元件的输入和输出信号之间的联系是有间隔的、定时的。

船舶同步发电机自动励磁调节系统不仅有连续作用系统，而且也有间断作用系统。

间断作用系统本身又可以分为：

——脉冲调节系统，其中至少有一个元件的输出信号是脉冲

序列, 脉冲幅度、宽度或重复频率取决于该元件每个瞬时输入信号的大小(信号随时间变化);

——继电调节系统, 其中至少有一个元件, 当它的输入信号超过某极限值或阈值时, 它的输出信号跃变一次(信号随电平变化);

——继电-脉冲调节系统, 或称编码调节系统, 它的输出信号不仅反映输入信号随时间的变化, 而且反映其随电平的变化。

## § 1-2 整流二极管静止自励系统

### 1-2-1 基本方程式

静止励磁自励同步发电机的励磁调节原理可用近似方程式表示。对于理想的隐极同步发电机, 它的定子电阻为零, 根据图 1-3 所示的矢量图, 它的电压  $\dot{U}$ 、电枢电流  $\dot{i}$  和电动势  $\dot{E}_{af}$  之间具有如下的关系:

$$\dot{E}_{af} = \dot{U} + jx_c \dot{i} \quad (1-6)$$

式中  $x_c$ ——发电机同步电抗,  $j = \sqrt{-1}$ 。

用标么值表示时, 如果忽略发电机的饱和, 则  $E_{af} = i_f$ , 式中  $i_f$ ——发电机励磁电流。用标么值表示并考虑饱和时, 则  $E_{af}$  和励磁电流的关系为:

$$E_{af} = a + i_f \quad (1-7)$$

式中参数  $a$  表示发电机饱和的影响, 等于在所研究的状态下空载特性延伸线和真实曲线的坐标差。

在发电机带载, 负载阻抗  $Z = r + jx$  恒定的稳态条件下, 调节规律  $i_f = f(\dot{U}, \dot{i})$  为:

$$i_f = K |K_1 \dot{U} + jK_2 \dot{i}| \quad (1-8)$$

式中  $K$ 、 $K_1$ 、 $K_2$ ——比例系数。

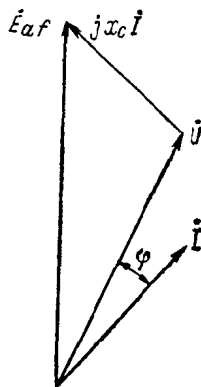


图1-3 理想的隐极同步发电机矢量图

假设  $\dot{U} = i Z$ , 则方程(1-6)~(1-8)的共同解为:

$$U = \frac{a}{\left| 1 + j \frac{x_c}{Z} \right| - K \left| K_1 + j \frac{K_2}{Z} \right|}$$

在特定情况下, 当辐角

$$\arg\left(1 + j \frac{x_c}{Z}\right) = \arg\left(K_1 + j \frac{K_2}{Z}\right)$$

则

$$U = \frac{a}{\left| 1 - KK_1 + j \left( \frac{x_c}{Z} - \frac{KK_2}{Z} \right) \right|} \quad (1-9)$$

如果

$$1 - KK_1 = a, \quad x_c = KK_2 \quad (1-10)$$

则当  $Z = \text{变量}$  时, 电压  $U = 1$ 。

因而, 如果按照式(1-8)的规律设计发电机励磁调节系统, 并且满足(1-10)的条件, 则在负载阻抗变化的情况下发电机稳态电压保持不变。实现式(1-8)调节规律系指:

——实现由发电机定子电路到发电机转子电路的反馈(自励);

——用电压互感器和电流互感器, 或一台三绕组互感器, 实现定子电压、电流和转子电压、电流的能级匹配;

——将与定子电压、电流瞬时值成比例的信号, 预先变换成物理量纲相同的正弦电量(电压或电流)或电磁量(磁动势或磁通), 然后进行合成;

——在励磁系统输出端将交流电压(电流)进行整流, 为此必须采用整流装置, 在船舶发电机中通常采用半导体整流二极管接成桥式电路。

励磁系统有信号电合成和信号电磁合成的区别。在具体的励磁线路中, 必须首先考虑将电流变换成与其成比例的电压(电压合成)或将电压变换成与其成比例的电流(电流合成)的部件。